БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ИММАНУИЛА КАНТА
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ И МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

ГИБРИДНЫЕ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием

Зеленоградск, Калининградская область

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. А. В. Колесникова

Научное электронное издание

Калининград
Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
2020

© БФУ им. И. Канта, 2020
ISBN 978-5-9971-0614-0

УДК 004.8
ББК 32.813я73

Издание осуществлено при поддержке Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Колесникова [Электронный ресурс] : научное электронное издание. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2020.

Публикуются доклады, представленные на V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» (ГиСИС-2020).

Издание предназначено для научных работников, аспирантов, магистрантов и студентов.

© БФУ им. И. Канта, 2020
ISBN 978-5-9971-0614-0

Программный комитет

Председатель — *А. В. Колесников*, д-р техн. наук, проф. (Россия, Калининград, БФУ им. И. Канта)

Заместители председателя:

И. Б. Фоминых, д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва, НИУ «МЭИ»)
В. Б. Тарасов, канд. техн. наук, доц. (Россия, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Члены программного комитета:

Р. А. Алиев, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан, Баку, АзГНА)
И. Б. Арефьев, д-р техн. наук, проф. (Польша, Щецин, Морская академия)
И. З. Батыршин, д-р физ.-мат. наук, проф. (Мексиканские СШ, Мехико, IPN)
А. В. Гаврилов, канд. техн. наук, доц. (Российская Федерация, Новосибирск, НГТУ)
В. В. Голенков, д-р техн. наук, проф. (Республика Беларусь, Минск, БГУИР)
В. И. Городецкий, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Санкт-Петербург, СПИИРАН)
А. П. Еремеев, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Москва, НИУ «МЭИ»)
С. М. Ковалев, д-р техн. наук, проф. (Россия, Ростов-на-Дону, РГУПС)
Л. Г. Комарцова, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Калуга, КФ МГТУ)
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Москва, ИПУ РАН)
В. М. Курейчик, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Таганрог, ТТТИ ЮФУ)
†*Г. С. Осипов*, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
А. В. Павлов, д-р физ.-мат. наук, доц. (Российская Федерация, Санкт-Петербург, СПб НИУ ИТМО)
А. Б. Петровский, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
Г. В. Рыбина, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ)
Н. Г. Ярушкина, д-р техн. наук, проф. (Российская Федерация, Ульяновск, УГТУ)

Организационный комитет

Председатель — *А. В. Юров*, д-р физ.-мат. наук, проф. (Российская Федерация, Калининград, БФУ им. И. Канта)

Заместитель председателя:

С. Б. Румовская, канд. техн. наук, науч. сотр. (Российская Федерация, Калининград, КФ ФИЦ ИУ РАН, БФУ им. И. Канта)

Члены организационного комитета:

А. В. Барзенков, ассистент (Российская Федерация, Калининград, БФУ им. И. Канта)
Э. В. Ясинский, аспирант (Российская Федерация, Калининград, БФУ им. И. Канта)

Дмитрий Александрович ПОСПЕЛОВ (19 декабря 1932 г. — 30 октября 2019 г.) — специалист в области искусственного интеллекта (ИИ), доктор технических наук, профессор. Окончил в 1956 г. механико-математический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. С 1956 по 1968 г. работал в Московском энергетическом институте, где помимо преподавательской деятельности активно занимался научными исследованиями в области теории вычислительных систем, многозначных логик, теории автоматов и теории игр. С 1968 по 1998 г. трудился в Вычислительном центре АН СССР (ныне ВЦ РАН).

С 1968 г. главной областью его научной деятельности становится ИИ: моделирование поведения человека, формализация рассуждений, общие проблемы моделирования жизненных процессов в естественных и искусственных системах.

В частности, Д. А. Поспелов впервые в мире разработал подход к принятию решений, опирающийся на семиотические (логико-лингвистические) модели, который послужил теоретической основой ситуационного управления большими системами. Им создана теория «наивных» псевдофизических логик, моделирующих рассуждения «здравого смысла» о времени, пространстве, действиях, каузальных цепочках и т. д., которая обеспечивает реализацию в интеллектуальных системах рассуждений о закономерностях физического мира и действиях в нем. Д. А. Поспелов предложил формальную модель поступков, описывающую нормативное поведение, что позволяет роботам и другим системам ИИ принимать целесообразные с точки зрения норм решения.

Важнейшим достижением Д. А. Поспелова стало создание междисциплинарной, открытой научной среды, связанной с интенсивным формированием и свободным обменом идеями в процессе взаимодействия между различными научными, учебными, производственными, бизнес-структурами. В мае 1989 г. именно Дмитрий Александрович стал главным инициатором объединения ученых и специалистов по искусственному интеллекту в официальное сообщество, названное Ассоциацией искусственного интеллекта. На учредительном съезде в городе Коломна он был избран первым президентом Ассоциации и многие годы руководил ее деятельностью.

А. В. Колесников[1], В. Б. Тарасов[2]
[1]БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия
[2]МГТУ им. Баумана, Москва, Россия
e-mail: [1]avkolesnikov@yandex.ru, [2]vbulbov@yandex.ru

ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПОСПЕЛОВ: ОТ ИДЕЙ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И СЕМИОТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ГИБРИДНЫМ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ СИСТЕМАМ

Введение

30 октября 2019 г. после тяжелой и продолжительной болезни на 87-м году ушел из жизни выдающийся ученый, основоположник искусственного интеллекта в нашей стране, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии естественных наук, «отец-основатель» и первый президент Советской (впоследствии Российской) ассоциации искусственного интеллекта **Дмитрий Александрович Поспелов**. С 2012 г. его фамилия неразрывно связана с названием нашей конференции.

Дмитрий Поспелов родился 19 декабря 1932 г. в Москве. В 1956 г. окончил механико-математический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова по специальности «Вычислительная математика» и был распределен в Московский энергетический институт (МЭИ) на кафедру вычислительной техники (ВТ). Уже в первые годы работы в МЭИ на кафедре ВТ, наряду с преподаватель-

© Колесников А. В., Тарасов В. Б., 2020

ской деятельностью, Д. А. Поспелов активно занимался научными исследованиями по теории вычислительных систем, теории автоматов, теории игр, многозначным логикам. Особое место в этом ряду принадлежит его ранним работам по созданию ситуационного управления.

Идеи ситуационного управления [1—4] были предложены в СССР и обсуждались еще на научном семинаре по психонике [5], который работал в МЭИ на протяжении почти 7 лет с 1964 по 1970 г. Руководителем и душой этого междисциплинарного семинара, в работе которого принимали участие математики, кибернетики, психологи, был тогда еще молодой ученый Д. А. Поспелов. На заседаниях, проходивших в 1966—1968 гг., сформировались ключевые задачи, подходы и методы, составившие основу ситуационного управления большими системами.

1. Ситуационное управление и семиотическое моделирование

Классическая теория автоматического управления исходила из положения о том, что любой объект управления может быть формально описан в виде достаточно простой математической модели. В качестве такой модели можно использовать различного рода дифференциальные уравнения. В более сложных случаях модель может представлять собой систему интегро-дифференциальных уравнений или смешанную систему, в которую наряду с дифференциальными уравнениями входили алгебраические или трансцендентные уравнения, связывающие между собой отдельные параметры, описывающие структуру или функционирование объекта. Однако какова бы ни была модель объекта управления, всегда предполагалось, что она может быть описана на языке математики. Формализация такого типа считалась необходимым условием поиска способа управления объектом, а возможность подобной формализации всегда постулировалась.

В теории сложных (больших) систем управления, таких как транснациональные предприятия, отрасли, системы городского хозяйства, аэропорты, и т. п. это предположение не выполняется. Это означает, что и сами методы поиска управления должны быть иными.

Невозможность полной формализации объекта управления — первая особенность систем, которые обычно называют большими. Известный советский кибернетик М. М. Бонгард говорил, что большие системы — это такие системы, полное формальное описание которых невозможно, да и не нужно. Последнее вытекает из того, что если бы такое описание было найдено существующими средствами, то оказалось бы настолько сложным и громоздким, что не дало бы никакого эффекта для управления системой.

Вторая особенность больших систем — непостоянство структуры и функционирования самого объекта управления. С течением времени в нем происходят весьма существенные изменения, он «живет» и развивается. Эти изменения нельзя заранее предусмотреть в модели объекта. Поэтому метод управ-

ления должен быть весьма гибким. Ярким примером такого развития объекта управления служат мировая телефонная сеть, а в последние годы — сеть Интернет.

Третья особенность больших систем — многокритериальность управления и нечеткое задание самих критериев целесообразности. В классической теории оптимального управления всегда предполагается, что не только объект управления описан математически, но и критерий управления задан таким образом, что на его основе с помощью математической модели объекта управления удается построить оптимальное управление. Когда же мы переходим к управлению такими сложными объектами, как отрасли народного хозяйства, высшие учебные заведения, система здравоохранения, то убеждаемся не только в многокритериальности задачи управления, но и в том, что сами эти критерии не могут быть точно сформулированы. Управление при наличии нечетко сформулированных критериев весьма характерно для всех систем, относимых к классу больших.

Наконец, четвертая особенность большинства систем этого класса — наличие в них людей, обладающих свободой действий в рамках функционирования системы. Это обстоятельство еще более усложняет процесс управления и резко уменьшает надежду на полную формализацию описания функционирования объекта управления.

В статье [1] Д. А. Поспелов сформулировал следующие принципы организации и работы систем семиотического управления.

1. Модель объекта управления и протекающих в нем процессов — семиотическая и строится на основе текстов, выраженных на естественном языке. Модель описания ситуаций также семиотическая, базирующаяся на естественном языке.

2. Формирование модели объекта управления и протекающих в нем процессов происходит либо путем ее создания специалистом-человеком до ввода в компьютер, либо на основе анализа поведения объекта в различных ситуациях, проводимого с помощью компьютера. В последнем случае в нем должны быть заложены специальные механизмы для осуществления такого анализа.

3. Модель управления объектом строится на основе обучения, проводимого либо специалистом-человеком, либо на основе опыта, накапливаемого компьютером в процессе работы с объектом. В последнем случае в компьютер необходимо заранее ввести цель управления и способы оценки эффективности тех или иных принятых решений по управлению. Суть модели управления объектом состоит в том, что на основе исходной микромодели описания объекта и обучения строится макромодель описания объекта и протекающих в нем процессов, которая однозначно определяет необходимые решения по управлению.

4. Для построения модели требуются специальные механизмы обобщения, которые трансформируют исходную модель в макромодель.

В 1967 г. под руководством Д.А. Поспелова его аспиранты Ю.И. Клыков [6] и Ж.И. Железов [7] защитили в МЭИ первые диссертации в области ситуационного управления. Так, Ю.И. Клыков, опираясь на язык RX-кодов, создал специальный модельный язык, названный языком синтагматических цепей, который долгие годы был основным языком описания ситуаций и принятия решений в ситуационном управлении. В работе Ж.И. Железова развита теория дискретных ситуационных сетей, послужившая удобной моделью различных сложных объектов управления.

Работы по ситуационному управлению в Калининграде также начались еще в 1960-е гг. Один из авторов этих строк в 1969 г., будучи студентом-выпускником Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства (КТИРПиХ), писал под руководством канд. техн. наук, доцента кафедры автоматизации производственных процессов В.Ф. Пономарева дипломный проект на тему «Математическое моделирование Калининградского морского рыбного порта. Алгоритмизация “внешней среды” и порта как объекта управления». Мы работали вместе с Ю.Я. Настиным, который тогда занимался кандидатской диссертацией по транспортной тематике и был знаком с Л.С. Загадской (Болотовой) из Одесского технологического института (ОТИ).

В 1970 г. Л.С. Загадская защитила диссертацию, в которой метод ситуационного управления послужил основой для создания экспериментальной программной системы для управления грузовыми операциями в морском торговом порту Одессы. Она и пригласила молодого выпускника КТИРПиХ на семинар «Семиотические методы управления в больших системах», организованный в Московском доме научно-технической пропаганды в 1971 г. (руководители — Л.Т. Кузин и Д.А. Поспелов) [8]. Запомнился полный зал участников, в Президиуме — Л.Т. Кузин, Д.А. Поспелов, Л.С. Загадская и Ю.И. Клыков, с которым Александр Колесников познакомился раньше, съездив в командировку в Москву. Именно на этом семинаре был введен в широкий научный обиход термин «ситуационное управление», а А.В. Колесников впервые увидел Д.А. Поспелова. В тот момент, когда автор этих строк задавал вопрос очередному докладчику, он встретился глазами с Дмитрием Александровичем, которому что-то оживленно шептал «на ушко» Ю.И. Клыков. Позже, при личной встрече Юрий Иванович признался, что в этот момент рассказывал о работе по ситуационному управлению в Калининграде. В результате через несколько лет группа калининградских ученых присоединились к проекту «Ситуация» Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР.

В 1970-е гг. начали складываться территориальные школы в области теории и приложений ситуационного управления. В Одессе школу возглавляла Л.С. Загадская (Ю.И. Килимник, Т.К. Соколова, А.П. Ромашкевич, В.Ф. Хорошевский, В.С. Лозовский), в Грозном — Л.А. Афонин (В.Я. Жолондзь, Т.К. Смирнова, СПКБ «Нефтегазпромавтоматика»), в Калининграде — В.Ф. Пономарев (А.В. Колесников, В.Г. Пожидаев, Л.М. Лукьянова, В.Н. Тимофеев,

А.И. Щетинин, О.М. Сулева, И.А. Кириков, В.И. Историна, В.Ф. Пилюгина, И.Д. Рудинский). Несколько позже появились группы специалистов по ситуационному управлению и в других городах: Риге (под руководством Я.А. Гельдфандбейна), Ижевске (под руководством А.Ю. Левиатова), Баку (под руководством Р.Э. Гаджиева).

В том же 1971 г. было принято решение о проведении всесоюзных симпозиумов по ситуационному управлению большими системами. Первый такой симпозиум состоялся в Одессе в 1972 г. [9]. После этого Одесса почти на 10 лет стала «столицей» мероприятий по ситуационному управлению [10—13]. Последний, шестой, симпозиум состоялся в 1981 г.

Д.А. Поспелов с участниками III Всесоюзного симпозиума
по ситуационному управлению большими системами
(Одесса, 12—15 сентября 1974 г.)

С момента создания кафедры систем управления и вычислительной техники (заведующий кафедрой В.Ф. Пономарев) А.В. Колесников вместе с В.Г. Пожидаевым учились в аспирантуре и участвовали в хоздоговорной теме «Информационное, математическое и техническое обеспечение АСУ и АСУТП предприятий рыбной промышленности» с Калининградским филиалом ЦПКТБ ВРПО «Запрыба». Первый занимался разработкой языка описа-

ния статических отношений и применением методов ситуационного управления в управлении дислокационными операциями с судами флота рыбной промышленности в рыбной и индустриальной гаванях Калининградского морского рыбного порта, а второй решал задачу обеспечения погрузо-разгрузочных операций в грузовом районе порта нарядами на отгрузку рыбной продукции. С нами работали программисты В. И. Историна и В. Ф. Пилюгина.

Представители калининградской школы ситуационного управления всегда активно контактировали с другими школами. Так, в июне 1972 г. А. В. Колесников и В. И. Историна ездили на консультации к В. Я. Жолондзю в Грозный. Сразу после этого был перелет в Одессу для участия в первом Всесоюзном симпозиуме по ситуационному управлению большими системами. Проходил он на теплоходе «Башкирия» во время круиза по Черному морю. На нем были представлены два доклада от калининградской школы ситуационного управления: «Применение ситуационного метода в диспетчерском управлении морским рыбным портом» и «Классификация понятий модели описания статических отношений морского рыбного порта» [9]. Второй симпозиум прошел на теплоходе «Армения», а последующие — в спортивно-оздоровительном лагере ОТИ в Черноморке под Одессой.

Ситуационное управление и семиотическое моделирование были тесно связаны с историей искусственного интеллекта в СССР. Профессор Дмитрий Александрович Поспелов стоял у истоков организации первых академических структур по ИИ. Переход Д. А. Поспелова из МЭИ в Вычислительный центр АН СССР привел к возникновению «дуэта Поспеловых», ставшего ключевым фактором формирования искусственного интеллекта в Советском Союзе. В 2019 г. исполнилось 45 лет со дня (точнее, двух дней) официального признания ИИ в СССР.

В этом деле выдающуюся организационную роль сыграл академик Гермоген Сергеевич Поспелов. Будучи главным инициатором и убежденным сторонником развития ИИ в СССР, он посвятил почти два десятилетия своей жизни тому, чтобы отечественные исследования в области ИИ получили признание Академии наук СССР и вышли на мировой уровень [14]. Его верным соратником, а в дальнейшем «главным локомотивом» советского и российского ИИ стал Дмитрий Александрович Поспелов.

В январе 1974 г. был образован Совет по проблеме «Искусственный интеллект» в рамках Комитета по системному анализу Президиума АН СССР. Председателем совета стал Г. С. Поспелов, а его заместителем — Д. А. Поспелов. Затем в декабре того же 1974 г. в рамках Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР создана Секция по проблеме «Искусственный интеллект», во главе которой также оказался «дуэт» Поспеловых. С формирования двух указанных организационных структур в системе Академии наук началась официальная история развития ИИ в СССР.

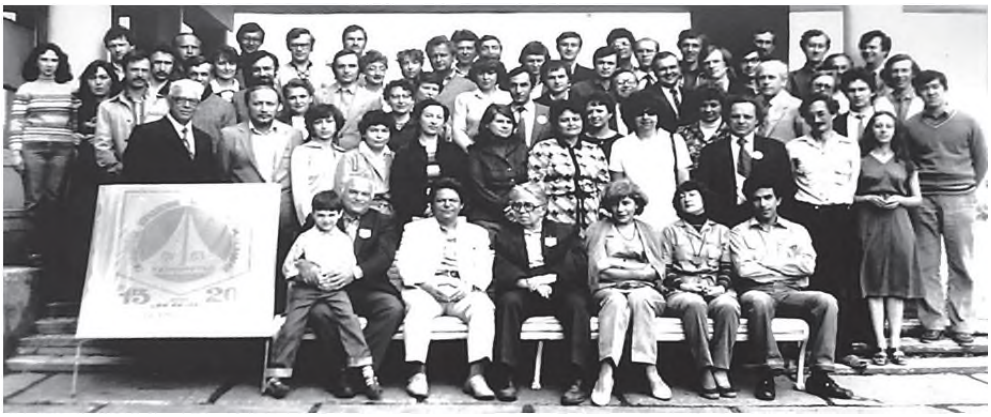
«Дуэт» Поспеловых с участниками 2-го Международного совещания
по искусственному интеллекту (Ленинград, 1980 г.)

В результате появились первые отечественные комплексные проекты, охватывавшие наиболее интересные области исследований по созданию прикладных интеллектуальных систем и автономных роботов: уже упомянутый проект «Ситуация», в рамках которого концентрировались все работы по ситуационному управлению; проект «Диалог», с которого начались отечественные междисциплинарные исследования в области обработки естественного языка; проект «Конструктор», посвященный разработке интеллектуальных систем поддержки начальных стадий проектирования технических объектов и устройств, проект «Интеллект робота» и др.

К 1975 г. методология ситуационного управления в своей основе уже сформировалась, появилась устойчивая, общепринятая терминология, создан комплекс базовых методов и процедур. Начиная с этого года коллективы, в которых использовался новый подход, стали переходить от экспериментальных систем и модельных задач к построению реальных комплексов, базирующихся на идеях ситуационного управления. Так родилась идея проведения совещаний, посвященных координации усилий в области технологий ситуационного управления. Всего проведено пять таких совещаний: Грозный (1975), Ижевск — Сарапул (1977), Калининград — Светлогорск (1979), Куйбышев (ныне Самара) (1981), Каунас (1982).

В конце 1970-х — начале 1980-х гг. в Светлогорске Калининградской области были проведены два научных мероприятия по ситуационному управлению. В мае 1979 г. в конференц-зале горисполкома прошло третье Совещание

по проекту «Ситуация», а с 15 по 20 мая 1983 г. состоялась конференция по ситуационному управлению большими системами. Сохранилась общая фотография ее участников.



Участники конференции по ситуационному управлению большими системами, Светлогорск, май 1983 г. В первом ряду слева направо: Я. А. Гельдфандбейн с внуком, Д. А. Поспелов, М. Г. Гаазе-Раппопорт, Е. Т. Семенова, Л. Ф. Поспелова, А. Ю. Левиатов; во втором ряду (стоят за Д. А. Поспеловым): Т. А. Гаврилова, Л. М. Лукьянова, З. Б. Рахманова, в верхних рядах — А. Е. Янковская, †Г. С. Осипов, И. Б. Арефьев, В. Е. Иванов, А. В. Колесников. А. Ф. Стеценко, С. М. Ефимова, И. Д. Рудинский, И. А. Кириков, Ю. Я. Настин, и др.

В этот же период времени у А. В. Колесникова с В. Г. Пожидаевым выработалась концепция, получившая условное наименование «Автоматизированное обучение семиотических моделей» (САОС) применительно к ситуационному управлению. «Зоны влияния» в рамках этой концепции были поделены так: Александр Колесников взял на себя разработку «языка описания состояния системы» (САОС I), а Владимир Пожидаев — «языка обобщенного описания ситуаций» (классификатора) (САОС II). Далее постепенно, шаг за шагом, стал развиваться общий подход к ситуационному управлению с единых позиций семиотического моделирования и управления. В итоге в январе 1979 г. в Северо-Западном политехническом институте (Ленинград) была успешно защищена кандидатская диссертация А. В. Колесникова «Исследование и разработка языка описания состояния транспортных систем (на примере морского рыбного порта)». Первым оппонентом был Д. А. Поспелов, а вторым — И. Б. Арефьев. Работы велись в системе программирования на языке РЕФАЛ для ЭВМ «Минск-32».

В 1983—1986 гг. появились первые совместные работы А. В. Колесникова с Я. А. Гельфандбейном и И. Д. Рудинским по созданию многомодельной семиотической системы для решения задачи планирования погрузо-разгрузочных работ в морском рыбном порту [13; 15]. Полученные результаты вы-

соко оценил Д. А. Поспелов, отметивший, что они опередили мировой уровень данного направления ИИ на 10 лет. Эти работы послужили отправной точкой для дальнейших исследований по гибридным интеллектуальным системам.

Начиная с 1980-х гг. уже практически невозможно отделить собственно ситуационное управление от развития семиотического управления, органично включившего в себя своего исторического предшественника [13].

Обычно под семиотикой понимают гуманитарную, описательную науку о знаковых системах. При этом считается, что семиотика — удел лингвистов. Высокий потенциал Д. А. Поспелова в сфере междисциплинарного синтеза проявился при создании логико-лингвистических моделей, в которых логические средства применяются для преобразования данных, описанных в лингвистической форме. В результате им были разработаны основы *прикладной семиотики* — новой синтетической научной дисциплины, изучающей вопросы применения знаков и знаковых систем в системах представления, обработки и использования знаний при решении различных практических задач.

Хотя официально этот термин появился лишь в 1995 г. в ходе дискуссий на российско-американских семинарах «Российское ситуационное управление и кибернетика» и «Архитектуры для семиотического моделирования и ситуационный анализ в больших сложных системах» [16] (см. также [17; 18]), первая фундаментальная работа Д. А. Поспелова по *прикладной семиотике* датируется 1970-м г. [19]. В ее начале, аргументируя необходимость применения семиотических моделей в ИИ, он писал, что все технические устройства работают на досемиотическом уровне, поэтому они способны моделировать лишь простейшие формы поведения и имеют существенные ограничения в плане решения творческих задач. В отличие от технических систем высшие животные и человек решают подобные задачи на семиотическом уровне, что позволяет им находить такие способы решения, которые нельзя реализовать на досемиотическом уровне.

При этом в [19] знак трактовался как единство сигнала и его значения, а знаковая система понималась как совокупность простых знаков и правил образования сложных знаков из совокупности простых.

Структура знаковой системы в некотором смысле изоморфна системе отношений между объектами реального мира. Такую систему знаков можно назвать системой знаков первого уровня (или псевдофизической семиотической системой).

Но кроме знаков, значениями которых выступают предметы или явления реального (или модельного) мира, можно рассматривать знаки знаков (метазнаки), значениями которых служат знаки семиотической системы первого уровня. Такую систему следует отнести к знаковой системе второго уровня. Путем индукции нетрудно ввести системы знаков любого k-го уровня.

Иерархия знаковых систем имеется у человека (например, система знаков естественного языка служит для знаковой системы математики системой нижнего, предшествующего уровня).

Там же в [19] Д.А. Поспелов выдвинул следующую гипотезу: условие синтеза технических устройств, способных к решению творческих задач, — формирование внутри такого устройства системы знаковых систем. По сути, эта статья стала «манифестом будущей семиотической революции» в ИИ.

2. От нечетких моделей в ситуационном управлении и искусственном интеллекте к гибридным и синергетическим интеллектуальным системам

Еще в 1970-е гг. у Д.А. Поспелова возникла идея *псевдофизических логик* (ПФЛ) [20—22], которые призваны отражать восприятие естественным и/или искусственным агентом закономерностей внешней физической среды. Особенность ПФЛ — наличие нечетких шкал, на которые проецируются объекты [20]. Примерами ПФЛ выступают временные и пространственные логики, логики действий, оценок и т.п. [22; 23].

Этот класс логических систем имеет следующие особенности:

1. В качестве пропозициональных переменных используются лингвистические переменные (ЛП) с термами, представленными нечеткими множествами. Например, в частотной логике И.В. Ежковой и Д.А. Поспелова [13] в качестве ЛП берется «Частота события» с терм-множеством {никогда, чрезвычайно редко, редко, ни часто, ни редко, часто, очень часто, почти всегда, всегда} и базовыми значениями числового универсального множества {0,1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1}.

2. На множестве значений для всех переменных имеются порядковые шкалы с отношением строгого порядка. Точнее, для ЛП существуют порядковые шкалы, а для числовых переменных — метрические.

3. Выводы в ПФЛ учитывают порядковые и метрические шкалы, а также расположение событий на них.

Появление нечетких классов в ситуационном управлении, а также использование лингвистических и нечетких переменных в ПФЛ предопределили живой интерес Дмитрия Александровича к теории нечетких множеств и ее приложениям. Здесь «первой ласточкой» стал рижский семинар «Применение теории нечетких множеств в задачах управления сложными системами», проведенный в июле 1977 г. Затем в июле 1978 г. состоялся второй рижский семинар с тем же названием, а в июле 1979 г. был организован третий рижский семинар «Проблемы разработки и применения теории нечетких множеств в системах искусственного интеллекта и управления». Пожалуй, именно с этих семинаров началось плодотворное сотрудничество специалистов в области ситуационного управления и искусственного интеллекта, представлявших школу Д.А. Поспелова, с рижскими коллегами, занимавшимися вопросами теории нечетких множеств и ее приложений, а особенно, с группой А.Н. Борисова. В 1984 г. в Риге прошла межреспубликанская научная конференция «Модели выбора альтернатив в нечеткой среде» [24]. Центр тяжести отечественных исследований в области приложений нечетких множеств и систем постепенно сместился в область принятия решений, управления и искусственного интеллекта.

Еще одной значимой вехой научно-организационной деятельности Д. А. Поспелова в области теории и приложений нечетких множеств в СССР стала организация в конце 1970-х — начале 1980-х гг. под эгидой Научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова всесоюзных научно-технических семинаров «Управление при наличии расплывчатых категорий» (руководители — Д. А. Поспелов и Д. И. Шапиро). Шесть семинаров с этим названием прошли с 1978 по 1983 г. в Риге, Ижевске, Фрунзе (ныне Бишкек) и трижды в Перми. Пожалуй, самый запоминающийся семинар состоялся в 1981 г. в Киргизии, где было представлено 42 доклада [25]. Основная часть семинара проходила на берегу озера Иссык-Куль, что весьма способствовало неформальному обмену мнениями и завязыванию новых контактов. Именно вокруг этих семинаров сложился авторский коллектив монографии «Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта» [26], а впоследствии подготовлен специальный выпуск международного журнала «Fuzzy Sets and Systems» — «Fuzzy Set Theory in the USSR» [27].

С начала 1990-х гг. гибридные модели в искусственном интеллекте обрели широкую популярность во всем мире. Ряд ключевых тенденций развития гибридных интеллектуальных систем описан в работах Д. А. Поспелова. Так, в [28] он указывает, что поиск новых средств представления знаний должен привести к сращиванию обработки текстовой и зрительной информации в интеллектуальных системах, появлению интегрированных систем, в которых одновременно сосуществует и обрабатывается информация различных модальностей (символическая и образная, текстовая и графическая, зрительная и акустическая, тактильная и обонятельная и т. д.). Такие гибридные системы могут куда эффективнее решать интеллектуальные задачи, чем моносистемы, ориентированные лишь на один тип информации.

Понятие гибридной экспертной системы охватывает средства обработки символьной (логической), численной и графической информации, включая расчетно-моделирующие и графические пакеты прикладных программ. В [29] Д. А. Поспеловым была предложена общая архитектура гибридной интеллектуальной системы управления, в которой наряду с экспертной системой имеется интеллектуальный интерфейс, вычислитель, симулятор (блок имитационного моделирования). Там же указано, что обычные гибриды в ИИ основаны на «жестких» вычислениях, и отмечены большие перспективы «мягких вычислений», опирающихся на синтез идей нечеткой математики и технологии формирования логико-трансформационных правил с помощью нейронных сетей.

Наконец, в [30] родоначальник ИИ в СССР и России подчеркивает необходимость сплава алгебраического и геометрического подходов, синергии моделей образного и символьно-логического мышления при создании высокоэффективных прикладных интеллектуальных систем.

Слово «синергия» означает «совместное действие», «сотрудничество». По мнению «отца синергетики» Г. Хакена, название «синергетика» хорошо подходит для обозначения теории открытых, сложных самоорганизующихся систем по двум причинам: а) исследуются совместные действия многих элемен-

тов (агентов) самоорганизующейся и развивающейся системы; б) для отыскания общих принципов самоорганизации требуется объединение усилий представителей разных научных дисциплин. Это обоснование синергетики полностью соответствует научному мировоззрению профессора Д. А. Поспелова, его работе на «стыке» разных областей.

Идеи синергии, междисциплинарного сотрудничества лежали в основе научных свершений профессора Д. А. Поспелова, пронизывали всю его творческую жизнь, начиная с организованного им семинара по психонике в МЭИ. В заключительной части своей книги «Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту» Дмитрий Александрович выдвинул цель будущих исследований в области искусственного интеллекта. Эти исследования должны быть направлены на «*изучение психики человека* для ее имитации в технических системах, решающих определенный набор практических задач, обычно считающихся интеллектуальными» [31, с. 211].

Такая формулировка объекта искусственного интеллекта чрезвычайно широкая и намного опередила свое время. Сегодня она возрождается и становится особенно актуальной в контексте появления за рубежом таких направлений ИИ, как «искусственный общий интеллект» (Artificial General Intelligence) и «сильный ИИ» (Strong AI). В самом деле, термин «психика» охватывает как сознание, так и бессознательное, а сознание означает синергию познания, эмоций, воли. Работы в области открытого, целостного, самоорганизующегося ИИ только начинаются.

Сборник материалов V Всероссийской Поспеловской конференции ГИСИС-2020 посвящается светлой памяти выдающегося ученого, профессора, академика РАЕН Дмитрия Александровича Поспелова — основоположника искусственного интеллекта в СССР и России.

Список литературы

1. *Поспелов Д. А.* Принципы ситуационного управления // Известия АН СССР: Техническая кибернетика. 1971. № 2. С. 10—17.

2. *Клыков Ю. И.* Ситуационное управление большими системами. М. : Энергия, 1974.

3. *Поспелов Д. А.* Большие системы. Ситуационное управление. М. : Знание, 1975.

4. *Поспелов Д. А.* Исторический очерк развития ситуационного управления // Ситуационное управление: теория и практика. М. : Наука, 1986. С. 254—258.

5. *Поспелов Д. А.* Семинар по психонике // Новости искусственного интеллекта. 1991. № 1. С. 31—36.

6. *Клыков Ю. И.* Модельный метод управления динамическими ситуационными системами : автореф. дис. … канд. техн. наук. М. : МЭИ, 1967.

7. *Железов Ж. И.* Дискретные ситуационные сети и некоторые вопросы управления на них : автореф. дис. … канд. техн. наук. М. : МЭИ, 1967.

8. *Семиотические* методы управления в больших системах. М. : Моск. дом науч.-техн. пропаганды, 1971.

9. *Вопросы* кибернетики. Вып. 13: Ситуационное управление: Теория и практика. Ч. 1. М. : НСКП «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, 1974.

10. *Вопросы* кибернетики. Вып. 14: Ситуационное управление: Теория и практика. Ч. 2. М. : НСКП «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, 1975.

11. *Вопросы* кибернетики. Вып. 18: Теория и практика ситуационного управления. М. : НСКП «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, 1977.

12. *Вопросы* кибернетики. Вып. 68: Ситуационное управление. Теория и практика. М. : НСКП «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, 1980.

13. *Вопросы* кибернетики. Вып. 100: Ситуационное управление и семиотическое моделирование. М. : НСКП «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, 1983.

14. *Поспелов Д.А.* Новые информационные технологии — это те ключи, которые откроют нам путь в новое общество // Новости искусственного интеллекта. 1994. №2. С. 57—76.

15. *Гельфандбейн Я.А., Колесников А.В., Рудинский И.Д.* Гибридное моделирование транспортного узла и его применение в процедурах выбора решений // Методы и системы принятия решений. Информационное и алгоритмическое обеспечение принятия решений. Рига : РПИ, 1984. С. 93—100.

16. *Pospelov D.A., Ehrlich A.I., Osipov G.S.* Semiotic Modeling and Situation Control // Proceedings of 1995 ISIC Workshop on Architectures for Semiotic Modeling and Situation Analysis in Large Complex Systems (Monterey CA, USA, August 1995). P. 127—129.

17. *Поспелов Д.А.* Прикладная семиотика и искусственный интеллект // Программные продукты и системы. 1996. №3. С. 10—13.

18. *Поспелов Д.А., Осипов Г.С.* Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. 1999. №1. С. 9—35.

19. *Поспелов Д.А.* Системный подход к моделированию мыслительной деятельности // Проблемы методологии системного исследования. М. : Мысль, 1970. С. 338—358.

20. *Ежкова И.В., Поспелов Д.А.* Принятие решений при нечетких основаниях. I. Универсальная шкала // Известия АН СССР: Техническая кибернетика. 1977. №6. С. 3—11.

21. *Толковый* словарь по искусственному интеллекту / А.Н. Аверкин, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов (ред.-сост.). М. : Радио и связь, 1992. С. 45—46.

22. *Поспелов Д.А.* Псевдофизические логики в системах искусственного интеллекта // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций : труды 3-й международной конференции (Москва, 27—31 октября 2003 г.). М. : ИПУ РАН, 2003. С. 127—134.

23. *Кандрашина Е.Ю. Литвинцева Л.В., Поспелов Д.А.* Представление знаний о пространстве и времени в системах искусственного интеллекта. М. : Наука, 1988.

24. *Модели* выбора альтернатив в нечеткой среде. Рига : РПИ, 1984.

25. *Управление* при наличии расплывчатых категорий. Фрунзе : Илим, 1981.

26. *Нечеткие* множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М. : Наука, 1986.

27. *Pospelov D.A.* Fuzzy Reasoning in Pseudo-Physical Logics // Fuzzy Sets and Systems. 1987. Vol. 1—2. P. 115—120.

28. *Поспелов Д.А.* Как же будут развиваться системы искусственного интеллекта? // Будущее искусственного интеллекта. М. : Наука, 1991.

29. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: новый виток развития // Известия РАН: Теория и системы управления. 1995. №5. С. 152—159.

30. *Поспелов Д.А.* Метафора, образ и символ в познании мира // Новости искусственного интеллекта. 1998. №1. С. 94—114.

31. *Поспелов Д.А.* Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту. М. : Наука, 1982.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Два события, произошедшие в период подготовки ГИСИС`2020 и издания сборника материалов конференции, отразились в содержании докладов и повлияли на решение программного и организационного комитетов о ее переносе на последнюю неделю мая 2021 г.

Первое, печальное известие, пришло к нам в Калининград первого ноября 2019 г. от Екатерины Бостановой, помощника президента Российской ассоциации искусственного интеллекта, о том, что 30 октября 2019 г. в 19 часов 15 минут ушел из жизни всеми нами любимый Дмитрий Александрович Поспелов, чье имя уже восемь лет присутствует в названии нашей конференции. В этой связи внесены изменения в текст биографической информации о Д. А. Поспелове, по традиции открывающей сборник материалов конференции, в сборник включен доклад о Дмитрие Александровиче, и я посвятил пленарный доклад его светлой памяти.

Второе событие, угрожающее здоровью и жизни участников конференции, эпидемиологическая обстановка, сложившаяся весной этого года в стране в целом и Калининградской области в частности. Поэтому мы сочли нецелесообразным проводить конференцию дистанционно и решили организовать ее в том же месте, гостинице «Самбия», в Зеленоградске в указанные выше сроки. Что касается сборника материалов, то он будет издан в текущем году.

Третье печальное известие пришло к нам в июле: 7 июля 2020 г. на 72-м году жизни скоропостижно скончался заведующий отделением искусственного интеллекта и принятия решений ФИЦ «Информатика и управление» РАН, президент Российской ассоциации искусственного интеллекта, д-р физ.-мат. наук, профессор Геннадий Семенович Осипов. Светлая ему память.

Предлагаемый Вашему вниманию сборник материалов составлен из докладов участников V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» (ГИСИС’2020). В него включены 4 пленарных доклада членов программного комитета, 13 докладов по секции 1 «Методы и модели гибридных и интегрированных интеллектуальных систем», 20 докладов по секции 2 «Интеллектуальные системы в науке, образовании, медицине, экономике и промышленности», 14 докладов по секции 3 «Многоагентные системы, синергетический и роевой искусственный интеллект, распознавание образов, интеллектуальная робототехника» и восемь докладов по секции 4 «Нечеткие модели, онтологии, мягкие и интеллектуальные вычисления». Участвуют в работе конференции 110 докладчиков из 22 городов России, Узбекистана и Белоруссии.

От имени программного комитета желаю участникам конференции плодотворного обмена мнениями, новых и интересных результатов.

А. В. Колесников,
председатель программного комитета,
д-р техн. наук, проф.,
проф. Института физико-математических наук
и информационных технологий БФУ им. И. Канта

А. П. Еремеев[1], А. Е. Герасимова[2]
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
e-mail: [1]eremeev@appmat.ru, [2]gerasimova.al96@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В РАМКАХ «ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ»

Введение

В плане перехода России к цифровой экономике большая роль отводится развитию и повышению эффективности электроэнергетического комплекса страны, перехода к «цифровой знергетике» с активным применением методов и технологий искусственного интеллекта [1; 2]. Как отмечают Д. В. Холкин и И.С Чаусов, «цифровая энергетика, не просто новый технологический пакет, модернизирующий энергетику без изменения ее устройства, а сплав новых технологий, новых моделей, новых моделей взаимодействия и новых форм сознания» [1, с. 75]. Подчеркивается необходимость развития программно-аппаратных средств интеллектуального управления и межмашинного взаимодействия (технологии интеллектуальной поддержки оперативно-диспетчерского персонала, Smart Grid, и т. д.). Большая роль при этом отводится интеллектуальным системам поддержки принятия решений реального времени (ИСППР РВ), предназначенных для помощи оперативно-диспетчерскому персоналу (далее — ЛПР — лицо или группа лиц, принимающих решения) при мониторинге и управлении сложными техническими (технологическим) и организационными объектами в условиях достаточно жестких временных ограничений [3; 4]. ИСППР РВ помогают ЛПР обнаруживать, классифицировать сложные проблемные (нештатные, аварийные) ситуации и находить решения по нормализации таких ситуаций.

Исследования и разработки методов, моделей и инструментальных программных средств конструирования перспективных ИСППР, включая наиболее сложные ИСППР РВ, с применением концепций прикладной семиотики (семиотических систем), распределенного искусственного интеллекта и управляемой событиями архитектуры (Event-driven architecture, EDA) проводятся в НИУ «МЭИ», в частности на кафедре прикладной математики (с 30.12.2019 г. — кафедре прикладной математики и искусственного интеллекта) [3; 5].

В работе [3] предложена базовая архитектура ИСППР РВ (как системы поддержки оператора) для оперативного персонала энергоблока АЭС, разработанная на основе интеграции указанных концепций (рис. 1).

© Еремеев А. П., Герасимова А. Е., 2020

Поскольку, как отмечено ранее, принятие решений в нештатных и особенно критических ситуациях происходит в условиях сильного дефицита времени, то чрезвычайно важна роль такого компонента ИСППР РВ, как «Прогноз развития аномальных ситуаций», который дает дополнительную информацию ЛПР о возможных последствиях рекомендуемого системой решения (или решений) по нормализации ситуации и перевода объекта в штатный режим функционирования. При этом весьма перспективна интеграция методов обучения с подкреплением с учетом темпоральных зависимостей и гибких (any-time) алгоритмов поиска решения [3; 6—8].

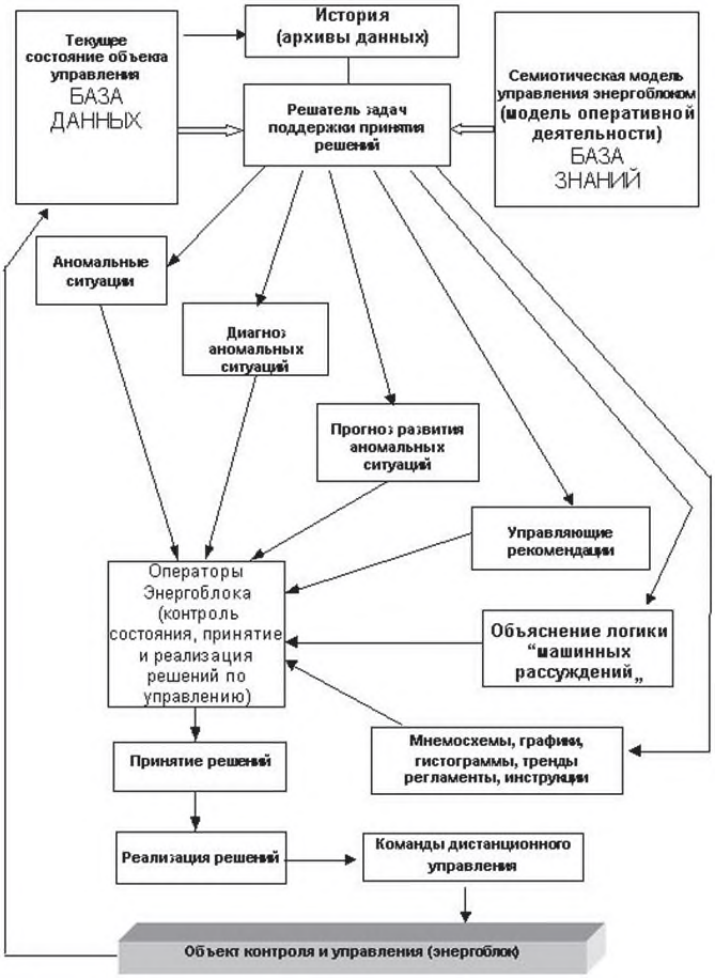


Рис. 1. Базовая архитектура ИСППР РВ энергоблока АЭС

Далее остановимся на исследовании и реализации алгоритмов обучения с подкреплением (reinforcement learning, RL) на основе метода темпоральных

различий (temporal differences, TD) как эффективного метода для применения в ИСППР РВ, что подтверждено данными компьютерного моделирования, приведенными в [9] и в этой работе.

Анализ методов обучения с подкреплением на основе темпоральных различий для ИСППР РВ

RL-обучение на основе TD-методов [6; 10] достаточно широко применяется в современных интеллектуальных системах. Эти методы основываются на опыте, получаемом непосредственно без наличия предварительных данных о модели внешней среды. При этом TD-методы обновляют расчетные оценки прежде, чем будет получен окончательный результат, основываясь на других полученных оценках.

Задача обучения с подкреплением — развитие задачи обучения на основе взаимодействия для достижения поставленной цели. Агент — обучающееся и принимающее решение лицо (ЛПР). Множество объектов, находящихся вне агента и с которыми агент взаимодействует в процессе решения задачи, называется окружающей средой. Схема взаимодействия агента со средой изображена на рисунке 2.

Рис. 2. Схема взаимодействия агента со средой

Взаимодействие агента со средой происходит следующим образом: агент, находясь в момент времени t в состоянии $s_t \in S$ (где S — множество возможных состояний), совершает действие $a_t \in A(s_t)$ (где $A(s_t)$ — множество возможных действий в состоянии s_t), переходя из состояния s_t в s_{t+1}. Среда, реагируя на действия агента, изменяется соответствующим образом. За совершение действий агент получает *вознаграждения* $r_{t+1} \in R$.

Агенту требуется максимизировать ожидаемую выгоду, где выгода R_t задается как функция, определенная на последовательности вознаграждений. В простейшем случае выгода представляет собой сумму вознаграждений:

$$R_t = r_{t+1} + r_{t+2} + r_{t+3} + \cdots + r_T,$$

где T — *завершающий временной шаг*. Такой подход целесообразен, когда взаимодействие агента и среды можно разбить на подпоследовательности — *эпизоды*. Каждый эпизод заканчивается *терминальным состоянием*.

В основе RL-алгоритмов лежат *оценочные функции* — функции состояний, позволяющих оценить выгоду, которую получит агент за нахождение в текущем состоянии. Вознаграждения, которые агент ожидает получить в будущем, зависят от будущих действий, поэтому функции ценности определяются с учетом конкретной стратегии.

Стратегия π выявляет соответствие каждого состояния *s* и действия *a* вероятности $\pi(s,a)$, с которой действие *a* будет осуществлено в состоянии *s*. Для TD-методов в качестве оценочной функции используется *функция ценности действия* $Q^{\pi}(s,a)$ *в состоянии s*. Ожидаемая выгода при начальном состоянии *s* и осуществленном действии *a*, со стратегией π равна:

$$Q^{\pi}(s,a) = E_{\pi}\{R_t | s_t = s, a_t = a\} = E_{\pi}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \middle| s_t = s, a_t = a\right\},$$

где $E_{\pi}\{...\}$ — математическое ожидание, при условии, что агент следует стратегии π. Ценность действий, совершаемых из заключительного состояния, всегда равна нулю.

В компьютерном моделировании участвовали следующие TD-методы (реализующие их алгоритмы).

Метод Q-learning — метод с разделенной оценкой ценности стратегий. Один из наиболее известных и простых методов. Одношаговое Q-обучение выглядит следующим образом:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \, max \, a \, Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)].$$

В этом случае искомая функция ценности действия Q непосредственно аппроксимирует Q^* — оптимальную функцию ценности действия независимо от применяющейся стратегии. Стратегия определяет, какие пары «состояние-действие» посещаются и корректируются. Для обеспечения сходимости необходимо, чтобы все пары продолжали корректироваться. Это минимальное требование в том плане, что каждый метод, гарантированно находящий оптимальную стратегию поведения, в общем случае удовлетворяет данному условию. При таком условии и при стохастической аппроксимации для последовательности значений длины шага показано, что функция Q_t сходится к Q^*.

Метод Q(λ) — модификация классического метода Q-learning с добавлением следов приемлемости. *Следы приемлемости* — один из основных механизмов обучения с подкреплением. Для состояния s в момент времени *t* след приемлемости обозначается как $e^t(s)$. При каждом посещении некоторого состояния след приемлемости увеличивается, а затем постепенно уменьшается, пока состояние не будет посещено снова (рис. 3).

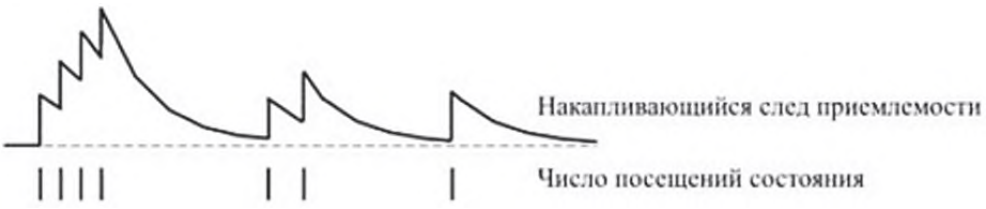


Рис. 3. График изменения следа приемлемости во времени

С помощью коэффициента $\gamma\lambda$ след приемлемости учитывает, какие из состояний были посещены недавно, где γ — *коэффициент приведения*, а λ — *параметр затухания следа*.

Существует два распространенных метода Q(λ) — метод Уоткинса и метод Пенга [10]. Для ИСППР РВ более подходит метод Уоткинса, так как он существенно проще в реализации по сравнению с методом Пенга. Метод состоит из двух шагов. На первом шаге следы приемлемости либо убывают с коэффициентом γλ, либо приравниваются 0. На втором шаге тот след, который соответствует текущей паре «состояние-действие», увеличивается на 1. Иначе говоря, след приемлемости имеет вид

$$e_t(s,a) = I_{ss_t} I_{aa_t} + \begin{cases} \gamma\lambda e_{t-1}(s,a) \text{при } Q_{t-1}(s_t,a_t) = \max\limits_a Q_{t-1}(s_t,a); \\ 0 \text{ в остальных случаях,} \end{cases}$$

где I_{xy} — *индикатор тождественности*, равный *1* при $x=y$ и *0* в остальных случаях. Тогда для всех пар s,a

$$Q_{t+1}(s,a) = Q_t(s,a) + \alpha\delta_t e_t(s,a),$$

где

$$\delta_t = r_{t+1} + \gamma \max_{a`} Q_t(s_{t+1}, a`) - Q_t(s_t, a_t).$$

Метод глубокого Q-обучения. Классические методы обучения с подкреплением и их модификации Q(λ) со следами приемлемости иногда называют табличными, так как для работы с оценочной функцией применяются матрицы размерности $S \times A$, где S — множество состояние, а A — множество возможных действий. Поэтому желательно, чтобы решаемая задача была дискретной. В реальных задачах это не всегда возможно. Один из способов избежать дискретизации поставленной задачи — использовать искусственную нейронную сеть (ИНС) и ее программную или аппаратную реализацию.

Будем записывать все наборы (состояние, действие, вознаграждение, следующее состояние) и воспроизводить опыт для обновления всех оценок Q по формуле из классического метода Q-learning. Для моделирования будем использовать трехслойную ИНС.

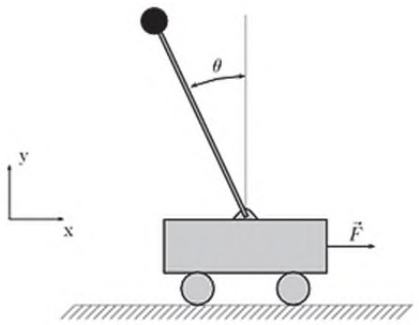


Рис. 4. Схематическое представление перевернутого маятника на тележке, где F — сила, приложенная к тележке; θ — угол наклона стержня

Для компьютерного моделирования отмеченных TD-методов выбрана *задача стабилизации перевернутого маятника* (рис. 4).

Перевернутый маятник представляет собой маятник, имеющий центр масс выше своей точки опоры, закрепленный на стержне, что делает маятник

неустойчивым. Точка опоры стержня закреплена на тележке. Задача стабилизации перевернутого маятника заключатся в том, чтобы удерживать стержень в вертикальном положении при перемещении точки опоры по горизонтали.

Задача стабилизации перевернутого маятника относится к классическим проблемам теории управления. Для тестирования алгоритмов TD-обучения предложено использовать модель перевернутого маятника, загружаемую из библиотеки gym. Библиотека gym — набор тестовых задач, которые могут применяться для тестирования RL-алгоритмов [11].

Состояния, в которых может находиться агент, можно описать четверкой: $[X, X`, \theta, \theta`]$, где X — координата тележки ($X \in [-4.8; 4.8]$), $X`$ — скорость тележки ($X` \in (-\infty;\infty)$), θ — угол наклона стержня ($\theta \in [-1.54;1.54]$), $\theta`$ — угловая скорость вращения стержня ($\theta` \in (-\infty;\infty)$). Функция *observation* возвращает состояние агента.

У агента есть два доступных действия — движение влево и движение вправо для каждого состояния. За совершение некоторого действия a, находясь в состоянии s, агент получает вознаграждение r, которое возвращает функция *reward*. Заключительными являются одно из двух состояний системы: либо маятник вышел за левую границу среды, либо за правую.

Так как скорость движения тележки и угловая скорость стержня не ограничены, то множество состояний бесконечно. Для решения поставленной задачи методом Q(λ) со следами приемлемости множество состояний следует сделать дискретным, ограничив допустимые скорости.

Реализация и компьютерное моделирование

В качестве языка реализации выбран язык Python. (в среде spyder) — высокоуровневый язык программирования, ориентированный на повышение производительности разработчика и поддерживающий структурное, объектно-ориентированное, функциональное, императивное и аспектно-ориентированное программирование.

Так как в RL-обучении одна из главных задач — поиск компромисса между изучением среды и принятием решения, то необходимо совмещать действия «исследовательские» (когда агент совершает случайные действия) и «жадные» (когда агент выбирает действие, приносящее ему наибольшую выгоду), для чего предлагается использовать ε-жадную стратегию. Суть стратегии заключается в том, чтобы агент с вероятностью ε совершал «исследовательское» действие, а с вероятностью 1–ε — «жадное» действие, которое выбирается с учетом оценок функции Q.

С течением времени агент совершает множество «исследовательских» действий, получая представление об окружающей среде с ее распределениями вознаграждений за совершенные действия, поэтому количество «жадных»

действий может быть увеличено, чтобы получить наибольшее вознаграждение. Параметр α показывает, насколько агент доверяет новой информации. Чем дольше агент взаимодействует со средой и чем больше данных о ней получает, тем больше он может доверять уже изученной информации. Выберем минимальное значение $\alpha = 0{,}1$, параметр γ, показывающий, насколько важны уже полученные оценки, установим равным 0,9.

В начальный момент времени тележка находится посередине окна (экрана), стержень перпендикулярен основанию. Агент пробует совершать действия (двигаться влево или вправо), тем самым меняя свое состояние (координату тележки, ее скорость, угол наклона стержня и угловую скорость движения стержня). Цель — сдвинуть тележку за пределы окна так, чтобы стержень оставался сбалансированным. Если достигнуто терминальное состояние или стержень отклонился более чем на 15 градусов, то состояние системы сбрасывается и тележка снова оказывается в центре экрана.

При моделировании агенту дается 1000 попыток (эпизодов). Если за 1000 эпизодов агент не обучился сдвигать тележку за пределы окна, считается, что запуск оказался неудачным. Так как вычислительные ресурсы сравнительно невелики, то потребовалось ограничить для метода глубокого обучения количество тактов за эпизод.

В таблице 1 отражено время выполнения алгоритмов, реализующих каждый из методов, в таблице 2 — показатели числа тактов, которые продержался агент. На рисунке 5 показано среднее вознаграждение за эпизод для каждого из методов.

Таблица 1

Время выполнения методов

Q-learning	Q(λ)	Deep Q-learning
70.80	92.19	10321.39

Таблица 2

Число тактов, которые агент продержался за эпизод

Число тактов за эпизод	Q-learning	Q(λ)	Deep Q-learning
max	500	500	200
min	9	8	7
mean	321.605	317.19	71.61

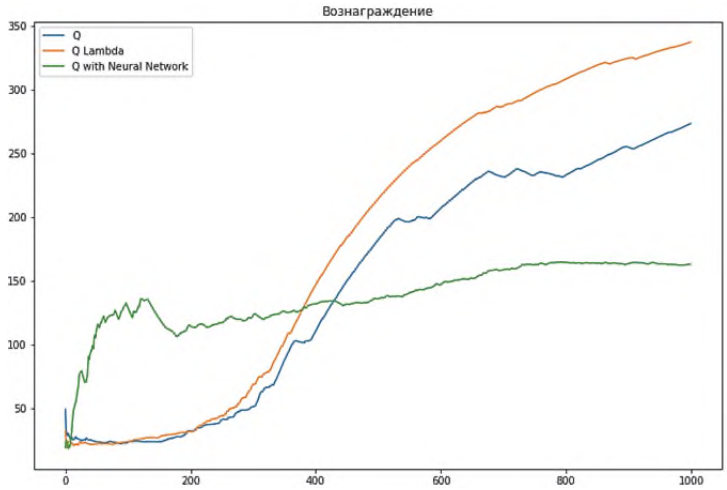


Рис. 5. Среднее вознаграждение за эпизод

Заключение

В процессе выполнения работы реализованы и промоделированы алгоритмы на основе классического TD-метода Q-learning, а также его модификации — методов Q(λ) с использованием следов приемлемости и глубокого Q-обучения на основе ИНС.

Компьютерное моделирование на задаче стабилизации перевернутого маятника показало, для метода Q(λ) получается большее вознаграждение и более стабильное функционирование после 300 эпизодов, однако при этом требуются больше вычислений по сравнению с классическим методом Q-learning. Метод глубокого Q-обучения требует намного больше ресурсов, так как на каждом шаге обновляются значения оценочной функции Q. Однако в случае жестких временных ограничений, когда результат нужен быстро и при этом не требуется высокой точности, то данный метод предпочтителен, так как уже на 100-м эпизоде может быть получено достаточно хорошее решение (по сути, имеем гибкий алгоритм). Следует отметить, что при моделировании использована довольна простая ИНС, для более сложной ИНС может быть получено более точное решение.

Таким образом, при достаточно большом (больше 400) числе эпизодов наилучший результат показал метод Q(λ), который хорошо подходит для задач, представимых в дискретном пространстве. Для других видов задач рекомендуется применять метод глубокого Q-обучения.

Для ИСППР РВ рекомендуется интегрированная среда, включающая оба метода. Конкретный метод подбирается с учетом специфики объекта и внешней среды (специфики решаемой задачи): при наличии дискретного пространства с конечным числом состояний следует использовать метод Q(λ),

в случае непрерывного пространства с бесконечным числом состояний (что типично для сложных динамических объектов) рекомендуется метод глубокого Q-обучения.

Исследования проводятся при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-07-00498 а, 18-01-00201 а, 18-01-00459 а).

Список литературы

1. *Холкин Д. В., Чаусов И. С.* Цифровизация как предчувствие: техноэкономические и институциональные аспекты цифровой трансформации электроэнергетики // Энергетическая политика. Общественно-деловой научный журнал. 2019. № 2. С. 70—79.

2. *Попова О. М.* Разработка прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети с учетом требований интеллектуальной ЭЭС // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 142—150.

3. *Башлыков А. А., Еремеев А. П.* Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике : учебник. М. : ИНФРА-М, 2017.

4. *Еремеев А. П., Голенков В. В.* Разработка интегрированных систем поддержки принятия решений реального времени для мониторинга и управления сложными технологическими объектами // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конф. с междунар. участием / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Колесникова. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 10—17.

5. *Вагин В. Н., Еремеев А. П., Кутепов В. П. и др.* К 40-летию кафедры прикладной математики: исследования и разработки в области обучения, программирования, информационных технологий и искусственного интеллекта // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 117—128.

6. *Саттон Р. С., Барто Э. Г.* Обучение с подкреплением / пер. с англ. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017.

7. *Еремеев А. П., Кожухов А. А.* Анализ и разработка методов обучения с подкреплением на основе темпоральных различий для интеллектуальных систем реального времени // 15-я нац. конф. по ИИ с междунар. участием КИИ-2016 (3—7 октября 2016 г., г. Смоленск, Россия) : тр. конф. : в 3 т. Смоленск : Универсум, 2016. Т. 1. С. 323—330.

8. *Еремеев А. П., Подогов И. Ю.* Методы подкрепленного обучения для систем поддержки принятия решений реального времени // Вестник МЭИ. 2009. № 2. С. 153—161.

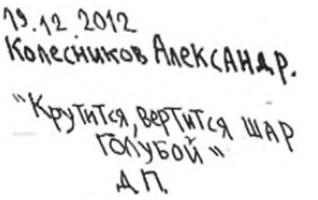
9. *Еремеев А. П., Герасимова А. Е., Кожухов А. А.* Сравнительный анализ методов машинного обучения с подкреплением применительно к системам реального времени // Труды Междунар. науч.-техн. конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии — 2019» («ИС & ИТ — 2019» «IS&IT'19». Таганрог : Изд-во Ступина С. А., 2019. Т. 1. С. 242—251.

10. *Kaelbling L., Littman M., Cassandra A.* Planning and acting in partially observable stochastic domains // Artificial Intelligence. 1998. 101. P. 99—134.

11. *Документация* библиотеки gym: http://gym.openai.com/docs/

А.В. Колесников
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
e-mail: avkolesnikov@yandex.ru

МОДЕЛЬ МИРА В ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ



Вися над пропастью и держась руками за единственную ветку дерева, называемого интеллектом, добровольно разжать руки и броситься в бездну, зная, что она не имеет конца, — разве это не требует невероятного усилия со стороны того, кто пытается измерить глубину духовной бездны?

Т. Судзуки, профессор,
японский философ и психолог

Вместо введения

Передо мной подаренная Дмитрием Александровичем Поспеловым его книга «Амаравелла: мистическая живопись Петра Фатеева» и авторская надпись — эпиграф к настоящему докладу, написанная фломастерами трех цветов: зеленым, красным и желтым. Чтобы ее можно было прочесть, все точки я обратил одним, черным.

Глядя на эту яркую, насыщенную жизнью и энергией дарственную надпись, думал о том, как совместить тематику конференции с памятью о Дмитрии Александровиче? Как сочетать науку с чувствами от общения с ним, с душой и духом, в образовании которых он долгие годы участвовал? Но сначала о картинах памяти. Помню Дмитрия Александровича, сидящим на первом ряду на научных мероприятиях, с большой общей тетрадью, внимательно слушающего и конспектирующего выступающих. Он также был и прекрасным лектором. Поражала разносторонность, глубина понимания и ясность изложения. Его рисунки-образы зачаровывали настолько, что я показывал их своим студентам на лекциях. Он любил людей и бережно заботился о нас молодых. Память сохранила картину выступления его как первого оппо-

© Колесников А.В., 2020

нента на защите моей кандидатской диссертации в СЗПИ в январе 1979 г., в Ленинграде: там висело 15 плакатов, из которых Дмитрий Александрович выбрал изображение многоуровневой структуры языка описания состояния морского рыбного порта, назвал ее «слоеным пирогом», и рекомендовал за содержание только одного этого рисунка присудить ученую степень. Он заботился не только о знаниях, но и нашей культуре. На научные мероприятия Дмитрий Александрович часто привозил слайды, показывал картины и вечерами рассказывал о искусстве художников В. Т. Черноваленко, П. П. Фатеева, и эти мистические, философские, одухотворенные образы занимали наше внимание, развивали восприятие и откладывались в памяти. Когда Дмитрий Александрович приезжал в Калининград, то на вопрос «Что Вы хотите посмотреть?» он неизменно отвечал: «Розовоцветущие каштаны, брусчатку и рынок». Наконец, в памяти возникла картина-образ, на которой Дмитрий Александрович рассказывает о ситуационном управлении в холле зала заседаний корреспонденту Калининградского телевидения: с «незгибаемой» волей, не жалея сил, он популяризировал проект «Ситуация» Научного совета по комплексной научной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР.

Перебирая одну за одной эти картины в памяти, еще и еще раз старался осмыслить дарственную надпись. Она нестандартна и заключена в кавычки. Дмитрий Александрович написал много книг, писал красиво, уважая русский язык и кавычки не могли быть случайностью. А может быть это цитата, одна строчка из текста известной городской песни? За пониманием обратился через Интернет к «естественному коллективному интеллекту».

Песня «Крутится, вертится шар голубой» — поэтический образ юношеской влюбленности. Такие светлые и чистые, голубые, как небосвод, шароподобные видения у безумно влюбленного паренька: вертится, кружит голову, подталкивает к безумству влюбленного ... украсть ... свою возлюбленную барышню. В советском кинематографе умели изумительно точно и тонко песней передавать гамму эмоций киногероя. Песней «рисовали» многие черты его характера, — писала девушка.

Зато точно другое — изначальный текст песни был намного длиннее. И там фигурировал не шар голубой, а шарф того же цвета, что, если вдуматься, логичнее. Потому что, что это за шар такой, который крутится над головой? Дискотечный? В романсе? А если земной — то почему «над»? Версия с воздушными шариками тоже не выдерживает критики — их в начале прошлого века еще просто не существовало, — высказался молодой человек.

Размышляя о мировоззрении, миропонимании, о естественном и искусственном интеллекте (ИИ), теле, языке, чувствах, душе и духе человека, левополушарном Западном и правополушарном Восточном мышлении, голубых, как небосвод, шароподобных видениях влюбленного в науку паренька, об образе земного шара, крутящегося «над» головой, вспомнил высказывание

Т. Судзуки (в поле эпиграфа) и мысль Л.Т. Кузина, руководившего секцией искусственного интеллекта на конференции по АСУ в 1976 г. в г. Тбилиси: «Мы похожи на группу энтузиастов, которые на телеге пытаются достичь второй космической скорости», осознал, что если принять, что «телегой» должен кто-то управлять, давно хотел поразмышлять о его «модели мира», «языковой инженерии» и «инженерии образов».

1. Представления о «модели мира» в естественном и искусственном интеллекте

Содержание слова «мир» [1] в словаре В.И. Даля: «МИР, (міръ) — вселенная; вещество в пространстве и сила во времени; одна из земель вселенной; наша земля, земной шар, свет; все люди, весь свет, род человеческий; община, общество крестьян; сходка». Согласно В.И. Далю, старая русская орфография отличала написание «міръ» в вышеприведенном значении и «мир» в смысле «отсутствие ссоры, вражды, несогласия, войны; лад, согласие, единодушие, приязнь, дружба, доброжелательство; тишина, покой, спокойствие». М.Р. Фасмер в этимологическом словаре не разделяет эти два смысла «мир» и приписывает одному слову, обозначающему «весь мир, народ, спокойствие, согласие». Греческие ученые именовали человека и совокупность сущего в целом космосом (др.-греч. κόσμος — «порядок») — украшением, нарядом и красою, благопристойным порядком. Русский язык именует эту совокупность мир'ом, отсутствием ссоры, вражды, несогласия, войны; ладом, согласием, единодушием, приязнью, дружбой, доброжелательством; тишиной, спокойствием. Сущность мира в мирности, сердечном согласии и взаимной любви, мирности міра и мірности мира, «ладности мироздания» и «вселенскости согласия». И это не игра слов, они открывают возможность осмысления мира в качестве первого предмета научной мысли.

Известны две точки зрения на понятие «модель мира»: 1) объективное отражение действительности; 2) искусственное конструирование новой реальности, виртуального образа окружающей среды. Модель мира формируется психикой человека на основе информации из внешней среды, собственного опыта, соединяя приспособленность личности к условиям реального мира и влияние общественной культуры. Модель мира — источник гипотез, выдвигаемых человеком в предвидении событий, ситуаций и состояний, базис планирования поведения как своего, так и систем управления. Обращаясь к модели мира, человек-оператор может определить местоположение, предвосхитить развитие событий и подготовить действия релевантно ситуации. Модель мира выявляет человеческие ценности, избирательность восприятия, обеспечивает накопление представлений и схем в сознании, ее построение естественным интеллектом — активный процесс, длиной в жизнь. В [2] отмечено, что человек воспринимает не реальность, а «неврологическую модель реальности» — нейропсихологическую и психофизиологическую основу модели

мира. Человек не видит те же вещи, не наблюдает те же события, переходя с одного языка на другой. Изменение языка меняет человека как наблюдателя, изменяет одновременно и его мир.

На сегодняшний день нет инструмента, «объяснения» устройства мира для систем ИИ [3]. Почти полвека практические успехи ИИ связывались со смещением от центральной проблемы представления знаний в сторону извлечения, приобретения в инженерии знаний и машинном обучении. Не преуменьшая значение этой тенденции, в [4] отмечалось, что в развитии представлений об окружающем мире от второй (А. Энштейна — Н. Бора) к третьей научной картине мира возникло недоверие к обилию показателей и закону больших чисел: нет «средних значений», «нет равенства», каждая «особь» индивидуальна. Применительно к ИИ это означает, что субъект деятельности должен быть включен в систему представления знаний. В [5] признается, «что отсутствие в моделях мира субъекта деятельности существенно ограничивает возможности как самих моделей, так и основанных на них интеллектуальных систем».

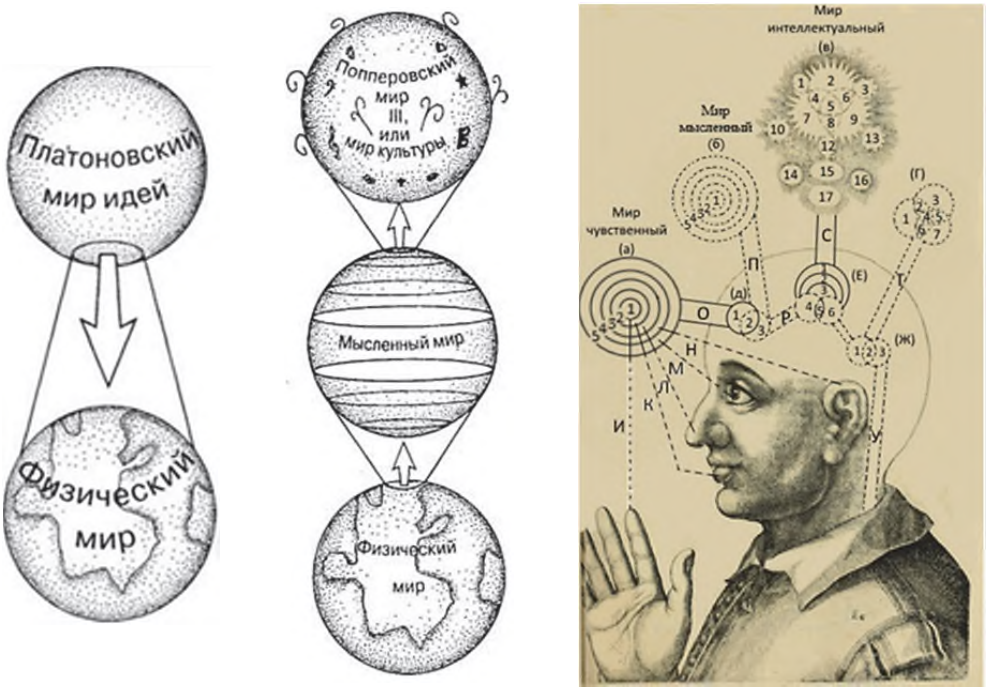
Понятие «модель мира» — методологическое средство противоположных систем теоретизирования: мета-физической и диалектической. В первой — это абстрактная и формализованная система изучения и объяснения реальных жизненных процессов. Во второй — совокупность знаний о мире, приобретенных и накопленных социальным опытом [6].

На рисунке 1 показаны три картинки: *а* и *б* взяты из [7], а с третьей — *в* впервые познакомился в [8] с надписями на латыни, позже в лучшем качестве — в Интернете.

Рисунок 1, *в*, с сохранением формы и композиции, с обозначениями на русском языке (перевод автора) вместо трудно различимых рукописных надписей Р. Фладда на латыни предстает перед русскоязычным читателем впервые.

Модель мира Платона и Аристотеля — синтетическая и соединяет в единое целое понятия «реальность», «реальный мир», «внешний мир» и «физический мир», с их учениями о мире истинно-сущего и мире идей. На рисунке 1, *а* изображены мир вечных идей, доступных лишь разуму, и изменчивый мир чувств, грубой материи, противостоящих друг другу. Внизу «сферой» схематично изображена физическая Вселенная для анализа и понимания реальных законов ее поведения. Вверху, условно, также «сферой» показан платоновский мир идей. Отношения миров идей и физического показаны стрелкой, символизирующей часть их взаимовлияния, а именно воплощение идей (овальная область внизу верхней окружности) в реальном, физическом мире.

Платон считал, что причина происходящих в мире изменений и становлений, воспринимаемых чувствами, скрыта в мире идей, мире истинно-сущего. Мир истины постигается разумом, мир изменения или становления — чувствами. Любая вещь сложна, состоит из частей и существует во времени.



а *б* *в*

Рис. 1. Модель мира Платона — Аристотеля (*а*), модель мира К. Поппера (*б*), модель мира Р. Фладда (*в*):
а1 — земля, а2 — вода, а3 — воздух, а4 — вакуум, а5 — огонь;
б1 — образ земли, б2 — образ воды, б3 — образ воздуха, б4 — образ вакуума, б5 — образ огня;
в1 — серафимы, в2 — Бог, в3 — Херувимы, в4 — Сын, в5 — Святой Дух, в6 — Отец ,
в7 — как дочь, в8 — искусство художественной прозы, в9 — как родитель, в10 — владычество,
в12 — трон, в13 — мощь, в14 — сила, в15 — правление, в16 — Архангелы, в17 — Ангелы;
г1 — память, г2 — вразумительный, г3 — пастырь (наставник), г4 — мир, г5 — воображение,
г6 — чувствующий, г7 — видения; д1 — чувственный, д2 — душа, д3 — образное пространство;
е1 — ум, е2 — понимание, е3 — причина, е4 — мысленный, е5 — душа, е6 — отражение;
ж1 — воспоминание, ж2 — душа , ж3 — мотив; И — осязание, К — вкус, Л — обоняние,
М — зрение, Н — слух, О — мир элементов и элементарных чувств представленных
в качестве, П — мир элементов и элементарных изобразительных копий, Р — абстрагирование
(искажение), С — предначертанная, спущенная сверху подсознательная линия; Т — для,
У — из этой части головного мозга власть (управление) передается спинному мозгу

Система аристотелевского логического учения включает учение о сущности, количестве, качестве, отношении, месте, времени, положении, обладании, действии, претерпевании; формах речи, мышления, бытия, в которых высказывается сущее, о силлогизме как системе высказываний и, наконец, о доказательстве как системе силлогизмов. Аристотель ввел три основных закона логического мышления: 1) Тождество: любое понятие *А* есть то, чем оно является *А* и ничем другим; 2) Непротиворечивость: *А* и не *А* не могут

одновременно быть истинными; ничто не может быть и не быть; 3) Исключенное третье: все может только быть или не быть. *A* может быть истинно, либо не *A* может быть истинно, третьего не дано.

Аристотель понимал природу через понятия формы и вида в определениях подвижных вещей, возникающих и изменяющихся. Природным вещам он противостоят рукотворные, имеющие начало своего движения и покоя не в себе, а в чем-то ином. Понятие природы, по Аристотелю, телеологическое, хотя допускается и присутствие материи, однако изучать природу, исходя только из материи, нельзя. Аристотель объясняет и важное явление мира природы — движение и его место в пространстве через понятия «бытие в действительности», «бытие в возможности» и «осуществленности». Движение — это переход из возможности в действительность. Время — число движения по отношению к предыдущему и последующему, благодаря чему можно говорить о большем и меньшем движении.

Душа, по Аристотелю, — форма и сущность тела, а тело — материя души. Ощущение — актуализация потенциально находящихся в объектах свойств и качеств. Далее идет воображение — слабое, истинное или ложное ощущение. Память — «остановка» воспринятого чувствами, а припоминание — отличный от памяти фактор сознательного усилия. Суть бытия есть только у отдельно существующей вещи, у всего остального суть бытия вторична.

Термин «физическая реальность» введен в методологию физического познания значительно позже А. Эйнштейном. Это понятие ассоциируется с содержанием категорий «объективная реальность» (физический мир), объекта и субъекта познания. Необходимость такой ассоциации возникла, когда физическая наука стала удаляться от исследования непосредственно наблюдаемых вещей и процессов, используя все усложняющиеся экспериментальные инструменты и все более сложные математические абстракции, и формализмы. Физическая реальность — мир эмпирических физических объектов. Техника и технологии открыли ученым новые сферы природы, где фундаментальные понятия прежней науки — пространство, время, место, скорость — проблематичны и потребовали переосмысления [9]. Например, развитие электротехники в корне изменило средства использования природных сил ранее опытно не известных. И до сих пор электричество, уже обыденное и повсеместное, в сознании людей представляется жутким и непонятным, а внутреннее устройство сложного электрического аппарата порой пугает человека так же, как и наблюдение за хирургической операцией.

Различают биологическую, социальную реальность, рассматривая их соответственно как мир биологических или социальных эмпирических объектов [10]. Понятия «материя» и «материальный физический мир» не тождественны, подобно тому, как понятие «материальный физический мир» не тождественно понятию «физическая реальность». Материальный физический мир — это мир естественных физических объектов-реальностей, физический мир как таковой (сам по себе). Теоретическое представление материального

физического мира — физическая картина мира. Физическая реальность — это мир физических явлений (предметов): это то, в какой форме данности материальный физический мир, мир физических вещей предстает как эмпирический объект познания [10].

Шестеричная схема мира Плотина (III в., основатель неоплатонизма) [11—13]. Плотин — человек дедуктивныго и эмоционального мышления, а его миропонимание опирается на видении чувственного мира, для своего объяснения нуждающегося в иерархии. Иерархия реальности Плотина — шестиступенчатая: 1) Единое (мир Единого); 2) Числа (мир чисел); 3) Ум; 4) Мировая Душа; 5) Природа тел, телесность (мир природы, телесности); 6) Материя (мир материи).

Материя — первое зло, а телесный мир — второе. Выше «природы тел» зла нет. Там всё божественно и несет печать красоты, добра и совершенства. Выше телесности — благая и прекрасная Мировая Душа, богиня Афродита, Третья Ипостась, сотворившая все живые существа и вдохнувшая в них жизнь, созидающая, творящая, формирующая и сопрягающая; сила, одухотворяющая телесный Космос и отражающаяся в нем. Вторая Ипостась — «блаженный» Ум, бог Крон, «вечность», полнота мышления, жизни и существования. До «всегда существующего» есть ступень «предуготовления к сущим и их прообраз» — числа. Выше — Первая Ипостась — Единое, «высочайшее», выше бытия, мышления и жизни, чисел, богов и всего остального.

Иерархию универсума пытались построить Гомер, Пифагор, Платон, Аристотель, но Плотин первым показал, что Человек сродни всей иерархии, с каждой ступени которой он виден по-разному, но и волен от нее отказаться.

Понимание шестеричной схемы Плотина должно идти от космологии к психологии (учении о Душе), от него к ноологии (учению об Уме) и затем к генологии (учению о Едином). Основная проблема, которая волновала Плотина на протяжении всей его жизни, — это чувство несчастного положения человека в этом мире. Путь спасения он видел в личностном начале человека. Личность — это сущностная характеристика человека, отличающая его от животных, растений и косной материи, но она и основа его эгоизма. Главным для Плотина при анализе человека — проблема самосознания и самопознания. Человек не сводится к его телу, тело — могила и темница души, имеющей божественное происхождение. Душа — духовная, божественная и бессмертная субстанция.

Сверхбытийное Единое благодаря «переполненности» и «избытку силы» «перетекло» во многое. Единое творит и порождает благие реальности, наполняя их добром, красотой, смыслом, жизнью и бытием. Материя — «беспредельный», «безмерный» и «безвидный» слой действительности. Она не приемлет ни множества, ни многообразия, ни частичности, ни ограниченности, несет гибель, деформацию и крушение границ. Она абсолютное, первичное зло, не воспринимаемое органами чувств людей. Телесность, в кото-

рую «встроен» и Человек, — «пограничная зона», зона смыкания и пересечения разных и чуждых друг другу пластов реальности. Отсюда мир несет следы благого и злого, высокого и низкого, горнего и дольнего, небесного и земного, духовного и материального. Телесное частично, разомкнуто, не самодостаточно, не тождественно самому себе. Человек — диссонанс души и тела. В человеческой душе есть вечность, безграничное мышление, истинное бытие, полнота ума, любовь и блаженство.

Плотин вслед за Платоном считает, что чувственно воспринимаемая сфера познания ложна и ошибочна, заражает Человека хаосом и сумбуром, обманом, не наделяет истинным знанием. Человеческое «ощущение» ложно потому, что оно обращено на телесность — бессмысленную, текучею, разомкнутую. Против телесности Человек имеет только одно оружие — душу.

Ось «внешнее-внутреннее» наполнена у Плотина самыми разными содержаниями: бытийным, антропологическим, гносеологическим, религиозным. В Античности нет более далекого от Аристотеля мыслителя, чем Плотин. Для Аристотеля мир — это сущее, допускающее многомерный анализ и разумную, интеллектуальную интерпретацию. У Плотина мир — это «тень» высшего, у Платона — «отражения в воде». Плотин взирает на материю этически, а Аристотель каузально и энергийно. Аристотель и Плотин рисуют два бесконечно далеких друг от друга идеала Человека. Для создателя «Метафизики» телесность «конечного сущего» — мост, пройдя по которому Человек способен актуализировать мышление, возвыситься до мудрого и созерцательного спокойствия, найти счастье и обрести бессмертие. Для Плотина Человек — это не Человек, а лишь «тень от человека». Эта тень не живет, а «актерствует», «плачет и рыдает на сцене всей земли». Наконец, Плотин видит в «конечном сущем» преграду, а Аристотель — путь.

Модель мира К. Поппера. К. Поппер различает три мира (универсума): мир физических объектов, или физических состояний; мир состояний сознания, мыслительных, ментальных состояний и, возможно, предрасположений к действию; мир объективного содержания мышления, прежде всего содержания научных идей, поэтических мыслей и произведений искусства, мир культуры по Р. Пенроузу. По его мнению, научное знание не есть просто знание в смысле обычного использования слов «я знаю», принадлежащее «второму миру», мысленному миру, миру субъектов. Научное знание принадлежит третьему миру — миру объективных теорий, объективных проблем и объективных аргументов.

Отсюда большая часть современной эпистемологической логики не соответствует своей цели. Знание в объективном смысле — знание без того, кто знает: оно есть знание без субъекта знания. Для эпистемологии решающее значение имеет исследование третьего мира объективного знания, в значительной степени автономного. Другими словами, ученые действуют на основе догадок или субъективного относительно того, что должно способствовать дальнейшему росту третьего мира объективного знания.

Объективная эпистемология, исследующая третий мир, может в значительной степени пролить свет на второй мир субъективного сознания, особенно на субъективные процессы мышления ученых, но обратное не верно.

К главным тезисам К. Поппер выдвигает дополнительные: 1) третий мир — естественный продукт человека, подобно тому, как паутина продукт поведения паука; 2) третий мир в значительной степени автономен, хотя человек постоянно воздействует на него и подвергается воздействию с его стороны; он автономен, несмотря на сильное обратное воздействие на людей — жителей второго и первого миров; 3) посредством взаимодействия между людьми и третьим миром растет объективное знание.

Модель мира Р. Фладда (Robert Fludd). Р. Фладд [14; 15] — великий гуманист эпохи Возрождения. Его трудами в XVII в. графика отображает не только видимые человеку объекты, но и скрытые до этого схематические образы взаимосвязей. Изобразительность доминировала над схематизацией, поэтому иллюстрированные диаграммы Р. Фладда — пионерская графика, визуализирующая условности и договоренности. В «Иллюстрированной диаграмме» («Diagrama mas ilustracion», 1617) он схематично показал взаимодействие трех уровней существования человека: мира интеллекта, мира чувств и мира мысленного (мира воображения). Используя иллюстрации для представления реальных элементов и диаграммы, обобщающие абстрактные понятия, был сгенерирован новый смысл, явно не показанный на схеме, но подталкивающий читателя к его интерпретации.

В философии Р. Фладда поражает разнообразие элементов, переплетенных столь искусственным образом, что автор чувствовал постоянную необходимость в наглядном изображении своих отвлеченных воззрений.

Миропонимание Р. Фладда — изложение откровения, которое было даровано первому человеку и перешло путем предания к Моисею. Христос вторично дал человеческому роду это учение. В древнее время Пифагор, Платон и Гермес Трисмегист, знавшие книгу Моисея, отчасти выразили в своих сочинениях истинную философию, умолчав об источниках ее.

Бог есть начало и конец всего; все из него возникает и все к нему возвращается. Бога можно рассматривать двояко: во-первых, до его обнаружения в созданном им мире; во-вторых, в его обнаружениях. В первом смысле Бог — непостижимое единство с исчезнувшим различение. Во втором смысле Бог — обнаружение скрытых противоположностей, существующих в мире как деятельное формальное начало света и страдательное материальное начало тьмы.

Из взаимодействия света и тьмы возникает мир, всё в нем содержащееся, первоначальные элементы и качества: свет рождает тепло, рождающее движение; холод — свойство небытия, тьмы. Сухое возникает как разделение тепла и холода, сырое — из их взаимодействия. Действием этих начал возникают: незримый воздух и эфир, небо; вода, действием холодного воздуха становится землей, которая влиянием света становится огнем. Предметы состоят из этих четырех элементов и представляют собой вещество.

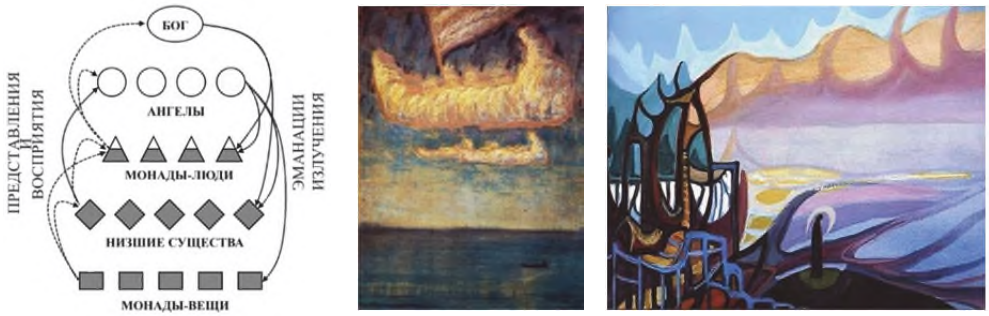
Бог обнаруживается в трех мирах: в мире чистых духов, в макрокосме, небесном эфире и в микрокосме, где господствует человек. Макрокосм — создание и отражение божественной троицы. В человеке, или микрокосме, повторяются в малом виде части макрокосма. В голове «живут» души разумная и чувствующая, в животе — душа растительная. В груди живет жизненный дух — посредник между разумом (формой) и растительной душой (материей). Посредник — часть мировой души, отождествляется с Христом, выражением Божества. Разум непогрешим и по смерти человека возвращается в сверхнебесный мир.

Возможные миры Г. В. Лейбница [16; 17]. В своих работах Г. В. Лейбниц синтезировал античные, средневековые и современные воззрения. Как и Декарт, Лейбниц, соединяя объективный и субъективный идеализм, говорил, что мир в целом и все организмы в нем похожи на «огромный механизм». У мира и каждого организма есть конечная цель, намеченная Богом. В учении «монадологии» материальный мир — иллюзия, сотворенная Богом. Бытие — совокупность духовных атомов, монад, способных к восприятию, и развивающихся до стадии человеческого сознания. Чувственно воспринимаемый мир — телесный, физический, материальный — феномен восприятия, порождающий все монады. Лейбниц видит пространство как порядок одновременно сосуществующих вещей, рождающийся из взаимоотношения вещей. Следовательно, пространство (протяженность) — отношение между вещами, производное от вещей представление, фиксируемое в сознании человека. Без живых созданий пространство и время существовали бы только в уме Бога.

Реальный умопостигаемый мир состоит из самостоятельных субстанций — «центров сил», «духовных атомов», или «монад» (от гр. monas — единица), сродни платоновскому эйдосу, демокритовскому атому и аристотелевской форме. Существующее — монада либо их совокупность. Монады просты, неделимыми, непротяженны, находятся вне пространства, — это «метафизические точки», вечные и неуничтожимые, возникающие или погибающие естественным путем и существующие от Бога. Монада — активная духовная субстанция, отражающая весь мир, ее деятельность — смена восприятий, перцепций и определяется стремлением к новым восприятиям. Монады различаются восприятиями и развиваются по закону непрерывности, без скачков, постадийно и образуют иерархию по ясности восприятия мира. На высших ступенях — монады (дух, интеллект человека), способные к восприятию, перцепции, самосознанию и апперцепции. Монады самодостаточны, не изменяются и не влияют на другие монады, развиваются по «предустановленной гармонии», Божьему плану.

Совокупность монад представляется в сознании человека вещью, агрегатом, системой, объединенной в целое одной высшей монадой. Доминирующая монада у животных — душа, у человека — дух или интеллект. В мире есть только прогресс и регресс монад.

Каждая монада воспринимает все другие, и степень восприятий образует иерархию монад во главе с Богом (рис. 2, *а*), а их многообразие определяют разные уровни восприятия и представления.



а *б* *в*

Рис. 2. Умопостигаемые миры:
а — иерархия монад по Г.В. Лейбницу;
миропонимание в изобразительном искусстве : *б* — М. Чюрленис «Мысли»;
в — В.Т. Черноваленко «Непобедимый дух»

На низшей ступени — монады с бессознательными восприятиями. Далее следуют субстанции, восприятие которых сопряжено с душой и памятью. Еще выше — монады с представлениями и рассудочным духом. На вершине иерархии — монада абсолютного разума и всеведения — Бог, вечная и первичная монада, непрерывно излучающая «первоматерию», соединение которой с монадами породило многообразие тел и существ.

Особенность миропонимания М. Чюрлениса (рис. 2, *б*) — «двоемирие», позволяющее в процессе взаимопроникновения этих миров друг в друга воспринимать каждый из них обособленно. По обыкновению миры зрительно слиты воедино по форме и по содержанию, а мир иной давал о себе знать символически. М. Чюрленис разделил миры прозрачностью более высокого измерения. Когда же миры сливались, возникали новые формы красоты в мире земной действительности и в то же время доступные земной кисти и земному полотну [18].

Можно предположить, что В.Т. Черноволенко (рис. 2, *в*) живописал новую землю и новые небеса из Откровения Иоанна Богослова, когда материя станет духоносной, пронизанной несказанным светом. Архитектура на полотнах В.Т. Черноволенко — из такого, по сути, уже бесплотного вещества. Она вся сквозит, просвечивает. Свободный рост ее форм не ограничивается гравитацией. Трудно сказать, что в действительности увидел своим внутренним зрением художник, проникший за завесу земного пространства и времени. Какие миры предстали перед ним — будущие земные или настоящие Высшие? В.Т. Черноволенко не придумывал свои сказочные миры, он их видел [19].

Модель мира Г. В. Лейбница отображает действительный мир как один из бесконечного числа возможных миров, миров, которые могли бы быть. Это наилучший из всех возможных миров, всякие изменения в нем будут к худшему. Поэтому Бог выбрал из всех возможностей именно этот мир. Возможные, но неактуализированные миры: «мир без греха», «мир без людей», «мир, где тела не обладают инерцией», «мир с другими законами природы» и др. В условиях ограниченного понимания мира людьми вводятся оценки «качества мира» и выбора лучшего из возможных: 1) этический параметр «добро — зло»; 2) критерии онтологического характера — содержащий наибольшее число сущностей; максимально эффективный с минимальной затратой сил; с максимально простыми законами и наибольшим богатством явлений. Действительный мир для Лейбница — цепь состояний упорядоченного множества объектов. Временные состояния мира — разные миры. Лейбниц фактически вводит специальный статус возможного: «Возможное — положение вещей, совместимое с имеющимися законами», но таких «законопослушных» модальностей у него две — абсолютная и гипотетическая. Абсолютные возможности могут быть нереализоваиными, в том числе и в нашем мире, т. е. они «населяют» иные возможные миры, которых может быть очень много. Однако вещи, возможные сами по себе, не обязательно совозможны, следовательно, их существование может иметь место лишь в разных мирах. Если реализовать все возможное для нашего мира, то он погрузился бы в пучину абсурда.

«Возможные миры» населены духовными субстанциями — индивидными концептами, абстракциями вещей, «созданиями разума». Выражения души, оформленные или нет, могут быть названы идеями, а сконструированные или оформленные — понятия или концепты в «уме Бога». Человек мыслит о возможностях сквозь знание идей, существующих в вещах, уже созданных Богом. Концепты могут быть простыми, примитивными или сложными, производными, образующиеся из простых композиций положительных или отрицательных признаков. В основании всего — простые свойства, дающие возможности мысленно конструировать. Нельзя смешивать концепты-понятия в уме Бога и в человеческом познании, иначе исчезнет различие или тождество между значением и смыслом.

Фундаментальное свойство «семантики» лейбницевских возможных миров — связь индивидов в мирах. Если два или более индивидных концепта имеют место в одном и том же возможном мире, то они присутствуют или отсутствуют вместе во всех остальных возможных мирах. Отношение совозможности транзитивно, симметрично и рефлексивно. Возможные миры, по Лейбницу, — классы эквивалентностей, состоящие из полных индивидных концептов, объединенных отношением совозможности. Лейбниц пытался выработать различие между необходимой и случайной истинами. Необходимая истина («истина разума», «всеобщая истина», «метафизическая истина», «логическая истина») не может быть изменена с изменением окружающих ее обстоятельств. Случайная истина («истина факта» и «истина существования») с изменением обстоятельств перестает быть таковой.

Миры возможного М.Н. Эпштейна [20]. М.Н. Эпштейна интересуют не возможные миры, а миры возможного, то, как они раскрываются в нашем мире, возможного совместимого с нашим миром и постепенно его преобразующего, как с ростом сферы мыслимого человеческий мир все более переходит в иную модальность, модус возможного, как текстуальная, знаковая, информационная, компьютерная вселенная все более растворяет в себе вселенную фактов.

«Возможное» — категория, часто входящая в определение других категорий, но сама практически не поддается определению. М.Н. Эпштейн выделяет четыре элементарные составляющие языка модальностей, предикаты «мочь», «быть» и «знать», всевозможные сочетания которых и с отрицательной частицей «не» характеризуют многообразие известных модальностей и их соотношение.

Три основные алетические (бытийные, истинностные) модальности — «действительное», «возможное» и «необходимое» — попарно связаны со своими отрицаниями, соответственно «недействительным», «невозможным» и «случайным». Таковы шесть наиболее распространенных и общепринятых модальных категорий, которые могут быть последовательно определены сочетаниями трех знаков — «быть», «мочь», «не»: 1) модальность действительного (в ее определении используется только один из двух предикатов — «быть») Действительное: быть Недействительное: не быть; 2) модальность возможного Возможное: может быть Невозможное: не может быть; 3) модальность необходимого Случайное: может не быть Необходимое: не может не быть.

«Возможное» соотносится не только со своей противоположностью, «невозможным», но и с модальностью «случайного», от которой также отличается лишь частицей «не», однако относящейся не к «мочь», а к «быть». Случайное — то, что есть, но чего может и не быть, тогда как возможное — то, чего нет, но что может быть.

Важнейшая проблема теории возможного — это «возможные миры» и их соотношение с действительным миром. «Возможный мир» — совокупность возможностей (или возможных существований), которые могут непротиворечиво образовать одно целое, т.е. не исключают возможности друг друга.

Возможное — особый модус «можествования», выводящий человека за пределы реальности, но вовсе не обязательно принадлежит какой-то другой реальности. Особенность возможного — несводимость к реальному, будь это реальность нашего мира или других миров. Возможное проявляется на субстанциональных уровнях мышления, духа, языка, культуры и др. Возможное не есть сущее, не есть то, что есть или чего нет, оно — особый модус, не переводимый на язык реального или идеального существования. Философия возможного находит предпосылку в самой категории возможного и прилагает ее к понятиям «реальности», «идеи», «знака», «языка» и т.д.

Возможное принадлежит иной модальности, чем действительное, и включает неполную или необязательную реализуемость. Лучший мир должен со-

держать и такие разные вещи, как осуществленные и неосуществленные возможности. Возможности имеют свою собственную реальность, не сводимую к той реальности, приобретаемой по мере воплощения. По мере реализации возможностей утрачивается та реальность, которой они обладали как возможности, что ведет к истощению области возможного. Свойство возможного — оказывать воздействие на действительность именно в меру своей недействительности, невоплощенности. Человек так устроен, что многие его реакции усиливаются по мере перехода явлений в разряд возможных.

Возможное остается возможным лишь постольку, поскольку не может вполне воплотиться, то есть сохраняет в себе зерно невозможного. Возможное жаждет и бежит от воплощения, т. е. становится невозможным именно для того, чтобы оставаться возможным, и составляет философскую двусмысленность, «взрывчатость» данной категории. Возможное, произведя действие, тут же исчезает, ибо, становясь частью действительности, оно перестает быть возможным. Возможное действенно, но недействительно; оно ударяет, не прикасаясь; оно входит в состав бытия, как воздух — в воду, образуя сверкающую и шумную пену «из ничего». Появляясь «ниоткуда», оно исчезает в «никуда». Когда предчувствие или догадка о возможном событии переходит в знание об уже свершившемся событии, исчезают то волнение, надежда, ожидание, которые были связаны именно с возможностью события, а не с его актуальностью.

Возможность всегда оказывала не меньшее влияние на поступки и страсти людей, чем действительность. Потенция сильнее по своему воздействию, именно оставаясь потенцией, так сказать, действуя недействительно. Вера и сомнение, стремление и опасение, чаяние и отчаяние, мужество и трусость, святость и безумие и другие сильнейшие эмоциональные и моральные состояния вызываются не реальным положением вещей, а именно возможностью.

Возможное, отличаясь от актуального, существует только в языке, в возможности говорить о возможном, существуют благодаря нашей способности воспринимать их умственно, концептуально, а не только выражать лингвистически. Место «возможного» в языке — это возможности самого языка, или сам язык как возможность. Возможностными методами можно исследовать самые разные сферы бытия и мышления, включая элементарные частицы, жизнь организмов, поведение человека, развитие общества, исторические события, художественные образы, формы мышления и пр.

Мышление о возможном развертывается в модусе возможного, а само понятие «мыслимого» двухсмысленно. Мыслимое — то, о чем мы мыслим, и то, что мы мыслим, как некое единство предмета и содержания мышления, «подлежащего» и тех многообразных присоединяемых к нему «сказуемых». Мыслимое — возможность мышления, то, что содержится в мысли как ее предмет и одновременно как возможный результат мышления о данном предмете. Мыслимое — ни мышление, ни действительность, это мир возможного, открывающийся мышлению.

Сфера возможного объемнее и многомернее ноосферы и состоит из множества сфер, пересекающихся в каждой точке своего пространства: каждая мыслимость — источник новых мыслимостей (рис. 3).

Рис. 3. Зачарованные миры искусства воображения Жозефины Уолл (Josephine Wall), стиль фэнтези; художница помогает смотреть на мир другими глазами, соединяет реальность и иллюзию, пробуждает воображение и вносит в жизнь взрослых сказочные фантазии детских снов, которые казались давно забытыми [21]

Задача мышления, вытекающая из самого мышления, — расширять границы мыслимого. Возможностный модус мышления предполагает напряжение, в частности, гипотетической мысли. Гипотеза — не первое пришедшее на ум возможное мнение, а предположение, включающее действительное и необходимое, но не сводящееся к ним. Чтобы сделать зримой чистую возможность, гипотезе нужен контрастный фон из неоспоримых фактов и неотменимых императивов. Гипотеза пребывает в мыслимом сверх фактов и сверх логики, но не в их отсутствие.

С «возможным» ассоциируются категории потенциального и вероятного. Первое — внутренняя сторона возможного, свойство предмета, субъекта действия или способности существа. Вероятное — внешняя сторона возможного, совокупность условий степени осуществимости потенции, мера случая, количественный шанс осуществления. Вероятность — степень действительности самого возможного, это возможность, оцененная мерой своей воплотимости в действительность.

Потенциальность характеризует субъекты действия, а вероятность — объективные события. Поэтому категория «возможного» — комплексная, характеризующая переход от одного к другому, от внутренней потенциальности к вероятности внешней реализации.

Мир действительного включает множество возможностей, реализуемых сегодня, завтра, через сто лет и никогда. Возможностями внутри действительности занимаются география, астрофизика, исследующие саму действительность научными методами и строящие прогнозы спроецированными в

будущее. Возможность в этом случае — вероятность, исчисляемая математически. Она утрачивает качественный характер, несводимый к действительности, поскольку исследуется именно то, что делает ее частью действительности.

Возможное объединяется с невозможным через категорию мышления. Мыслимое возможно, поскольку мыслимо, и невозможно, так как неосуществимо иначе, как в мысли. Мышление снимает разницу возможного и невозможного, также как становление — переход между существующим и несуществующим.

Мышление и его отношение к языку — область, где специфика модальности наиболее контрастна. Поскольку знак соотносится с вещью произвольно, то его значение — возможностная связь между ними. Прямое значения слова вероятнее, а переносное, идиоматическое значение — менее вероятно. Слово — потенция вещи, а вещь — актуализация этой потенции. Вещь, возникая из безразличного вещества, формируется и ограничивается словом. Идеи — потенции, переходящие через посредство слов в актуальность вещей: мысль — язык — речь — вещь. Мысль, потенция «размывает», переиначивает и умножает значения слов, вплоть до их противоположности себе.

Мышление заложено в языке как потенциальность последующих актуализаций: мышления — в языке, языка — в речи, речи — в действиях и действий — в вещах. На границе с мыслями и вещами язык представляется процессом конструирования и деконструирования значения знаков, а актуализация мысли в слове — одновременно и потенциация слова, умножения и размывания его смысла.

Семантика возможных миров С. Крипке. В [22] отмечено, что в основе семантики возможных миров — способность человека размышлять над ходом жизни, представлять, как развиваются события и ситуации, предугадывать возможное положение дел в будущем, а, оглядываясь назад, моделировать иной исход уже свершившихся событий. Разум способен изменить детали в конструкторе жизненных событий, дать альтернативу суждению, действию, факту. Ментальное зрение, визуальное мышление уходит за границы реального мира, мира «здесь» и «сейчас». Человек, выходя за грани обыденности, привычного уклада жизни, законов физики и логики, фантазирует о мирах, в которых все иначе.

Большинство исследователей семантики возможных миров отмечают большое влияние на формирование подходов Платона, Аристотеля, Г. В. Лейбница, Д. К. Льюиса, У. Куайна и др. [16; 23].

В отличие от лейбницианских возможные миры Д. Льюиса претендуют на статус онтологической, конкретной действительности, как множества физических миров. Проблемы модальной логики, анализа высказываний, семантики возможных миров соприкасаются с лингвистической сферой: возможные миры и действительный мир регистрируются языковыми средствами, а модальные операторы — главные инструменты семантических построений.

Концепт «возможные миры» вызвал истинный научный интерес в середине XX в., когда С. Крипке и Я. Хинтикка разработали систематическую

теорию модальной логики, использовавшую теорию возможных миров для создания оценочной семантики утверждений о «возможности» и «необходимости». Семантика возможных миров — концептуальная модель, рассматривающая «возможные миры» как семантический примитив.

С. Крипке разработал реляционную семантику как одну из теорий модальной логики. Реляционная семантика строится на непустом множестве, элементы которого — возможные миры специфических условий, состояний, отношений объектов и субъектов и моментов времени. Если классическая модальная логика строится на пропозициях «лжи» или «истины», то в реляционной семантике «истинность» и «ложность» вычисляются для всех постижимых сознанием человека контекстов модальности. При этом в модальном дискурсе исследуется не физическая возможность действия, а его логическая непротиворечивость законам выстроенного мира.

Модальная логика — раздел современной математической логики, имеющий преимущества в исследованиях естественного языка [24] в сравнении с классической логикой, включением в формализмы операторов, перерабатывающих утверждения в утверждения «модальности»: эпистемические *известно, что ...* ; знаю, что … ; *считается*, *что ...* ; *несомненно, что ...* ; *предполагаю, что …* ; *задача имеет решение*, *известно, что задача имеет решение*, *можно допустить, что задача имеет решение*; сослагательные *хочется, чтобы ...* ; *хорошо, когда ...* ; *интересно, что ...* ; *пусть ...* и т. д.; деонтические: *обязательно, чтобы ... , имею право ...* и т. п. со словами *надо*, *нужно*, *можно*, *нельзя*, *рекомендуется*, *желательно* и пр.

Модальности в естественном языке, как правило, представленные наречиями или служебными глаголами, выражают различные оттенки истинности: уверенность, необходимость, доказуемость, осведомленность и др., классифицируемые как модальности необходимого: *необходимо, обязательно, всегда, должно, знаю, доказуемо* и модальности возможного: *возможно, не исключено, иногда, имеет право, предполагаю, непротиворечиво*.

Расширим синтаксис классической логики предикатов, введя два логических оператора: W — модальность необходимого и $\Diamond$ — модальность возможного, при помощи которых разрешается строить формулы вида $\mathrm{W}\varphi$ «необходимо φ», $\Diamond\varphi$ «возможно φ».

Семантика модальных формул многообразна и непроста. Рассмотрим пример. Верно ли, что формула $\mathrm{W}\varphi \to \varphi$ — это закон модальной логики? Если W — модальность времени, «всегда», то $\mathrm{W}\varphi \to \varphi$ — это закон модальной логики: *Если студенты всегда ходят на лекции, то они ходят на лекции.* А вот если W — деонтическая модальность, «должны», то формула $\mathrm{W}\varphi \to \varphi$ уже не может претендовать на статус логического закона: *Если студенты должны ходить на лекции, то они ходят на лекции*.

Определим самое общее отношение выполнимости для модальных формул. Пусть $P = \{p_1, ..., p_n, ...\}$ — множество атомарных формул (элементарных

высказываний). Модальная интерпретация или модель Крипке — это реляционная система $I = \langle W, R, \xi \rangle$, где $W \neq \varnothing$ — множество возможных миров (состояний); $R \subseteq W \otimes W$ — отношение достижимости на W; $\xi : W \otimes W \to \{true, false\}$ — оценка атомарных формул. Система $\langle W, R \rangle$ называется шкалой (фреймом) Крипке. Если $(w, w') \in R$, то возможный мир w' называется альтернативным миром для w.

Пусть $I = \langle W, R, \xi \rangle$ — модель Крипке. Тогда отношение выполнимости $I, w \models \varphi$ формулы φ в мире w модели I определяется так: Если $\varphi = p \in P$, то $I, w \models \varphi \Leftrightarrow \xi(w, p) = true$; 2) $I, w \models \varphi_1 \vee \varphi_2 \Leftrightarrow I, w \models \varphi_1$ и $I, w \models \varphi_2$; 3) $I, w \models \varphi_1 \vee \varphi_2 \Leftrightarrow I, w \models \varphi_1$ или $I, w \models \varphi_2$; 4) $I, w \models \varphi_1 \to \varphi_2 \Leftrightarrow I, w \not\models \varphi_1$ или $I, w \not\models \varphi_2$; 5) $I, w \models \neg\varphi_1 \Leftrightarrow I, w \not\models \varphi_1$; 6) $I, w \models \Box\varphi \Leftrightarrow$ для любого альтернативного мира w', если $(w, w') \in R$, то $I, w' \models \varphi$; 7) $I, w \models \Diamond\varphi \Leftrightarrow$ существует такой альтернативный мир w', что $(w, w') \in R$ и $I, w' \models \varphi$.

В возможных мирах [25] еще большее разнообразие объектов: реально существующие, возможные, невозможные и виртуальные. Они соотносятся с возможными мирами по-разному. Существующий объект — объект действительного мира. Возможный объект — объект возможных миров, но не наоборот: объектом возможного мира может быть и существующий реально объект. Несуществующий (реально) объект может быть как невозможным (*круглый квадрат*), так и возможным (*линия электропередачи без потерь*). Невозможный объект не существует реально и нет возможного мира, в рамках порождаемых миров, в котором имел бы место этот объект.

Объект, задаваемый описанием (дескрипцией), может быть как существующим (*потери в электросетях в 2019 г.*), так и несуществующим, но при этом как возможным (*список линий электропередачи без потерь в 2019 г.*), так и невозможным (*кремниевая солнечная панель с КПД = 100%*). Следует различать понятие объекта существующего и объекта наличествующего: одно дело — объект существует, другое — объект существовал раньше, но об этом известно.

И наконец, объект может быть объектом нашей мысли. Эти объекты не существуют реально, но они наличествуют, имеют в этом смысле «бытие», но не существование. Все объекты рассмотрения независимо от способа их данности наделены наличествованием. Принципиальное отличие виртуальных объектов состоит именно в том, как мы полагаем, что они невозможны ни в каком возможном мире — при любых законах, постулатах, условиях. В этом их отличие от прочих невозможных объектов. Это идеальные объекты, но особого рода. Виртуальные объекты — фикции, за ними не стоят никакие предметы: ни конкретные, ни абстрактные. Поэтому, как бы ни выделялись

условия, установки, виртуальные объекты не есть возможные объекты, объекты возможных миров. Это «объекты-привидения». Они — наличествующие объекты теорий, объекты рассмотрения в них. В языке они репрезентируются дескриптивными, десигнативными выражениями. Идеальные элементы Д. Гильберта — пример виртуальных объектов, заведомо не реализуемых ни при каких условиях и вводимых как фикции для целостности, согласованности теории.

Таким образом, Крипке констатирует «возможные миры» как некую потенцию, находящуюся исключительно в сфере ментальности, объяснительную теоретико-познавательную конструкцию или фикцию. В семантике Крипке реальный мир — один из множества логически возможных миров, а последние — некоторые абстрактные понятия, служащие для интерпретации закономерностей действительности.

«Возможные миры», безусловно, лишены статуса реального существования, это предположительное состояние наличной реальности. В основе семантики возможных миров — способность человека моделировать альтернативные наличной реальности варианты событий. «Возможный мир» — это множество высказываний, описывающее все факты онтологически возможного мира.

Эпистемические логики — разновидности модальных логик, изучающие модальности знания и мнения (веры) идеализированных агентов. Интерес представляют вопросы о том, какими знаниям располагает субъект, насколько он осознает свои знания (и незнания), и какие причинно-следственные связи возникают между утверждениями, касающимися вопросов знания и веры. В эпистемической логике модальный оператор $W\varphi$ следует прочитывать «*Я знаю, что* φ», а $\Diamond\varphi$ — «*Я допускаю, что* φ ».

Основные законы (аксиомы) эпистемической логики: 1) Аксиома адекватности знания: $W\varphi \to \varphi$ «*Мои знания верны*»; 2) Аксиома позитивной интроспекции: $W\varphi \to WW\varphi$ «*Я вполне представляю все, что мне известно*»; 3) Аксиома негативной интроспекции: $\Diamond W\varphi \to W\varphi$ «*Я вполне сознаю, что именно мне неизвестно*». Но чаще всего возникают задачи, когда коллектив субъектов, мультиагентная система пытаются совместными усилиями или в конкурентной борьбе достичь какой-то цели. В таком случае каждый агент должен принимать в расчет не только знания о предметной области, но и представления о том, какими знаниями располагают другие агенты.

Семантика возможных миров — выражение интуитивной идеи о том, что агент может строить, используя подходящий язык, различные, логически возможные модели мира. Обычно агент не знает, какая из этих моделей «правильная», т. е. полностью согласуется с реальным миром, однако, получая информацию о реальном мире, он исключает из списка возможных модели, не совместимые с этой информацией. Чем короче список оставшихся возможных моделей мира, тем меньше неопределенности в знаниях агента, т. е. тем больше он об этом мире знает [27].

Возможные миры Крипке применимы к моделированию сложных рассуждений одного субъекта, в случае принятия решения в ситуации риска, продуцирования текста рекламного/медийного сообщения, а также имитации коммуникацию между несколькими агентами в ситуации коллективного решения задач, сотрудничества, конфликтов.

Такой подход назван в [28] логическим прогнозированием практических ситуаций. В результате прогноза получается набор возможных вариантов завершения коммуникации. Если решения принимаются в условиях отсутствия полной информации о начальных этапах развития анализируемой ситуации, а необходимо знать истоки анализируемого поведения для создания прогноза, то можно моделировать варианты прошлого развития событий. В итоге может быть получен древовидный универсум, ветвящийся в будущее и прошлое. «Ветви» вариантов развития событий в будущем и прошлом могут рассматриваться как возможные миры.

Мир восприятия и водной логики Э. де Боно [29]. Однажды маленькому австралийскому мальчику Джонни друзья предложили на выбор однодолларовую и двухдолларовую монеты (первая больше по размеру). Джонни выбрал первую. Друзья развеселились и сочли его дурачком. Они часто повторяли эксперимент и Джонни всякий раз ошибался. Однажды прохожий, наблюдавший происходящее, пожалел Джонни и, отведя его в сторонку, объяснил ему, что маленькая монета в два раза ценнее большой. Джонни внимательно выслушал, а затем сказал: «Я знаю. Но сколько раз они дали бы мне монеты, если бы я выбрал двухдолларовую монету в первый же раз?» … Компьютер со способностями выбирать объекты разной ценности, «взял» бы двухдолларовую монету с первого раза. Человеческое восприятие позволило Джонни разглядеть выгодную перспективу: возможность повторения сделки и возможность получить больше однодолларовых монет, разумеется, в условиях риска.

Восприятие отличается от традиционного понятия логики. Можно сказать, что восприятие — единственная реальность для человека. Это реальность, «секрет», которым он нечасто делится с окружающими, но она может и не точно соответствовать происходящему в мире.

Недостаток интереса, например, в ИИ к восприятию объясним: экспертам и ученым хочется избежать неясности, ассоциируемой с восприятием, и иметь дело с определенностью истины. Внутренний мир восприятия ситуативно различен, оно индивидуально и может не соответствовать тому, что происходит во внешнем мире. Восприятие — способ организации мозгом информации, получаемой им из внешнего мира посредством органов чувств. На это влияет эмоциональное состояние человека и одни шаблоны, стереотипы восприятия предпочитаются другим. Информация о текущем ситуативном контексте в краткосрочной памяти и о том, что ей предшествовало, также влияет на восприятие.

Великий русский ученый Д. И. Менделеев сказал: «Наука начинается там, где начинают измерять». Измерение — удачный способ преобразования восприятия в конкретное, осязаемое и незыблемое. Математика, по сути, способ избежать неопределенности восприятия, переводимого на язык бессодержательных символов и закономерностей. Она переносит исследователя в ее собственный «игровой мир» со своими правилами поведения. Играя в эту игру совершенно серьезно, исследователь в конце концов переводит результат на язык реального мира. При соблюдении правил математики, и, если перевод с языка на язык сделан правильно, метод работает прекрасно.

«Измерение» высказываний языка — большой вклад в логику Платона и Аристотеля. Их усилиями каждое слово в языке получило определение и стало таким же реальным, конкретным и объективным, как нечто подвергнутое измерению. Это позволило построить мир серьезной игры по правилам соединения слов вместе и строить словесные умозаключения. Во многом игра основывалась на спецификации объектов (см. выше модель мира Платона и Аристотеля): данная вещь «есть» или «не есть» нечто.

Принцип противоречия постулировал, что нечто не может «быть» и «не быть» чем-то одновременно. Принадлежность, включение, исключение, категоризация, классификация, типизация, устранение противоречий — это операции традиционного логического мышления, похожего на работу кладовщика, упорядочивающего и раскладывающего все по «ячейкам», «ящикам» и «полочкам».

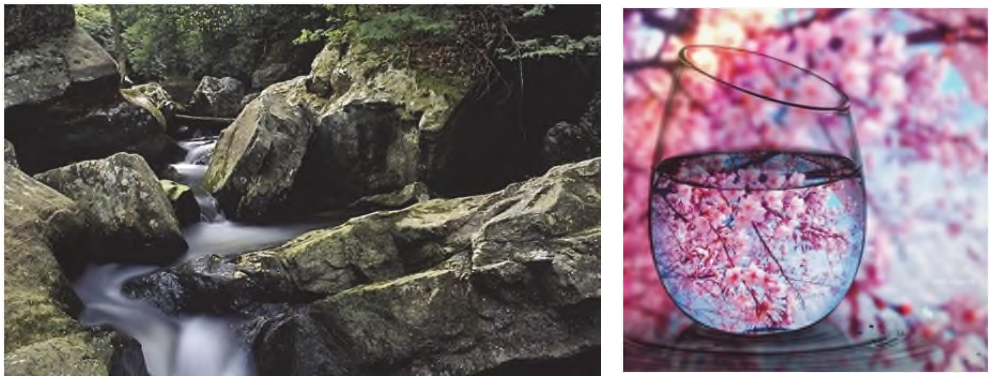
Исходя из модели мира Платона и Аристотеля построены многие знаковые системы языка, логики, ведения спора, критического мышления, мыслительные привычки. При этом человек научился судить о вещах, находить истину, обретать уверенность в логике вещей, что прекрасно «работает» в технике, позволяя вычислять, и веками «справлялось» с человеческими отношениями.

Однако «логика» модели мира, верований и убеждений Платона и Аристотеля — веками существовавшая тенденция «бежать» в область мышления из мира восприятий и «отдать» их искусству. Здесь Э. де Боно, «отец мышления о мышлении» формулирует важный принцип: «Когда Вы выбрали для себя способ, посредством которого Вы смотрите на мир, тогда Вы сделаете все, чтобы Ваши убеждения и верования соответствовали именно такому, а не другому взгляду на мир».

У восприятий не бывает «игровых» истин. Вся истина в сфере восприятия — истина двоих человек, утверждающих, что каждый говорит правду. Это истина, основанная на опыте: «Мне кажется», «Насколько я могу судить», «По своему опыту знаю». Во внутреннем мире восприятия нет прочности и постоянству.

Э. де Боно вводит для логики модели мира Платона и Аристотеля метафору «каменная логика» (рис. 4, *а*). Камень тверд, тяжел, прочен, конкретен, не меняет формы от обстоятельств, постоянен, его трудно сдвинуть с места,

это орудие нападения и агрессии. Если добавить к камню камень, получится два камня. Каменная логика часто имеет дело с противопоставлением, различием объектов, обозначенным частицей «но». Спор в стиле западного мышления основан на конфликте сторон, рассуждающих на модели мира Платона и Аристотеля.



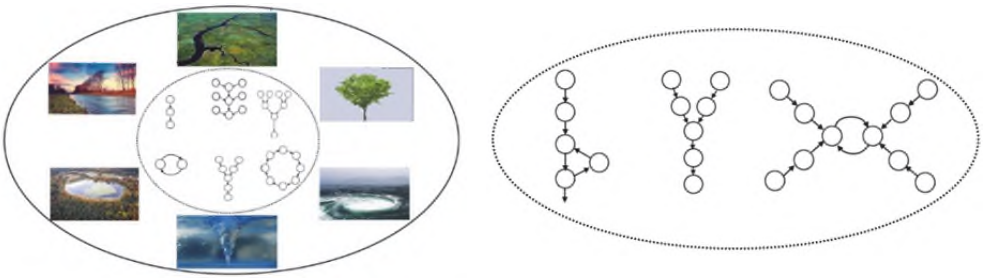
а *б*

Рис. 4. Мир восприятия и водной логики Э. де Боно:
а — «вода и камень, вечная борьба» — камень прочен, конкретен, постоянен — метафора логики Платона и Аристотеля, в основе которой слово «есть»;
б — вода — структура аморфная, не имеющая острых краев, легко принимающей форму сосуда — метафора водной логики Э. де Боно, основанной на слове «куда»

Однако больше времени люди имеют дело не с математикой и логическим анализом, а с внутренним миром восприятия, основанным на другой, в метафоре Э. де Боно, «водной логике» (рис. 4, *б*). Вода течет. Она — структура аморфная, не имеющая острых краев, она мягка и податлива, без формы, но легко принимает форму сосуда, в который ее наливают. Если человек «нападает» на воду, она не сопротивляется, но может и потопить нападающего. Добавляя воду к воде, двух вод не получится, новая вода смешается со старой. Пролитая на плоскую поверхность вода растечется и «разведает» каждую щель. При малейшем уклоне вода потечет. Поэтому водная логика основана на словах «куда», «в направлении к», здесь «царствует» частица «и»: как из частей образуется целое? Куда это перетекает? К чему это приведет? Что будет суммой всего этого? Что произойдет затем? Каким будет следующее событие? Нестабильная система может стать стабильной, и наоборот. Одна вещь ведет к другой.

В основе водной логики — словосочетание «в направлении к» и концепция «потока», ведущего к стабильным петлям (рис. 5, *а*). Стабильная петля — это не то же, что есть «истина» в модели мира Платона и Аристотеля, это правополушарный прагматизм того, «куда» ведет проблемная ситуация, однако доминирование левосторонней каменной логики вернет к вопросу:

«Верно ли это?» Водная логика релевантна целевому поведению системы управления. Понятийно-концептуальный аппарат водной логики: «операция», «деятельность», «действие», «движение» к цели.



а *б*

Рис. 5. Мир восприятия и водной логики Э. де Боно:
а — перцептивные изображения, линейная цепочка, спокойный участок; речная долина (система); дерево; воронка; стабильность; круговорот (внешняя окружность) и из схематизированные представления (внутренняя окружность, словарь языка потокограмм); *б* — составные схематизированные изображения: питающая цепь и стабильность; две воронки и стабильность; воронка и водоворот, языка потокограмм

Анализ данных сам по себе не рождает идей, а позволяет выбрать из существующих понятий и мыслей. С ростом значения гипотез, умозрительных построений, подходов к генерации идей, все большая роль отводится провоцированию и моделированию, позволяющих по-разному смотреть на окружающий мир. Рамки вероятных исходов создаются в процессе восприятия, где нет противоречия и можно одновременно придерживаться противоположных взглядов. Может иметь место и дисгармония, когда что-нибудь не вполне соответствует нашим ожиданиям. Аддитивное свойство водной логики напоминает «нечеткую логику», широко используемую в ИИ.

Фундаментальные аспекты восприятия: узнавание, центрирование и подготовленность. Если одновременно имеют место два восприятия, тогда по ряду причин (отдаленное и недавнее прошлое, эмоции и т. д.) одно из них будет доминировать над другим и возникнет эффект «сдвига внимания». Стабильные восприятия формируются во внутреннем мире экспертов вне зависимости от входящей информации. Как только потоки восприятия сформировались (водный поток проложил русло), человек видит мир определенным, соответствующим системе убеждений и ценностей (модели мира) образом. Поэтому ключевая операция восприятия — «поток», когда одно событие вытекает из другого. «Потокограммы» — графическая наглядная модель восприятия. Глядя на потокограмму, эксперт, как на картине или карте, видит модель своего мышления во внутреннем мире. Это похоже на ситуацию, когда эксперт «вышел» за пределы своего мышления и смотрит на этот процесс со стороны (находится в рефлексивной позиции по Г. П. Щедровицкому).

Увидев, поняв, разобравшись в ситуации, эксперт примет решение и сообщит о своих действиях объекту управления, и (или) изменят что-то каждый в своем внутреннем мире.

Потокограмма — снимок восприятия эксперта в текущее время, это гипотеза, предположение, она создается, чтобы понять собственные восприятия, понять «самого себя», образ того восприятия, какое есть, а не какое оно должно быть. Потокограммы составляются для индивидуального или для коллективного принятия решений.

На потокограмме есть точки особого внимания эксперта — коллекторы, узлы, стоки, важные элементы, возможные решения проблемы (рис. 5, *б*). Другие элементы «перетекают» в эти точки. Потокограмма должна содержать минимум одну стабильную петлю, «стабильное состоянии», обеспечивает стабильность восприятия в отношении проблемной ситуации. Рано или поздно все другие состояния перейдут в петлю. Стабильность — это «пауза», когда нечто сохраняет свое текущее состояние лишь на время обнаружения и высказывания.

Имея потокограмму, можно повысить эффективность работы над проблемой, увидеть деликатные моменты и перспективные направления действия.

Потокограмма составляется и используется по шестишаговой процедуре: формулирование проблемной ситуации; составление списка потока сознания (списка свободных ассоциаций: аспектов, идей, образов, факторов); именование элементов списка заглавными латинскими буквами); построение потока (определение «куда» «перетекает» элемент); изображение, вычерчивание потокограммы; исследование потокограммы, ее свойств, фокусирование внимания и принятие решений о направлении действий.

Пример применения метода потокограмм к проблемной ситуации роста затрат на здравоохранение. Список потока сознания, составленный Э. де Боно: ***A*** ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ ***B***; ***B*** МЕДИЦИНА МОЖЕТ БОЛЬШЕ И БОЛЬШЕ ***D***; ***C*** ПОСТОЯННЫЙ РОСТ ОЖИДАНИЙ СО СТОРОНЫ ОБЩЕСТВЕННОСТИ ***D***; ***D*** ТРЕБОВАНИЯ К ЗДРАВООХРАНЕНИЮ ***F***; ***E*** ЗАТРАТЫ НА ПЕРСОНАЛ ***Q***; ***F*** ГЕРОИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА ***G***; ***G*** ЖИЗНЬ ЛЮБОЙ ЦЕНОЙ ***O***; ***H*** ПОЛИТИЧЕСКИЙ ФУТБОЛ ***R***; ***I*** СТРАХОВКА ОТ ВРАЧЕБНЫХ ОШИБОК ***T***; ***J*** ЛЮДИ ЖИВУТ ДОЛЬШЕ ***K***; ***K*** ХРОНИЧЕСКИЕ БОЛЬНЫЕ ***G***; ***L*** КОММЕРЧЕСКАЯ ЦЕНА НА ЛЕКАРСТВА ***Q***; ***M*** ОСОЗНАНИЕ ЦЕННОСТИ ЗДОРОВЬЯ ***C***; ***N*** НЕТ МЕСТА ДОМА ***D***; ***O*** ВЫСОКАЯ СТОИМОСТЬ ПОСЛЕДНЕГО МЕСЯЦА ЖИЗНИ ***F***; ***P*** ЗАТРАТЫ НА ТЕСТЫ ***B***; ***Q*** ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СДЕРЖИВАЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ОТСУТСТВУЮТ ***G***; ***R*** НЕТ ПРЕПЯТСТВУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ***H***; ***S*** РОДСТВЕННИКИ ОСОЗНАЮТ СВОЙ ДОЛГ ***G***; ***T*** ЗАРПЛАТА ВРАЧЕЙ ***E***.

Окончательная потокограмма приведена на рисунке 6.

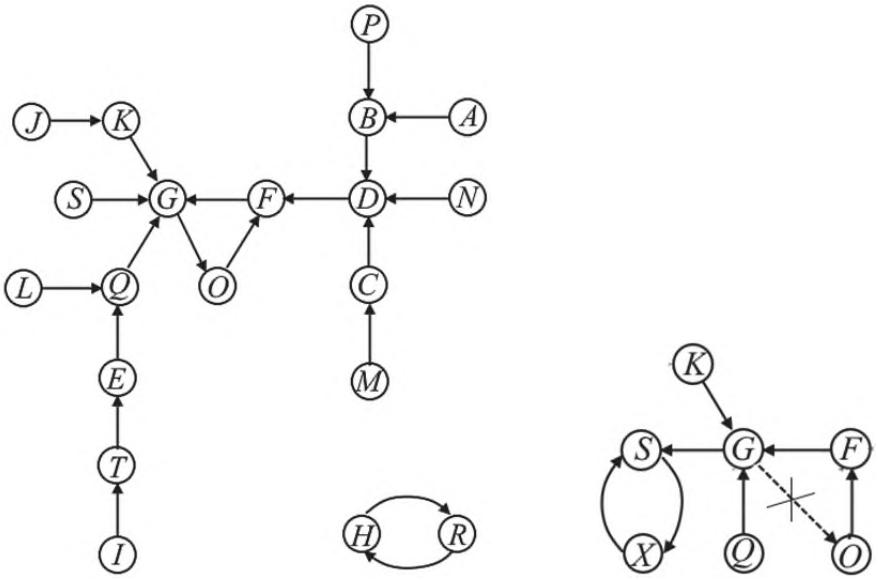


Рис. 6. Потокограмма для выработки рекомендаций
в проблемной ситуации роста затрат на здравоохранение

Особого внимания заслуживает факт наличия двух петель. Изолированная петля *H*—*R* означает, что механизм, препятствующий росту затрат, отсутствует, и имеет место «политический футбол»: снижение затрат возможно в частном здравоохранении и попытка урезать госдотации вызовет протесты. Эта петля, возможно, самая важная. Петля *F*—*G*—*O* отражает идею спасения жизни любой ценой и понятие «последний месяц жизни». Точка *D* — мощная точка стока: она отображает требования к здравоохранению. По мере развития науки растут и ожидания людей, и новое должно быть доступно всем. Спрос на медицину безнадежного положении, скорее всего, будет повышаться. Точка *Q* — еще одна точка стока. Цена не сдерживает родственников. Общие затраты правительства — также не сдерживающий фактор, поскольку, если вы или ваш ребенок заболели, в общей сумме затрат на здравоохранение расходы на вас просто теряются. Фактор вины и долга *S* важен, поскольку ведет к точке *G* — ЖИЗНЬ ЛЮБОЙ ЦЕНОЙ. Если предложить концепцию РАЦИОНАЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ (*X*), тогда потокограмма изменилась бы только в одной своей (относящейся к делу) части, как показано на рисунке 6 справа. Видно, что петля *F*—*G*—*O* разорвана и возникла новая — *S*—*X*: родственники могут реализовать чувство долга перед больным, не ощущая вины, благодаря новой концепции РАЦИОНАЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ, введение которой — пример вмешательства в характер движения внутри потокограммы.

Модели мира Т.П. Григорьевой (текст этого раздела сохранен максимально близким к авторскому, в отдельных местах сокращен и приближен к

терминологии информатики, что позволило избежать многочисленных кавычек). Советский и российский востоковед, доктор филологических наук, профессор Т. П. Григорьева ввела и обосновала [29] три условные модели мира: «белое *или* черное» — европейская модель; белое *станет* черным — китайская модель; белое и *есть* черное — индийская модель, увязав их с тремя моделями развития: предельно динамичной со взрывом одной структуры за счет столкновения противоположностей и заменой ее другой, европейской; умеренно динамичной с развитием за счет перехода одной противоположности в другую, китайской; внутренне динамичной, индийской моделью. Различия этих моделей достаточно глубоки и рассмотрены ниже, но первое, на что обращено внимание курсивом, — это использование в первой модели логической связки *или*, во второй — глагола, части речи, описывающей действие, *станет* и в третьей — *есть*, формы настоящего времени глагола «быть», используемой в качестве связки.

Греческая модель «белое или черное», «парадигма квадрата» (рис. 7, *а*). Греки шли от Земли, не сомневаясь, что она центр мира. Небо было униженно, оказалось вторичным по отношению к Земле, возник геоцентризм и привычка искать истину в столкновении сторон. С точки зрения западного человека, целое — это единица — 1, в основе его мышления лежит идея «бытия» («есть» — 1): бытие есть, а небытия нет. Уже в Ветхом Завете заметна дихотомия: разделять небо и землю, свет и тьму, человека и природу. Сознание людей, выработав устойчивый шаблон дихотомии (дуальность мира), отторгло Небо от Земли и Свет от Тьмы, а ум «склонился» к «истина-ложь» аристотелевской сущности. Сохраняясь веками в глубинах сознания, дуальность вела к антиномии «природы» и «благодати», природы и человека, духа и плоти, чувства и разума, добра и зла. Греки уверовали, что в основе мира — что-то одно — часть вместо Целого, что обусловило их одномерное мышление на множестве.

Рис. 7. Символизм моделей мира Т. П. Григорьевой:
а — символ «квадрат» греческой модели мира «белое или черное»;
б — символ «круг инь-ян» китайской модели мира «белое станет черным»;
в — символ «пустой круг» индийской модели мира «белое и есть черное»;
г, *д* — символы «точка» и «линия» сингулярной модели мира

Греки полагались на явленное, обозримое, подтверждаемое опытом или доказуемое логически. Их потребность в квадрате объяснима неприятием

бесконечности, неопределенности, представлением об изначальном Хаосе и желание от него оградиться, создать свой упорядоченный мир и обрести устойчивость. Квадрат конечен, его нет в Природе и в природе самого человека, это его искусственное изобретение. Четверица греков (Qua-ternitat, архетип, логическая предпосылка целостного суждения, например, для описания горизонта в целом нужно назвать четыре стороны света) и унаследовавших их парадигму, тяготеет к квадрату, противостоянию сторон и крутому повороту. Квадрат не вечен, он как символ замкнутой системы давал временные преимущества: сконцентрировать силы, полагаясь только на себя, достичь максимума изобретательности в искусственных лабораторных условиях. Сжатость энергии в огражденном пространстве придавала динамику процессам. Но он закрывал человека от Неба. Динамизм греков вынуждал не оглядываться назад, что чревато односторонностью, утратой устойчивости и вместе с тем — прорывом в сфере науки и искусства. На Западе душа убывает, заменяясь усовершенствованием государственных форм, полицейским благоустройством; совесть сменяет закон, внутренние побуждения — регламент, благотворительность превращается в механическое дело. Западный «материальный прогресс» привел к умственной деградации. Рассудок — сила разлагающая, разум — дробящая, если он не подключен к сердечному знанию. Оттого Запад и сеет раздор вместо согласия, доступного истинному знанию, высшей интуиции.

Человек вообразил себя «богоравным», творцом мира, способным постигать и исправлять его законы. Квадрат способствовал взлету греческой цивилизации, но и имел роковые последствия. Греческие философы признали «борьбу», «власть» законом Бытия и предпочли путь Аристотеля, выделявшего из единого содержащиеся в нем противоположности. Замкнутость, статичность неизбежно рождала у человека желание преодолеть невидимые стены. Отсюда взрывчатость, скачкообразность движения: квадрат, сковывающий энергию, время от времени неизбежно разрушается, но каждый раз самовосстанавливается, так как укоренен в сознании. Признание точки отсчета, одного начала — Воды, Огня, Воздуха Числа Пифагора — порождало причинно-следственный ряд, линейное, дискурсивное мышление, закон «исключенного третьего». Метод аналитики получил приоритет в науке и психологии. Линия рассекла всё на две половины: субъект — объект, человек — природа, сущность — существование. Место Целого заняла логика Аристотеля, и Сознание стало делить мир на субъекты и объекты и, следуя собственной логике, само превратилось в объект. Линейное мышление устремлено вперед, обгоняет пространство и время, отсекает одну половину от другой: прошлое от настоящего, разум от чувства, дух от материи, что не могло не деформировать сознание. В последние два века доминировала наука, стимулируя развитие левого полушария, логического, математического, в ущерб правому. И «распалась связь времен», как взаимодействие правого, ответственного за целое, и левого полушария, ответственного за раздельное. Уже в «Мифах

древней Греции» заложен закон противоречия, жесткой связи противоположностей, соединяемых волей человека. Целое все более оттеснялось частью, что и заставило философов заговорить о «тирании целого», об опасности, которую таит в себе одномерное мышление. Прямая линия, утратив опору в круге, в спирали, предоставленная самой себе, образует нечто вроде петли, затягивающей в воронку. Литераторы заговорили об отчуждении человека от самого себя, об «атомизации» личности вместо ее раскрепощения.

Итак, греки создали «вторую природу» и сделали это настолько искусно, изящно, что побудили западную половину человечества идти по своим следам вплоть до XX в. Но в XX в. квадрат, сколь ни держалось за него помраченное сознание, изжил себя, утратил силу и вышел из подсознания. «Если логично, значит, истинно» — аксиома, владела умами до XX в., пока А. Эйнштейн не усомнился: «Если быть абсолютно логичным, ничего нельзя открыть». Квадрат начал «терять опору».

Китайская модель «белое станет черным», парадигма круга. Китайцы шли от Неба, от небесного Пути, предопределяющего Путь человеческий. Структурирующее начало китайцев пятерка — символ подвижного круга, при наличии единого Центра. В пределах круга вращаются первоэнергии. Между Небом и Землей нет разрыва, энергия постоянно циркулирует между ними, небесный круг придает земному квадрату круговое движение. Небо рождает «образы», а мудрецы передают их смысл. Высший дух изображают кругом с двумя полуизогнутыми половинами: темной — инь со светлой точкой ян и светлой — ян с темной точкой инь (рис. 7 , *б*). В потенции чистые, легкие ян, поднимаясь кверху, образуют небо, а нечистые, тяжелые инь, опускаясь вниз, образуют землю. Мудрые установили Путь неба: Тьма и Свет; Путь Земли: Податливость и Напряжение; Путь человека: Любовь и Долг. Луна — темное начало — инь, олицетворяет холод, покой, податливость и т. д. Солнце — светлое начало — ян, олицетворяет тепло, движение, напряжение. Два начала присутствуют во всем, внутренне присущи любому предмету (процессу)-явлению. Предметы для развития не нуждаются во внешнем воздействии, источник движения внутри — во взаимодействии инь-ян. Такое представление об абсолюте держится на полном доверии Природе. Всеобщий принцип развития: Единое рождает два, взаимодействуя, они образуют третье. Взаимочередуемость инь-ян — закон мироздания. Одно присутствует в другом, как в зародыше, который, пребывая в покое, всему дает жизнь. Все едино и единично одновременно, нераздельно и неслиянно, одно не существует за счет другого, все согласуется: земное с небесным, человеческое с природным, физическое с психическим и этическое с эстетическим. Перемены совершаются по кругу, следуя друг за другом. Всё по природе своей не только двуедино (инь-ян одновременно), но и троично: имеет свой центр, благодаря которому сообщается с высшим духом. Сопряженность с Высшим духом позволяет инь-ян не распадаться, не превращаясь в «двоицу», сохранять целостность.

Китайская философия связана с явлениями природы: произрастанием растений, сменой времен года, убыванием и нарастанием света и тьмы. Всё появляется из небытия и, совершив круг развития, возвращается в небытие. Абсолют пребывает в полном покое, но благодаря его неподвижности всё развивается. Покой — главное в движении. Абсолют — центр круга, его единственно неподвижная точка. С пятью элементами природы сообразуются пять человеческих постоянств: человеколюбие, справедливость, благожелательность, мудрость и искренность. В потенции все уже есть, поэтому нет принципиальной разницы между прошлым, настоящим и будущим: то, что будет, в неявленной форме уже есть. Такое понимание мирового процесса, естественно, привело к особому отношению к самим вещам. Так как в потенции все уже есть, то не нужно ничего творить, нужно не столько выявлять, сколько не мешать выявиться. Отсюда отсутствие стремления создавать что-то принципиально новое, недоверие к новшествам, к движению вперед. В Китае признан «нетворческий метод»: художник стремится не «сделать» вещь, а не нарушить природу вещи. Изначально отсутствует силовой момент, вмешательство в естественный ход вещей. Принцип взаимотяготения резонирующих друг на друга вещей китайцы усовершенствовали, разработав уникальное учение о мире как «едином континууме». Одни и те же элементы в разных системах мышления ведут себя по-разному. В китайском языке каждый знак (иероглиф) интравертен, все части единого организма свободно взаимообслуживают друг друга.

Китайский образ мышления выработал свой взгляд: движение происходит не за счет столкновения противоположностей, а за счет постепенного перехода одной в другую. В круговорот инь-ян включается то, что с логической точки зрения несопоставимо, вещи разного порядка, положим, физическое и психическое, духовное и материальное, внешнее и внутреннее, макро- и микромир — все оказывается взаимообусловленным, подчиненным единым законам. Движение и покой взаимопроницаемы, друг без друга не существуют (инь — покой, ян — движение), т. е. в движении присутствует покой, в покое — движение. На уровне единичного каждая вещь возвращается к своему началу; возвратившись к своему началу, достигает покоя; достигнув покоя, выявляет свою сущность; выявив свою сущность, приобщается к постоянству, к высшему состоянию всеединства. Круг нельзя разъять. Всё происходит в пределах одного круга, который одновременно и светлый, и темный, и нет нужды выходить из него, выпадать из естественного мира. Иероглифическая письменность сопряжена с нелинейным мышлением: восходящая вертикаль соединяет Землю с Небом, каждый знак — с Единым. Нет линейности, закрытости, все многомерно, движется туда-обратно и по вертикальной оси по типу двойной спирали. Такой пульсирующий ритм сказался на образе мышления, тональности языка, манере поведения, походке китайцев. По китайской традиции не наука и техника, а Путь, моральный Закон Вселенной ведет к совершенству.

По китайским учениям о мире и о себе ничто не исчезает, сосуществует, совозникает; пребывая в невидимой форме, воздействует на текущие события и поступки людей. Когда инь-ян, две стороны одного (небесное-земное, покой-движение, женское-мужское, восток-запад), находятся в правильном отношении, не подавляя друг друга, то рождается третье — вертикальный вектор. Третье измерение преображает сущее, соединяя двоицу единым центром, придает всему целостный характер. Благодаря целостности одно сообщается с другим в духе.

Особенность китайской структуры мышления в том, что всё существует не столько в последовательном порядке, сколько в параллельном, одновременном, не только взаимно чередуется, но и взаимопроникается, совозникает. Принцип причинности не имеет для китайцев такого значения, как на Западе. Для них главное случайность и синхронность. При целостных свойствах — целостно тело. При целостном теле — целостен ум. Целостный ум — Путь мудреца. Целый человек ничто ничему не противопоставляет, не вступает в сговор. Нет того, что он воспринимал бы как чужое; не отделяя себя от мира, ощущает его обителью, где каждому есть место. Не столько разум свидетельствует о человеке, сколько «благое сердце».

Индийская модель «белое и есть черное», «парадигма пустого круга». Мудрецы Востока в учении Махаяны признавали один вид устойчивости — неустойчивую устойчивость: нечто может быть устойчивым, если постоянно меняется в согласии с вселенским ритмом. С точки зрения Махаяны, целое — это ноль. В основе буддийского мышления лежит идея «небытия» («не есть» — 0). Ноль — это ничто и всё, пустота и полнота, небытие и потенциал бытия, в нем уже все заложено: то, чему приходит время появиться, появляется, то, чему приходит время уйти, уходит, но все уже есть, и потому о нем можно иметь представление. «Не-есть» — невыявленное, неставшее, пребывающее в небытии. Графически ноль, круг — соответствует целому, пустому, незаполненному кругу (рис. 7 , *в*). Для буддийской Индии символична шестерка — «шесть зерен»: известные «элементы» пронизаны шестым — сознанием. Знак завершенности — пустой круг, символ Пустоты, просветленности, осознания относительности всех различий.

С точки зрения буддизма, Абсолют недуален, противоположности в нем слиянны, ассоциируются с нолем, а феноменальный мир — процесс, развивающийся в двенадцатичленном круге бытия, притом весь круг возникает одновременно: ни один из членов не предшествует другому, все двенадцать находятся в непосредственной зависимости друг от друга. Истинно сущее расходится от центра концентрическими кругами по двенадцатичленной формуле бытия: незнание — источник всех страданий, возбуждает желание, рождается сознание, имя и форма, осознание органов чувств, стимулятор органов чувств, сами чувства, половое влечение, чувство собственности, становление, рождение, старость и смерть, которые опять порождают незнание. Незнание — первопричина круговращения, порождает привязанность к соб-

ственному «я», жажду жизни, обусловливая карму, ведущую человека по пути рождения, старости и смерти. Одновременно с ней возникают и все остальные одиннадцать сегментов круга. Механизм жизни в буддийской концепции сводится к предубеждению против движения как такового. Само движение расщепляется на отдельные мельчайшие отрезки, вспышки. Буддийская динамика выработала понятие прерывного течения потока. Одна из основных идей буддизма: все существующее преходяще, наполнено страданием и лишено реальности. Каждая вещь, каждое существо имеет свое сердце, душу, что делает его равным другим существам и всему миру. Нет места возврату, все устремлено к покою, к преодолению движения, полное отрицание противоположностей, признание которых — плод неведения. Белый, пустой круг — символ абсолютного покоя — олицетворяет недуальность. Строго, если развернуть картину, получатся два круга: пустой и заполненный, белый и черный, но так как второй иллюзорен, нереален — двойник, тень истинного мира, он не принимается во внимание.

Буддизм признает реальность Небытия — истинного мира, пребывающего в своем подлинном виде, свободно, естественно. Мир бытия — ограниченное, временное, эфемерное проявление единого. Видимый мир — набегающая волна вечного океана, мгновенное проявление мира невидимого. В Махаяне связь — взаимная нейтрализация, сведение к нулю. Противоположностей нет, акцент на их относительности, «пустотности»: свет и есть тьма, белое и есть черное, сила и есть слабость. Идея о тождестве бытия и покоя, или эмпирического и абсолютного, истинно-сущего — центральная идея позднейшего буддизма. Буддизм не оставляет простора для движения, возникающего за счет чередования противоположностей внутри системы. Абсолют — истинно сущее, основа вселенной, не подлежит закону причинного возникновения, не имеет начала и, стало быть, не имеет конца, не создается и, стало быть, не уничтожается, не имеет формы, но все оформляет. Каждая вещь содержит в себе абсолют, который, излучая из себя бытие, порождает феноменальный мир. Так как в потенции все уже есть, то не нужно ничего творить, нужно не мешать выявиться.

Психофизическая картина мира структурирует сознание, поэтому учение Будды ориентировано на сознание, на психику: мир есть мысль. Восточный путь можно изобразить волной, иногда затишьем. Восточная культура сопоставима с правополушарной, более древней, следующей закону Единого, явленного в единичном, которой соответствует образное, «иероглифическое» мышление.

Буддийский «просветленный» человек оказывается в центре круга с сознанием созерцающего, проходящего через мир, лишенный форм, достигающего центра «колеса бытия», чтобы распроститься с этим миром. Буддисты понимают Путь к «спасению», как Срединный (нулевой), как полное снятие противоположностей, а учение о Срединном Пути отождествляют с учением о пустоте. В Махаяне нечего уравновешивать, согласно ее учению, все есть

Пустота, все настолько относительно, что невозможно говорить о равновесии или гармонии — нет того, что можно уравновешивать. При достижении абсолютного покоя связи с этим миром прерываются, элементы жизни не исчезают, а успокаиваются.

Возникшая на буддийском Востоке логика, называется логикой Небытия, логикой Целого — целостного Разума, Мудрости. Логика Небытия есть логика абсолютной непредвзятости и непротиворечивости. Логику Небытия называют еще «тройственной», или «трехполюсной», ибо она предполагает не «два», а «три»: преодоление двойственности и выход на уровень Триединого, где нет противоречий. Не выделение чего-то одного, а видение Целого, что доступно интуиции, единству чувства-разума и выражается языком символа. Это не столько логика познания, сколько логика переживания, «глубинного созерцания в состоянии Ничто», в «чистом опыте», когда нет посторонних мыслей, неразличимы субъект и объект; разум, чувство, воля — все едино.

Буддизм в Японии неоднороден и аналогичен школам Кореи и Китая. По мнению современного философа Т. Хэйдзи, логика «диалектики абсолютного ничто» более всего соответствует традициям национального мышления японцев. Тип связи «Одно во всем, и все в Одном» порождает «трехполюсную» японскую логику — хранителя единства разного, порождающая созерцательно-творческую культуру, создающей духовное поле, «пространственную цельность». В ней нет дихотомии — «белое или черное». «Белое» в одном отношении может быть «черным» в другом. Единство достигается не соединением элементов, а их переходом на новый уровень.

Японский путь — это Путь Равновесия и заложенная в сознании программа Троичности: помимо движения по горизонтали (туда-обратно), восхождение по вертикали, обусловленное правильным взаимодействием сторон. Нет разрыва между трансцендентным и имманентным, единое выражается в мгновенных вспышках единичного. В японском мировоззрении есть десять взаимопроникающих миров, или уровней сознания: низший мир ада — предел страданий живого существа; мир голодных духов — алчности, неутолимого желания; мир скотов — животных инстинктов; мир демонов — агрессивности; наивысший мир человека — сфера гуманности. Затем идут высшие миры: мир небожителей, мир слушающих голос и идущих самостоятельным путем; мир Будды, пронизывающий остальные миры. Все уровни сознания сопряжены, человек может подниматься по этим ступеням или опускаться. Слова не нужны, понимание достигается на ментальном уровне, непосредственной передаче мысли «от ума к уму», «не выражая ее в тексте». При ощущении текучести мира и категории мышления подвижны и многомерны. Во все времена японцы придавали особое значение природному ритму и время измеряли четырьмя сезонами, воплощая их в образах искусства.

Древнеяпонская культура — культура души, проникнутая радостным мужеством, простотой, самоотречением и умеренностью. Японская мудрость — это следование Равновесию: не противопоставлять одно другому, а почти-

тельно относиться к знанию, ибо в сфере духа, высшей Реальности, все едино. Путь японцев — очищение души Красотой, изначально присущей миру. Потому и называли Красоту Истиной, а Истину — Красотой, доступной чистому, искреннему и правдивому сердцу японцев. Традиция трехполюсной логики отразилась на характере японского языка. Китайские иероглифы уравновесились японской азбукой. Иероглифы, дискретные знаки-символы, дополнились вязью японских слогов — в знак единства прерывного и непрерывного. В японской фразе нет главного и второстепенного — всё уравновешено, одно не ущемляет другое. Иероглифы и азбука создают единое поле японской культуры, и его воздействие благотворно уже потому, что, когда пишут иероглифы, включается образное, правое полушарие мозга, когда пишут азбукой, работает левое, логическое. Значит, сама письменность располагает к образно-логическому или гармоничному, целостному мышлению. Иероглифы приучали всматриваться в глубину образа, отличного от буквы алфавита.

Ту же «голографическую» структуру обнаружим в любом виде искусства японцев: в музыке, поэзии, живописи, в строении японского дома.

Японцы, как и китайцы, не уповали на цивилизацию, науку и технику, доверяли чувству в его полноте больше, чем рациональному уму. Высокие технологии Японии нашего времени, успехи ее науки касаются прежде всего ее внешней жизни. Ее внутренняя жизнь протекает по традиционному руслу.

Сингулярная (*«голографическая»*) *модель мира.* Суть ее в том, что Единое проникает множественное, когда каждая точка, имея свой центр, становится точкой бесконечности, единичное самопроявляется как Единое. Такое мировоззрение недоступно линейному, одномерному мышлению.

Сингулярная модель мира предполагает преодоление аналитического типа мышления, который породил науку и обеспечил ее успешное продвижение настолько, что она начала главенствовать над умами. На пути поворота от схемы к жизни появилась синергетика. Синергетика признает нелинейность как форму существования, закон самоорганизации и самодостраивания; помимо обратимого движения (обратные связи) — необратимость, движение по вертикали, избавляя человека от страха перед «вечным возвращением», лишающим его перспективы. По мере сближения происходит взамоузнавание, взаимообогащение двух типов знания (условно янского, западного, деятельного и иньского, восточного, созерцательного, интуитивного). Знакомство с восточным, интуитивным знанием помогает уточнить понятия «хаос» и «случайность». Интригующий фрактал заставит задуматься над внутренней структурой, загадочной красотой природных явлений: облаков, течения воды, завораживающей тайнописи огня. Синергетика — метанаука, многомерная логика, знаменуя переход к открытым, нелинейным, т. е. живым, системам, способным к самоорганизации. В России синергетика нашла благодатную почву, если иметь в виду такие качества русской мысли, как интуиция, спонтанность, доверие внутренней форме, не противопоставление одного другому, не подчинение заранее заданной схеме, а свободное излияние натруженной души.

Синергетики исследуют резонансное воздействие: соединение разного, людей и народов. По словам С. П. Курдюмова, мягкое управление — управление посредством «умных» и надлежащих воздействий … а правильные резонансные воздействия могут высвободить мощные внутренне силы и возможности человека, культурного и научного сообщества. В духовной сфере центр смещается из внешнего в сферу внутреннего, от количественного измерения к качественному. Физики обнаружили в вакууме не хаос, а упорядоченность. Мысль соединяется с чувством, субъект с объектом и несет за него ответственность.

Научное мышление становится открытым к нетрадиционным формам знания, в частности восточным, о чем не раз говорил Н. Бор: «Противоположности дополняют друг друга», тем самым соединяя квадрат и круг, тяготея к заложенной в природе двойной спирали. Сознание — это мгновенное проявление океана бессознательного, при том, что в каждом моменте присутствует весь временной ряд — прошлое, настоящее, будущее. Время и пространство недуальны и присутствуют друг в друге. Весь круг жизнедеятельности возникает одновременно.

Однако синергетика в качестве мировоззренческой установки открывает перспективы гораздо более широкие: преодоление разрыва наук о микро- и о макромире, наук о неживой и живой природе — физики и биологии, наук о природе и об обществе. Будучи соединена с идеей творения, синергетика образует, действительно, новую мировоззренческую парадигму. Сотворенность мира не означает его пассивности и механистической безжизненности, творение обращено к Творцу, творение находится в живой связи с истоком своего бытия и через эту связь открыто для принципиального обновления своего бытия. Через эту живую связь каждой вещи тварного мира с первоистоком бытия как такового все эти вещи оказываются открыты также и друг другу, — они не являются «монадами» Лейбница, «не имеющими окон», но, напротив, образуют согласие, мир.

Комментарии к понятию «сингулярная модель мира Т. П. Григоревой». Сингулярность (от лат. *singularis* — «единственно, особенно») — понятие, употребляемое в различном контексте. Ближе всего к Т. П. Григорьевой толковал это понятие французский философ Ж. Делез — как событие, порождающее смысл (выходящий за пределы дихотомий: *субъект и объект*, *внутреннее и внешнее*, *индивидуальное и коллективное*, *особенное и общее*) и носящее точечный характер. Точки — это поворотные пункты и места сгибов; узкости, узлы, преддверия и центры; точки плавления, конденсации и кипения; точки слез и смеха, болезни и здоровья, надежды и уныния, точки чувствительности. Оставаясь конкретной точкой, событие неизбежно связано с другими событиями. Поэтому точка одновременно и линия (нити, потоки, растяжения, длительности, «размытости»), выражающая все варианты модификации этой точки и ее взаимосвязей со всем миром. Сингулярности, с одной стороны, существуют и распределяются, с другой — распространяются по заданным линиям в сторону других сингулярностей.

Модель мира наглядной чувственной памяти А. Р. Лурия. Эта модель описана в книге А. Р. Лурия [30], одного из основателей отечественной нейропсихологии, экспериментально в течение почти тридцати лет систематически наблюдавшего человека (ниже испытуемого — ИС) с выдающейся памятью. По данным [31] таких людей, синестетов, наделенных синестезией, сейчас на Земле около четырех процентов, они имеют «иную структуру реальности» и субъективно разные умвельты (нем. umwelt — окружающий мир, понятие, введенное Я. Икскюлем и развитое Т. Себеоком). Умвельт — субъективный мир восприятия и действия, образуемый двумя сферами, «выкроенными» органами чувств и органами действия из окружающей действительности, — перцептуального и операционального миров. Умвельт, «поведенческое пространство», «значимая среда» состоит из знаков, получаемых через органы чувств и затем интерпретируемых. Это «срез» гетерогенного мира с разнообразием красок, звуков, вкусовых и тактильных ощущений, запахов от контактов с предметами внешнего мира, это «выборка» раздражителей и сигналов, соответствующих возможностям органов чувств человека, нуждам его выживания и деятельности. В связи с понятиями «синестет», «синестезия», «умвельт» часто, в биосемиотике, англоязычной аналитической философии сознания используют термин «квалиа» (лат. *qualia* — свойства, качества чувственного опыта) для обозначения сенсорных, чувственных явлений, ощущений, напимер красноты, боли, и рассматриваемых отдельно от их влияния на поведение, и от вызывающих их физических условий.

В чувственной памяти синестета ИС, со временем не ставшей аппаратом словесной переработки информации, мир отражается иначе, чем у обычного человека. Это мир без границ цветов и звуков, ощущений на вкус и на ощупь. Гладкие холодные звуки и шершавые цвета, соленые краски и яркие светлые и колючие запахи ... в этом мире переплетаются, смешиваются и трудно отделимы друг от друга ... « *... Я всегда испытываю такие ощущения ... Сесть на трамвай? Я испытываю на зубах его лязг ... А вот еще “хворать” и “болеть” — разное. “Болеть” — легкая вещь, а “хворать” — тяжело. “Хвороба” — серое слово, оно падает, закрывает человека ... “Он тяжело болен” — это можно: “болезнь” — туман, который может выходить из человека и окружает его ... А если “хворать”, то он лежит где-то внизу, “хворать” — хуже ... “Он прихварывает” — он ходит и прихрамывает ... , но это не связано с общностью звучания, это совсем разные вещи ...*» (Здесь и ниже курсивом даны высказывания ИС, цитируемые с сокращениями из [30]). Синестезические переживания ИС проявлялись, если он вслушивался в чей-нибудь голос. «*Какой у вас желтый и рассыпчатый голос*», *— сказал он как-то раз беседовавшему с ним Л. С. Выготскому. «А вот есть люди, которые разговаривают как-то многоголосо, которые отдают целой композицией, букетом ..., — говорил он позднее, такой голос был у покойного С. М. Эйзенштейна, как будто какое-то пламя с жилками надвигалось на меня ... Я начинаю интересоваться этим голосом и уже не могу понять, что он говорит ...* ». Звуки речи вызывали у ИС яркий зрительный образ, имели фор-

му, цвет и отличались на вкус. Гласные казались ему простыми фигурами, согласные — твердыми, рассыпчатыми, сохранявшим форму брызгами. У ИС не было четкой границы между зрением и слухом, слухом и осязаним или вкусом. «“*А*” *— что-то белое, длинное, “и” уходит вперед, его нельзя нарисовать, а “й” острее.* “*Ю*” *— острое, оно острее, чем “е”, а “я” — большое, можно по нему прокатиться … И если я вижу линии, то они тоже звучат: вот “линии углом” — это что-то между э-ы-й; зигзагообразная линия — гласный звук … и вроде “р”, не чистое “р” …, но ведь здесь неизвестно, снизу это идет или сверху; если сверху — это звук, а если снизу — уже не звук, а какой-то деревянный крючок для коромысла … Я узнаю не только по образам, а всегда по всему комплексу чувств, которые этот образ вызывает. Их трудно выразить — это не зрение, не слух … Это какие-то общие чувства … Я обычно чувствую и вкус, и вес слова, и мне уже делать нечего — оно само вспоминается …, а описать трудно. Я чувствую в руке — скользнет что-то маслянистое, из массы мельчайших точек, но очень легковесных, — это легкое щекотание в левой руке … — и мне уже больше ничего не нужно*».

Услышанное или читаемое слово, ИС мгновенно превращал в наглядный, яркий и стойкий образ предмета. Если ИС отвлекался, образ исчезал, когда возвращался в исходную ситуацию — этот образ возникал вновь. «*Когда я услышу слово “зеленый”, появляется зеленый горшок с цветами; “красный” — появляется человек в красной рубашке, который подходит к нему. “Синий” — и из окна кто-то помахивает синим флагом … Даже цифры напоминают мне образы … Вот “1” — это гордый стройный человек; “2” — женщина веселая; «3» угрюмый человек, не знаю почему … ; «6» — человек, у которого распухла нога; “7” — человек с усами; “8” — очень полная женщина, мешок на мешке … , а вот “87” — я вижу полную женщину и человека, который крутит усы*».

ИС запоминал «по линиям»: звуки превращались в цветовые пятна, линии, брызги — и он сохранял этот зрительный эквивалент звучания слова. Читая длинный ряд слов, ИС и образы в памяти «расставлял» рядоположенно относительно дороги в детстве: улицы родного города, двора его дома. Превращение списков слов в наглядный ряд образов давала ИС легкость запоминания и последующего их озвучивания в прямом или обратном порядке. Он быстро манипулировал отношениями «предшествовать» и «следовать за» в списках: для чего «отправлялся» на «прогулку» от начала или с конца улицы, «находил» образ названного предмета, и, если требовалось «смотрел» на то, что находится с обеих сторон от него. ИС мог «отворачиваться» от образов, а затем, «поворачиваясь», видеть их снова. ИС запоминал практически неограниченное число слов и хранил в памяти неопределенно долго. Однако такая «запись» иногда «давала сбои». Например, в одном из опытов он пропускал слово «карандаш», в другом — «яйцо» и далее — «знамя», «дирижабль», «путамен» (структура головного мозга, контролирующая подготовку и движения конечностей). ИС так объяснял свои ошибки. *«Я поставил “ка-*

рандаш" около ограды, — вы знаете эту ограду на улице, — и вот карандаш слился с этой оградой, и я прошел мимо него ... То же было и со словом "яйцо". Оно было поставлено на фоне белой стены и слилось с ней. Как я мог разглядеть белое яйцо на фоне белой стены?... Вот и "дирижабль"; он серый и слился с серой мостовой ... И "знамя" — красное знамя, а вы знаете, ведь здание Моссовета красное, я поставил его около стены — и прошел мимо него ... А вот "путамен" — я не знаю, что это такое ... Оно такое темное слово — я не разглядел его ... а фонарь был далеко». «Дефекты памяти» были у ИС «дефектами восприятия» или «дефектами внимания». Хранению слов сопутствовала «избыточная информация» — синестезические: зрительные, вкусовые, тактильные ощущений, возникавшие от звучания слова или от образов букв.

Наглядно-образная память ИС, оперировавшая увеличением размеров образов, их выгодным освещением, правильной расстановкой была не недостаточно экономной, и с годами ИС выработал приемы сокращения (редукции), символизации образов и искусство забывать. «*Раньше, чтобы запомнить, я должен был представить себе всю сцену. Теперь мне достаточно взять какую-нибудь условную деталь. Если бы раньше Вы мне сказали слово "ресторан", я видел бы вход в ресторан, людей, которые сидят, румынский оркестр, он настраивает инструменты, и многое еще ... Теперь, когда вы скажете "ресторан", я вижу только нечто вроде магазина, вход в дом, что-то белеет, — и я запоминаю "ресторан". Поэтому теперь и образы становятся другими. Раньше образы появлялись более четко и реально ... Теперешние образы не появляются так четко и ясно, как в прежние годы ... Я стараюсь выделить то, что нужно. Раньше, чтобы запомнить "Америка", я должен был протянуть длинную веревку через океан — от улицы Горького в Америку, чтобы не потерять дорогу. Теперь мне это не нужно. Вот мне говорят "слон" — и я вижу зоопарк; говорят "Америка" — и я ставлю здесь дядю Сэма, "Бисмарк" — и он должен стоять около памятника Бисмарку; Теперь мне уже не нужно делать все эти сложные вещи, перемещаться в разные страны*».

Искусство забывать, не видеть, остановить появление образов оказалось для ИС не менее важным, чем феноменальная память: в тексте много деталей, рождающих новые образы, они уводят в сторону, последующие слова вызывают новые образы. В итоге хаос. «*Однажды — это было 23 апреля — я выступал 3 раза за вечер. Я физически устал и стал думать, как мне провести четвертое выступление. Сейчас вспыхнут таблицы трех первых ... Это был для меня ужасный вопрос ... Сейчас я посмотрю, вспыхнет ли у меня первая таблица или нет ... Я боюсь, как бы этого не случилось. Я хочу — я не хочу ... И я начинаю думать: доска ведь уже не появляется — и это понятно почему, ведь я же не хочу! Ага! ... Следовательно, если я не хочу, значит, она не появляется ... Значит нужно было просто это осознать!*»

Мышление и познавательные процессы ИС — «умозрительные», это операции с ясными образами, ощутимость которых граничит с реальностью.

Наглядное видение обеспечило ИС «наблюдательностью», что позволяет полнее ориентироваться в повествовании, не пропускать деталей и замечать противоречия. «*... Вот пример того, как я часто замечаю противоречия. Вы все читали рассказ Чехова "Злоумышленник". А есть там какой-нибудь неправильный момент?... Вот слушайте. Следователь говорит крестьянину: "Ага, а ты что, не знаешь разве, что гайками привинчиваются рельсы к шпалам?" — Это правильно? Нет? А у Чехова так написано. Я ведь вижу это, и вижу, что это не так! Я еще раз перечитываю: нет, гайка для этого не подходит ...*».

Наглядное «видение» помогало ИС легко решать практические задачи трудные для обычного человека из-за того, что словесный «расчет» заслоняет «умозрение» (рис. 8).

«Вы помните шуточную задачу: "*Стояли на полке два тома по 400 страниц. Книжный червь прогрыз книги от 1-й страницы первого тома — до последней страницы второго. Сколько страниц он прогрыз?" Вы, наверное, скажете 800; 400 страниц первого и 400 страниц второго? А я сразу вижу: вот они стоят, два тома, слева первый, рядом второй. Вот червь начинает с первой страницы и идет вправо, — там только переплет первого тома и переплет второго, — и вот он уже у последней страницы второго тома ... А ведь он ничего кроме двух переплетов, не прогрыз!*».

а *б*

Рис. 8. Наглядное «видение» решения задачи «о книжном черве»:
а — книжный червь и два тома на полке (вид спереди); *б* — вид сзади на два тома

Расчеты с карандашом и бумагой или с умственными схемами — основной прием решения задач. Однако не опирающиеся на наглядные образы расчеты, могут «увести» поиск в сторону от правильного результата или «навести» на сложный и неэффективный способ решения. Умозрительная форма решения «разворачивала» ИС к предметному действию, связывала числа с наглядными вещами и не допускала формальных решений задач в состоянии конфликтных затруднений. Умозрительное решение задачи быстрее и легче, в то время как вербально-логическое решение требует дополнительных и отвлеченных от предметов (бессодержательных) расчетов.

Однако образное, более того, синестезическое мышление таит и опасности для правильного выполнения основных познавательных операций. Если ИС читает текст, то каждое слово рождает у него образ: «*Другие думают — а я ведь вижу! ... Начинается фраза — появляются образы. Дальше — новые образы. И еще, и еще ...* ». Если отрывок читается быстро, один образ набегает на другой, они толпятся и трудно разобраться в хаосе образов. Медленное чтение также вызывает трудности. « *... Мне дают фразу: "Н. стоял, прислонившись спиной к дереву ...". Я вижу человека, одетого в темно-синий костюм, молодого, худощавого. Н. ведь такое изящное имя! Он стоит у большой липы, и кругом трава, лес ...* — "*Н. внимательно рассматривает витрину магазина". Вот тебе и на! Значит, это не лес и не сад, он, значит, стоит на улице, — и все надо с самого начала переделывать! ...* ».

Усвоение смысла текста, которое у обычного человека протекает свернуто, превращается у ИС в мучительную борьбу с возникающими образами. Они уводят в сторону от смысла текста, мешают выделить суть, обрастают новыми образами. « *... Ведь все, что я вижу, когда читаю, не реально, не соответствует содержанию того, что я читаю ... Когда описывается какой-нибудь дворец, то центральные залы этого дворца почему-то всегда оказываются в той квартире, в которой я жил ребенком ... образы приводили меня туда ... я должен задерживаться, делать над собой усилие, искусственно перестраивать образы, которые я вижу... Здесь происходит огромный конфликт, который затрудняет мое чтение, замедляет его, и я отвлекаюсь от существенного ... я отвлекаюсь от чтения, и вот — я не могу читать, не могу заниматься, это отнимает у меня массу времени ...* ».

Познавательные процессы могут изменить нормальное течение мысли, ведомой образами, вновь всплывающие образы «завладеть» мыслью и увести ее в сторону. Еще одна проблема — опасные рифы синонимов, омонимов, метафор. Обычный ум легко обходит эти препятствия, однако образное, синестезическое мышление ИС терпит здесь крушение. « *... Один раз жена Л. С. Выготского сказала мне: "Вам нельзя на минутку подкинуть Асю?" — и я уже вижу, как она крадется у забора, как она что-то осторожно подкидывает ..., — это ребенок. Ну, разве можно так говорить?... И еще* — "*колоть дрова": колоть — ведь это иголкой! А тут дрова ... и "ветер гнал тучи": "гнал" — это пастух с кнутом, и стадо, и пыль на дороге ... И "рубка" капитана ... И вот еще. Мать говорит ребенку: "Так тебе и следует" ..., — а "следует" — это за кем-то следует ... Я же все это вижу ...*».

Далеко не всегда образное мышление помогает понять смысл. С очень большим трудом ИС понимал научный текст, отвлеченные понятия и причинно-следственные связи. «*Я читаю: работа нормально началась ... "Работа" — я вижу ... идет работа ..., завод ...; а вот "нормально" — это большая румяная женщина. Нормальная женщина ... и "началась"... Кто началась?... Как же это ... Индустрия ..., завод ..., и нормальная женщина, — и как же это все совместить?... Сколько мне нужно отбросить для*

того, чтобы простой смысл стал, ясен ... "Бесконечность" — это всегда так было ..., а что было до этого? А после — что будет?... Нет, этого увидеть нельзя ... Чтобы глубоко понять смысл, надо увидеть его ... Но как представить "взаимное проникновение противоположностей"?... Я вижу два темных облака пара ... Это темное "противоположное". Вот они надвигаются друг на друга, проникают друг в друга ... А вот "отрицание отрицания" ... Нет, я никак не могу представить это ... Я долго бился над этим, но, по совести, так и не понял ... ».

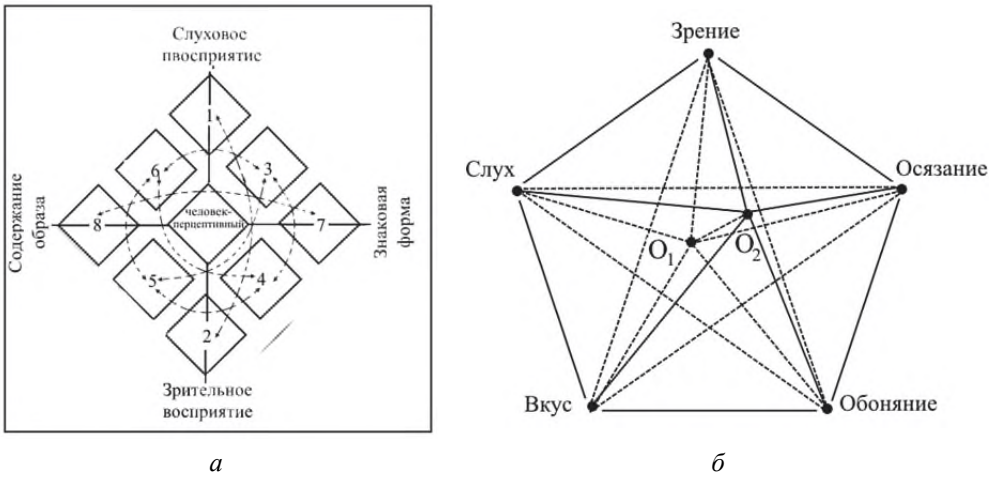
ИС обладал завидной волей и воображением. «*Вы хотите, чтобы температура правой руки поднялась, а левой понизилась? Давайте начнем ... Нет, в этом тоже нет ничего удивительного! Вот я вижу, что прикладываю правую руку к горячей печке ... Ой, как ей становится горячо ... Ну, конечно же, температура ее стала выше! А в левой руке я держу кусок льда ... Я вижу этот кусок, вот он у меня в левой руке, я сжимаю ее ... Ну конечно, она становится холоднее ...*».

Таким образом, у ИС воображение рождает образы, приобретающие порой чувственность реального, а границы внешнего и внутреннего мира стираются. Это отличается от творческого воображения, рождающего действие в согласии с внешним миром. Это мышление мечтателя, живущего в воображаемых мирах. Это жизнь в «сновидение наяву». Всплывающие образы мешают линии разговора с другими людьми, отвлекают в сторону многословия. Яркие образы конфликтуют с миром действительности и мешают подготовленному действия. ИС всегда ждал и больше мечтал и «видел», чем действовал. Он сменил десятки профессий, из которых все были «временными». Что было реальнее — мир воображения, в котором он жил, или мир реальности, в котором он временно гостил?

Ощущаемые миры Б. М. Галеева в искусстве и эстетике [32—34]. Синестезия, по Б. М. Галееву, — межсенсорная, межчувственная ассоциация, часто многоуровневая, системная, проявление ассоциативного, метафорического мышления. Это способность «видеть» пластику мелодии, колорит тональности и, наоборот, «слышать» звучание цветов и т. д. Синестезия — свойство человеческой психики понимать синестетические метафоры, например «яркий звук», «матовый тембр» в поэтической и обыденной речи. Синестезия — отражение в сознании человека взаимосвязей разномодальных характеристик предметов и явлений мира действительности, их сторон и свойств, участвующих в акте перцепции (восприятия), осуществляемом комплексом разнородных сенсорных систем — зрением, слухом и т. д. Синестетичность присуща художественному мышлению в искусстве и музыке. В синестезии ассоциативная связь формируется «по сходству» разномодальных явлений, что и выглядит как «смешение чувств», «межчувственный перенос». Сходство здесь может быть либо по содержанию (смыслу, эмоциональному воздействию), либо по форме (структуре и гештальту). При этом мышление не выходит за рамки сенсорно-чувственной сферы, т. е. относится к сфере

невербального, чувственно-образного мышления. Невербальное мышление сложнее, чем визуальное или музыкальное мышление. Оно отображается связями в целостной полимодальной сенсорной системе.

Модель синестезии Б.М. Галеева отражает системные взаимодействия в сфере чувственного отражения (рис. 9, *а*). В центре системы, ограниченной квадратом, — целостный, бисенсорный «человек-перцептивный». Горизонтальной линией выделена дихотомия «зрение-слух», а вертикальной — «форма-содержание» чувственного отражения, формирующего в сознании человека «субъективный образ объективного мира». «Субъективное» — модальность перцепции, а «объективное» — ее структура. От сторон квадрата отложены абстрагируемые от «человека перцептивного» компоненты-ячейки, связанные с центральной сферой, с деятельностью мозга «человека-перцептивного».



а *б*

Рис. 9. Система чувственного отражения:
а — ячейки: *1* — слуховое восприятие; *2* — зрительное восприятие; *3* — модальность слуха; *4* — модальность зрения; *5* — структура зрительного акта; *6* — структура слухового акта; *7* — «интермодальные квалитаты»; *8* — признаки подобные «интермодальным квалитатам» и объединяющие структурные свойства восприятия;
б — общее чувство на внутренних и внешних чувствах

Синестезии обозначены на рисунке 9, *а* пунктирными стрелками (возможны и аномальные связи, деформирующие работу перцептивной системы). Реально синестезии возникают между первой и второй компонентами. В синестезических связях могут преобладать «первичные» или «вторичные» качества. К связям «3—4» «цветного слуха» относятся, например, «красный зов трубы» или музыкальные аналогии «цвет — тембр», «колорит — гармония» К связям «5—6» относятся, например, синестезии «мелодия — рисунок», «музыка — архитектура», «музыка — орнамент». Возможны и перекрестные связи «4—6» и «3—5». В седьмой ячейке расположены «интермодальные

квалитаты» — общие качества всех ощущений, характеризующие их тонус (силу, активность и насыщенность), как характеристики качества и интенсивности разномодальных ощущений вне структурной оформленности, опосредованные общностью их эмоционального тона. «Светлым, темным», «теплым, холодным», «острым, тупым», «тяжелым, легким», «твердым, мягким» именуются и сами эмоции переживания, настроения и звуки: цвета, запахи, вкусы. В восьмой ячейке — признаки, объединяющие структурные свойства восприятия. На них опирались гештальт-психологи, признавая существование амодальной «синтетической формы». Признаки «острый — тупой», «мягкий — твердый», «тяжелый — легкий» могут объединять их, что сближает седьмой и восьмой интермодальные квалитаты.

Совокупность седьмого и восьмого системных «интермодальных квалитатов» — суть «Sensorium commune» (лат. «общее чувствилище», «общее чувство»). Компонентами этих взаимосвязей могут выступать как экстероцептивные ощущения, «внешние чувства», так и «внутренние», менее исследованные, интероцептивные и проприоцептивные ощущения (на рис. 9 ,*б* — точки O_1 и O_2). Интероцептивные рецепторы регистрируют состояние внутренних органов, самочувствие человека, а проприоцептивные — положение тела в пространстве, например мышечное чувство и восприятие тяжести.

Менее осознаваемые, «смутные» ощущения предопределяют распространенные и общезначимые межчувственные взаимосвязи, лексические синестезии, например «тяжелое состояние», «ошеломляющий гул», «легкая музыка», «тонкий вкус» и т. п. Пример более глубокого пространственно-слухового «соинтонирования» — синестезическая аналогия рецепции гравитации и ладового тяготения в музыке. Ладовая организация и рефлекс человека на отношение раздражителей-звуков порождают феномен мелодии, связывая линейную последовательность звучаний в целостное образование, осмысленные звуковые фигуры «слухового пространства». Развитие музыки сопряжено с ослаблением ладофункциональных отношений, стремлением к равноправию всех тонов, ликвидации тонального центра и тяготений между ними. (Лад — один из центральных терминов в теории музыки, система отношений устойчивых и неустойчивых звуков и созвучий, работающая на определенный звуковой эффект; понятие «лад» тесно связано со звукорядами, например мажора, минора, пентактоники.) Возможно, эволюция ладового мышления в музыке — своего рода слуховая модель, подсознательное и синхронное синестетическое отражение эволюции представлений человека о преодолении сил тяготения. Это подтверждают наблюдения светомузыкантов: движения потоков света по горизонтали вызывают головокружение и крайне нежелательны; движение света по вертикали, вверх или вниз предпочтительнее. Специальные компенсаторно-музыкальные, звуковые программы способствуют адаптации человека к невесомости.

Окружающий мир Дж. Гибсона [36]. «Экологическая теория восприятия» психолога Дж. Гибсона, различающего понятия «окружающий мир» и «физический мир», — пример «обыденной», «естественной» онтологии.

В понимании Дж. Гибсона земной окружающий мир не разложим на особые, первичные элементы, это среда обитания с соподчиненными элементами. Выбор элементов для описания среды зависит от избранного субъектом уровня. В психологии, в отличие от физики, имеют дело с предметами экологического уровня, средой обитания и жизнедеятельности животных и человека, видящих, осязающих, обоняющих прагматичные предметы, пробующих их на вкус, а также с событиями, которые можно слышать. Основа земного окружения — опорная поверхность, а его компоновка одновременно неизменна и изменчива, есть варианты и инварианты. Предметы в окружающем мире двигаются иначе, нежели ньютоновские тела в пространстве: это скорее изменения структуры, а не как изменение положения точек, изменения формы, компоновки, а не координат. Наблюдатель и его окружающий мир взаимно дополняют друг друга. Окружающий мир Дж. Гибсон описывает триадой «среда — вещества — поверхности». Человек живет не в «пространстве», а в окружающем мире, состоящем из телесно оформленного вещества, воздушной среды и поверхностей, отделяющих вещества от среды. Поверхности имеют свойства компоновки, текстуры, освещенности или затененности, отражения части падающего света. В нем факты движения тел и распространения в среде света, звука и запаха не противоречат законам физики, механики, оптики, акустики и химии, однако же, как факты более высокого порядка, они явно не формулировались в этих науках.

Наряду с фактом движения предметов теория Дж. Гибсона учитывает и многократно отражающийся в среде световой поток, процесс поглощения и отражения света поверхностями и зависимость этого процесса от состава веществ. Взяв эти положения за основу, можно по-новому описать окружающий мир. Дж. Гибсон сформулировал экологические законы поверхностей: 1) у устойчивых веществ есть поверхности, имеющие компоновку; 2) любая поверхность обладает сопротивлением деформации, зависящим от вязкости веществ, сопротивлением разрушению, зависящим от связности вещества, характерной текстурой, зависящей от состава вещества (следует различать компоновочную и пигментную текстуру); 3) любая поверхность имеет характерные очертания, крупномасштабную компоновку; поверхность освещается сильно или слабо, находится на свету или в тени; 4) освещенная поверхность поглощает свет, обладает отражательной способностью и распределением коэффициентов отражения света с различной длиной волны. Однородная и совершенно гладкая поверхность, геометрическое пространство — абстракция, предельный случай, миф, вымысел геометров. В окружающем мире актуальна неформальная геометрия поверхностей, потому что поверхности можно увидеть, а плоскости нельзя, поскольку в реальном поведении имеют значение способы взаимного расположения поверхностей, а не абстрактные, формальные, интеллектуальные понятия математического пространства.

В неформальной геометрии поверхностей окружающего мира Дж. Гибсон различает понятия «излучаемый свет» и «объемлющий свет», оговаривая следующие различия. Излучаемый свет: источник освещения; расходится во

все стороны от источника энергии; состоит из бесконечно плотного множества лучей; одинаков во всех направлениях; не имеет структуры; распространяется, испускается атомами и возвращается к ним; есть энергия. Объемлющий свет: объемлющий свет — результат освещения; сходится в точку наблюдения; состоит из множества «телесных углов» с общей вершиной; различен для различных направлений; имеет структуру; просто существует; зависит от поверхностей окружающего мира, гетерогенен; может быть информацией.

Окружающий мир задает объемлющий свет, обладающий структурой, т. е. объемлющий свет структурирован. Иначе говоря, чтобы свет содержал информацию, в точке наблюдения он должен быть различным по интенсивности для различных направлений. Для описания структурированного объемлющего света Дж. Гибсон использует термин «объемлющий оптический строй» как упорядоченное размещение составных частей, паттерн, текстура или конфигурация.

Понятие энергетического потока излучаемого света соотносимо с понятием сетчаточной стимуляции, а оптический строй множества телесных углов-проекций объемлющего света соотносимо с понятием стимульной информации. Если объемлющий свет не структурирован — в нем нет информации об окружающем мире. Если объемлющий свет не структурирован в одной своей части и структурирован в другой, смежной с первой, первая часть задает пустоту, а вторая — поверхность. В процесс извлечения информации вовлечены не только явные, регистрируемые движения, например ориентировка и настройка, но и более общие формы активности: активация, резонирование, извлечение инвариантов, с трудом поддающиеся регистрации.

Вместо заключения

Завершая размышления о «моделях мира», посвященные светлой памяти Дмитрия Александровича Поспелова, еще раз отдадим должное его восприятию, интеллекту, сильному воображению, несгибаемой воле и глубокому пониманию природы человека: «Крутится, вертится шар голубой».

Если читатель ждет подведения итогов, выводов или резюме, то его надежды не оправдаются, но если у тех, кто использует в научной или другой деятельности понятия «модель мира», «картина мира», «мировоззрение», «миропонимание», «инженерия знаний», «языковая инженерия», «инженерия образов» и близкие к ним по содержанию, и «Вися над пропастью и держась руками за единственную ветку дерева, называемого интеллектом … », как позиционирует нас, исследователей гибридного и синергетического ИИ, Д. Судзуки, возникли ощущения «глубины духовной бездны» того, чем мы занимаемся, автор будет считать поставленную задачу выполненной. В книге [34] приведен рассказ о Хаосе величайшего философа Древнего Китая Чжуан-цзы: «Друзья многими своими достижениями были обязаны Хаосу и хотели с ним расплатиться. Они посовещались и пришли к решению. Они знали,

что у Хаоса нет органов чувств для различения внешнего мира. Сначала они дали ему глаза, на другой день — нос, а через неделю завершили свою работу, превратив его в наделенную чувствами личность, подобную им. Пока они поздравляли друг друга с успехом, Хаос умер».

Прагматичный читатель, может быть, найдет для себя полезным перечисление функций модели мира по К.Р. Роджерсу, американскому психологу: 1) в модели мира берут свое начало гипотезы, которые человек выдвигает, предвидя какое-то событие и планируя свое поведение; 2) синтезируя личный опыт и исторические традиции среды, модель мира интегрирует человека как личность и служит ему «персональным компьютером», незаменимым при решении всех жизненных задач; обращаясь к ней, он может определить, где находится в настоящее время, предвосхитить развитие событий и подготовиться действовать адекватно ситуации; 3) модель мира «определяет человеческие ценности, которые в дальнейшем определяют избирательность восприятия»; под ее руководством человек накапливает опыт не пассивно, а активно; 4) модель мира обеспечивает накопление представлений и определенных схем в сознании; 5) модель мира предоставляет степень предвидения событий и позволяет планировать свою деятельность. Наверное, об этом стоит подумать, поскольку, по мнению К.Р. Роджерса: «Каждый из нас состоит из двух отдельных частей, отчаянно пытающихся соединиться в одно интегрированное целое, в котором различия между душой и телом, чувствами и интеллектом были бы стерты».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00208.

Список литературы

1. *Анисин А.Л.* Синергийная соборность бытия мира // Вопросы гуманитарных наук. 2006. №4 (25). С. 50—55.

2. *Козлов В.В., Рушас В.И.* Некоторые теоретические подходы к формированию «модели мира». URL: www.zi-kozlov.ru (дата обращения: 09.01.2019).

3. *Бричковский В.И., Мицкевич В.В.* Модель мира: статика и динамика. Использование статической части модели при создании систем искусственного интеллекта. URL: http:// protomodel.ucoz.ru/publ/1-1-0-10 (дата обращения: 17.12.2019).

4. *Колесников А.В.* Гетерогенные естественные и искусственные системы, поддерживающие принятие решений // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы II международного Поспеловского симпозиума / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.В. Колесникова. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2014. С. 164—181.

5. *Осипов Г.С., Чудова Н.В. и др.* Знаковая картина мира субъекта поведения. М. : Физматлит, 2018.

6. *Дуреева Н.С.* Понятие модели мира в науке // Вестник Томского гос. университета: Языкознание и литературоведение. Томск : Изд-во ТГУ, 2011. С. 55 —58.

7. *Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С.* Большое, малое и человеческий разум / пер. с англ. М. : Мир, 2004.

8. *Лаптев В. В.* Русская инфографика. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2018.

9. *Гейзенберг В.* Шаги за горизонт / пер. с нем. ; сост. А. В. Ахутин ; общ. ред. и вступ. ст. Н. Ф. Овчинникова. М. : Прогресс, 1987.

10. *Райбекас А. Я.* Вещь, свойство, отношение как философские категории. Томск : Изд-во ТГУ, 1977.

11. *Лега В. П.* Плотин, патристика и современность. Апологические очерки. М. : Изд-во Православного Свято-Тихоновского Богословского института, 2002.

12. *Блонский П. П.* Философия Плотина. М. : Изд-во Перервинской духовной семинарии, 2004.

13. *Семенов Ю.* О философии Плотина. СПб. : Издательский проект «Quadrivium», 2017.

14. Фладд Роберт: URL: https://ru.wikipedia.org/Фладд_Роберт (дата обращения: 20.01.2019).

15. *Блажевич М. Н., Ушаков Д. Ф.* Роберт Фладд: Метафизика музыки и числа // Вестник СПбГТУ. 2011. Сер. 15, вып. 3. С. 7—31.

16. *Берестев И. В.* Уникальность объектов в возможных мирах Г. В. Лейбница // Идеи и Идеалы. 2017. Т. 1, № 2 (32). С. 61—74.

17. *Фатиев Н. И.* «Возможные миры» в философии и логике. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1993.

18. *Смотрящий* в высоту (М. Чюрленис). URL: https://nowimir.ru/DATA/060022.htm (дата обращения: 20.02.2019).

19. *Преображение*. Художник Виктор Черноволенко. URL: https://nowimir.ru/DATA/060010_1.htm (дата обращения: 21.02.2019).

20. *Эпштейн М. Н.* Философия возможного. Модальности в мышлении и культуре. СПб. : Алетейя, 2001.

21. *Волшебные* картины Жозефины Уолл. URL: https://kolybanov.livejournal.com/14174694.html (дата обращения: 25.02.2019).

22. *Акопян А. А.* Возможные миры как объекты модального мышления // Молодой ученый. 2009. № 9. С. 96—99. URL: https://moluch.ru/archive/9/604/ (дата обращения: 11.01.2020).

23. *Лысова З. С.* Модальный анализ: онтология, логика и лингвистика // Вестник СамГУ. 2007. № 5/2 (55). С. 23—29.

24. *Шехтман В. Б.* Семантика модальных утверждений // Семиотика и информатика. М. : Изд-во Акад. наук СССР, Всесоюз. ин-т науч. и техн. Информ, 1981. Вып. 17. С. 148—169.

25. *Смирнова Е. Д.* Возможные миры и понятие «картин мира» // Вопросы философии. 2017. № 1. С. 39—50.

26. *Виньков М. М., Фоминых И. Б.* Рассуждения о знаниях и проблема логического всеведения. Часть 1. Модальный подход // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 4. С. 3—13.

27. *Шапиро О. А.* «Возможные миры» Крипке и логическое прогнозирование // Именование, необходимость и современная философия / отв. ред. В. В. Горбатов. СПб. : Алетейя, 2011. С. 275—286.

28. *Боно Э.* Водная логика / пер. с англ. Е. А. Самсонов. Милан : Попурри, 2006.

29. *Григорьева Т. П.* Китай, Россия и Всечеловек. М. : Новый Акрополь, 2011.

30. *Лурия А. Р.* Маленькая книжка о большой памяти (Ум мнемониста). М. : Эйдос, 1994.

31. *Синестезия*: мнения и перспективы // Материалы II Международного симпозиума «Синестезия: межсенсорные аспекты познавательной дейтельности в науке и искусстве» / под ред. А.В. Сидоров-Дорсо, Ш.Э. Дэй. М. : ФГБОУ ВО МГППУ, 2019.

32. *Галеев Б.М.* Синестезия не аномалия, а проявление невербального мышления // Языки науки — языки искусства : сб. тр. конф. (Суздаль, 1999). М. : Прогресс-Традиция, 2000. С. 139—143.

33. *Галеев Б.М.* Историко-теоретический анализ концепций синестезии в мировой психологии // Вестник Российского гуманитарного научного фонда. 2005. №1(38). С. 159—168.

34. *Забияко А.А.* Синестезия: Метаморфозы художественной образности. Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2004.

В.Б. Тарасов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: Vbulbov@yahoo.com

ОБЩЕНИЕ И ВЗАИМОПОНИМАНИЕ КОГНИТИВНЫХ АГЕНТОВ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ: НА ПУТИ К «СОЗНАТЕЛЬНЫМ» КОБОТАМ

Введение

Начиная с середины 2010-х гг. стали активно развиваться и получили широкое распространение стратегия и технологии 4-й промышленной революции, кратко характеризуемой термином «Индустрия 4.0» [1; 2]. Ключевая идея Индустрии 4.0 — объединение физического и виртуального миров, достигаемое с помощью киберфизических систем. Создание таких гибридных систем означает интеграцию вычислительных ресурсов в физико-технические процессы. Реализация стратегии Индустрия 4.0 тесно связана с формированием предприятий нового поколения, синтезом и апробацией новых индустриальных платформ, таких как цифровые (Digital), «Умные» (Smart) и виртуальные фабрики.

В статье [3] проанализированы основные технологии Индустрии 4.0 (рис. 1) и отмечено, что, несмотря на общие реверансы в сторону искусственного интеллекта, в списке, данном BCG (Boston Consulting Group), нет базовых интеллектуальных технологий. Соответственно, в публикации [4] представлена концепция «Индустрия 5.0», означающая интеграцию Интернета знаний и Интернета вещей. В настоящей работе предлагается рассматривать в качестве метатехнологии для формирования новой стратегии Индустрия 4.0+ технологию искусственных когнитивных и коммуникативных агентов, тесно связанную с современными расширенными представлениями искусственного интеллекта (ИИ), такими как искусственный общий интеллект AGI [5; 6] и синергетический ИИ SynAI [7—9]. На наш взгляд, ядром перспективной стратегии Индустрия 4.0+ должна стать концепция синергии, взаимодополняемости

© Тарасов В.Б., 2020

и взаимной компенсации возможностей естественного и искусственного интеллекта в рамках гибридных интеллектуальных систем и сообществ. Истоки этой концепции восходят к идее гибридного интеллекта В. Ф. Венды [10].

Рис. 1. Основные технологии Индустрии 4.0 (по BCG).

В русле создания стандартов Индустрии 4.0+ понятие искусственного агента приобретает центральное значение. Построение сети предприятий нового поколения требует дальнейшего развития представлений о предприятиях как социотехнических системах в плане их полной агентификации, т. е. синтеза сети предприятий как открытого, неоднородного, смешанного сообщества естественных агентов — сотрудников подразделений или рабочих групп предприятий и искусственных агентов (как программных агентов, так и «умных» материалов, технических средств и оборудования) [11]. Аналогичные идеи агентификации актуальны и для списка технологий, указанных на рисунке 1.

Так, агентификация объектов Интернета вещей и создание аналогов социальных сетей для вещей [12] обеспечит их более полное взаимодействие, способствуя формированию искусственных популяций и сообществ вещей. Представление цифровых двойников как виртуальных агентов, а также понимание ресурсов в [13] как агентов, обладающих знаниями о своей структуре и состояниях и снабженных протоколами взаимодействия с другими ресурсами-агентами, открывает принципиально новые возможности в интеллектуальном имитационном моделировании.

Основная проблема больших данных в эпоху Индустрии 4.0 заключается в том, что порождение данных в среде Интернета вещей будет существенно

превосходить возможности их оперативной обработки. Здесь перспективное решение состоит в построении моделей грануляции информации и реализации соответствующих алгоритмов искусственными когнитивными агентами [14].

Наконец, наделение роботов статусом и средствами когнитивных и коммуникативных агентов — необходимое условие построения передовых партнерских систем «человек-робот», которые следует отнести к системам гибридного интеллекта с персонифицированным интерфейсом. Переход от управления роботом к эффективной совместной деятельности (синергии) человека и робота требует высокого уровня интеллектуализации и агентификации робота. В работе будут изложены принципы и условия построения систем коллаборативной робототехники промышленного и социального назначения, связанные с реализацией диалога когнитивных агентов и формированием эмоционального интерфейса «человек-робот».

Статья включает шесть основных разделов. В первом разделе приведены исходные определения и изложены требования к коллаборативным роботам (коботам), даны известные примеры коботов, обсуждается существующая техническая спецификация. Во втором разделе рассмотрена проблема сотрудничества агентов — естественного и искусственного — в системе «человек-кобот». Показана ключевая роль понимания и взаимопонимания в обеспечении сотрудничества человека и кобота.

В русле онтологического моделирования понимания описана модифицированная модель «граней понимания» Уиггинса — Мактайга, изучены взаимосвязи в диадах «понимание — познание», «понимание — интепрпретация», «объяснение — понимание», проанализированы различия между процедурами объяснения, обоснования и оправдания. Отмечена необходимость учета эмоциональных факторов сопереживании при организации партнерских отношений. В третьем разделе представлены современные стратегии управления как партнерства: от информационного, рефлексивного и адаптивного до диалогового и визуального управления. Рассмотрены ключевые функции и особенности создания расширенного многомодального партнерского интерфейса в системах «человек-кобот». В итоге обосновано, что дополнение интеллектуального интерфейса эмоциональным интерфейсом — важный шаг на пути к созданию «сознательных» коботов. В четвертом разделе, исходя из психонической парадигмы искусственного интеллекта Д. А. Поспелова, делается попытка с практических позиций ответить на вопрос, что такое сознание и как оно формируется. В данном контексте рассмотрены компоненты психологической триады «интеллект — чувства — воля» и их функции, обеспечивающие целостность сознания. Пятый раздел посвящен обсуждению теоретических основ построения эмоциональных интерфейсов «человек-кобот». Рассмотрены основные виды, характеристики и функции эмоций, описаны варианты классификации эмоций, раскрыта роль метаэмоций в установлении партнерских отношений. Наконец, в шестом разделе представлен вариант решения задачи распознавания эмоций по выражению лица и кратко описана его программная реализация.

1. Коллаборативная робототехника: общение и сотрудничество робота с человеком в условиях прямого контакта

Термин «кобот» есть плод скрещивания слов «коллаборативный» (т. е. сотрудничающий) и «робот». Этот термин, появившийся в работе Э. Колгейта и М. Пешкина [15], пополнил ряд неологизмов с корнем «бот», в основном относящихся к программным роботам, например «софтбот», «инфобот», «мобот». Соответствующая область была названа «коллаборативной робототехникой» (кратко — *кобототехника*) [15—17], а интерактивные системы «человек-робот» стали именоваться кобототехническими системами.

Речь идет о партнерстве и совместной деятельности человека и робота в реальной физико-технической среде, когда человек берет на себя роль партнера-руководителя, а робот превращается в партнера-ассистента. Их общение и сотрудничество ведут к созданию человеко-технической системы *гибридного интеллекта*, общая идея которой была высказана более 40 лет назад В. Ф. Вендой [10].

Синергетический потенциал системы «человек-кобот» заключается в том, что точность, быстродействие и неутомимость кобота при выполнении им достаточно простых, монотонных, повторяющихся и малоинтересных для человека операций сочетается с широкими творческими, в частности изобретательскими и прогностическими, возможностями человека, его адаптацией к изменению условий задачи или деятельности в целом. Эта взаимодополняемость может обеспечить весьма значительное повышение производительности и качества труда. Еще одним важным обстоятельством является то, что в отличие от обычной роботизации производства применение коботов не грозит работнику потерей рабочего места, а позволяет ставить и решать более сложные производственные задачи в условиях разгрузки от рутинной работы.

Коллаборативный робот — это сравнительно недорогой, легкий, удобный для взаимодействия интеллектуальный робот, который должен работать «рука об руку» с человеком в общем для них пространстве [15—17].

Главное и важнейшее требование к коботу — обеспечение безопасности его взаимодействия с человеком-партнером в условиях непосредственного контакта при выполнении совместной работы. Поэтому большинство коллаборативных роботов имеют небольшие размеры и вес: обычно высота кобота — не более 1,5 м, а вес — 15—20 кг (в некоторых случаях — до 50 кг). Кроме того, их делают из мягких и легких материалов с высокой податливостью (резина, кевлар, алюминий и т. п.).

Другое ключевое требование — простота управления движениями и действиями кобота, доступного для пользователя — непрофессионала в сфере робототехники, с учетом его индивидуальных психофизиологических возможностей и реальных ограничений. Соответственно, необходим дружественный, антропоцентрический и даже персонифицированный интеллектуальный интерфейс «человек-кобот» (создание персонального кобота для человека по аналогии с персональным компьютером).

Помимо интеллектуального интерфейса и динамической базы знаний, подобный робот должен быть оснащен системой сенсоров (в особенности тактильным сенсором) и системой компьютерного зрения, что позволит предотвратить ситуации столкновения устройства с человеком-партнером и препятствиями, а также успешно функционировать при сбоях встроенного программного обеспечения.

Для успешной автономной работы кобот должен обладать трехмерной системой технического (компьютерного) зрения. В интересах обеспечения информационной защиты системы управления коботом и достижения большего взаимопонимания могут применяться новые технологии анализа особенностей речи человека-партнера и распознавания состояния его лица.

Примерно пять лет назад международная организация по стандартизации создала специальный технический комитет, посвященный робототехнике ISO/TC 299. Им была разработана техническая спецификация ISO/TS 15066: 2016, *Роботы и робототехнические устройства — Коллаборативные роботы*. Ее ядро — подробно обоснованное руководство по безопасности, необходимое, в частности, для оценки рисков прямого контакта человека и робота и их минимизации. В контексте обеспечения безопасности человека при его совместной работе с коллаборативным роботом выделены четыре варианта их взаимодействия и соответствующие режимы работы (типы операций) кобота.

1. *Работа кобота с защитным механизмом остановки* (Safety-Rated Monitored Stop). Кобот преимущественно функционирует в автономном режиме, но человеку-партнеру время от времени требуется зайти в его рабочее пространство. При приближении человека срабатывает механизм, останавливающий кобота, который основан на датчиках движения. При этом остановка происходит без потери мощности двигателей (по сути, пауза, а не полная остановка). Как только человек покидает рабочее пространство, кобот возобновляет свою работу. Главный принцип: человек и кобот не могут двигаться одновременно.

Рис. 2. Пример обучения кобота вручную

2. *Ручное управление и обучение* (Hand-Guided Mode). Человек-партнер, находясь в прямом контакте с коботом, направляет его туда, куда надо, и показывает, что следует делать. При этом человек вручную обучает кобота путем перемещения его манипулятора.

Речь идет о промышленных коботах малых размеров, которые снабжены устройствами, легко распознающими давление руки. Здесь как человек, так и кобот могут двигаться одновременно причем движениями кобота в режиме обучения управляет человек (рис. 2). Если кобот не обучается, а выполняет свои прямые функции, то человек должен находиться за границами его рабочей зоны.

3. *Режим мониторинга скорости и разграничения* агентов (Speed and Separation Monitoring). В этом случае кобот, оснащенный системой компьютерного зрения, отслеживает перемещения людей поблизости. Как только человек попадает в рабочую зону кобота, тот замедляется до безопасной скорости, а если работник подходит слишком близко,то кобот останавливается. Здесь человек и кобот также могут двигаться одновременно.

4. *Кобот с ограничением мощности и усилий* (Power and Force Limiting). Он может чувствовать сопротивление на своем пути и останавливается при сильном сопротивлении. В этой ситуации случайный контакт кобота с человеком не приносит последнему существенного вреда. Из соображений безопасности такие коботы делаются из податливых материалов с преобладанием округлых форм поверхностей.

Основными производителями коллаборативных роботов выступают компании Universal Robotics [18], Rethink Robotics, ABB, FANUC, F&P Personal Robotics, Kuka Robot Group, MABI Robotic и др. Ряд известных моделей коботов приведен в таблице [19].

Современные производственные коботы, помимо классических операций упаковки, погрузки и перемещения, а также сборки, способны решать широкий круг производственных задач, включая обслуживание станков (загрузку заготовок и выгрузку готовых деталей), технологические операции сварки, литья под давлением, полирования поверхностей и др.

Модели, производители и назначение коботов

Модель робота	Компания-производитель	Описание
Baxter	Rethink Robotics	Первый в мире интерактивный производственный кобот (основное назначение — упаковка)
Sawyer	Rethink Robotic	Новый высокопроизводительный кобот для проведения высокоточных операций
UR Series	Universal Robots	UR-5 — гибкий манипулятор для оптимизации совместной работы по сбору, размещению, тестированию компонентов
Roberta	Gomtec	Легкий, адаптивный, недорогой 6-степенной промышленный кобот для небольших предприятий
CB-35IA	Fanuc	Может быть интегрирован в работу автоматических сборочных линий, а также применяться для упаковки
BioRob Arm	Bionic Robotics	Легкий BioRob прошел сертификацию на предмет безопасного использования поблизости от человека без дополнительных мер защиты

Окончание табл.

Модель робота	Компания-производитель	Описание
P-Rob	F&P Personal Robotics	F&P предлагает решения типа «все в одном» в плане очувствления и интеллектуализации коботов
Speedy10	Mabi Robotic	Легкий кобот для гибкого производства с высокими демпфирующими характерстиками
PF-400	Precise Automation	Предназначен для клиентов с малым опытом работы в сфере автоматизации, но достаточно быстрый и мощный для поддержки сборочных операций

Ниже представлен вариант классификации кобототехнических систем (по степени сложности и областям применения).

1. Коботы-манипуляторы, работающие в той же зоне, где находится человек, с целью оказания ему помощи, например, на сборочном конвейере или при обслуживании инвалидов. Примерами могут служить кобот для упаковки Baxter или роботизированное устройство для приема пищи ампутантами Obi компании DESIN.

2. Мобильные коботы, обладающие автономной системой управления и выполняющие определенные операции по указаниям человека в помещениях — как на производстве, так и в сфере обслуживания, при условии, что в этих помещениях могут находиться и перемещаться другие люди. Для таких роботов необходимо построить классификацию препятствий. При этом роботы должны обладать собственной системой навигации, а управлять ими можно как путем речевого диалога, так и с помощью специальных устройств, размещаемых на голове или теле человека (пример — Human Support Robot компании Toyota).

3. Манипуляторы и мобильные коботы в составе бытового робото-технологического комплекса, обеспечивающие безопасность пользователя и облегченную работу с интерфейсом.

4. Группы и коллективы роботов, управляемые человеком (многоагентные кобототехнические системы). Такие системы требуются для обследования и мониторинга местности при авариях, эпидемиях, радиоактивном заражении и т. п.

Из таблицы и приведенной классификации видно, что среди первых коботов нередко встречаются роботы второго (очувствленные) и третьего (интегральные) поколений. Вместе с тем существенным требованием к перспективным коботам является высокий уровень их интеллектуализации, в частности богатые когнитивные и коммуникативные возможности для эффективного взаимодействия с человеком, реализация новых стратегий и технологий обучения.

Дальнейшее развитие коллаборативной промышленной и социальной робототехники требует не только совершенствования технологий безопасности для совместной работы человека и кобота, а также принятия все более полных стандартов, но и обобщений теории искусственного интеллекта, формирования методологии синергетического интеллекта, создания новых интеллектуальных технологий.

2. Взаимопонимание как основа партнерских отношений в системах «человек-кобот»

Идея коллаборативных, способных к сотрудничеству с человеком искусственных систем, отнюдь не нова. Так, в книгах [10; 20; 21] описаны человеко-машинные целеустремленные системы с многоуровневой взаимной адаптацией человека и техники, партнерством человека и компьютера в русле теории агентов, взаимодействием посредством диалога. Принцип партнерства в системе «человек-робот» и модель интерактивного, диалогового управления роботом были предложены Е. П. Поповым и А. С. Ющенко более 35 лет назад [22; 23], однако лишь в XXI веке появились предпосылки для их воплощения в жизнь.

Тем не менее теоретические аспекты перехода от управления роботом, рассматриваемым как техническое средство к сотрудничеству человека с коботом как искусственным когнитивным агентом, пока еще остаются недостаточно разработанными, что предполагает необходимость формирования базовой концепции сотрудничества естественных и искусственных агентов.

В толковом словаре Т. Ф. Ефремовой [24] «сотрудничество означает совместную деятельность, участие в общем деле». Сотрудничество человека и кобота предполагает их способность работать вместе в одной и той же области пространства в одно и то же время. Для этого требуется согласование мнений, намерений и действий агентов-партнеров.

Близкое понятие «партнерство» часто трактуется как основная форма сотрудничества, связанная с конструктивным взаимодействием между агентами. Это взаимодействие реализуется на основе психологических механизмов подражания и заражения.

В данной работе термины «сотрудничество» и «партнерство» нами рассматриваются как синонимы, а необходимым условием формирования отношений сотрудничества между агентами считается их взаимопонимание.

В [25] отмечено, что создание общего языка и единого поля знаний (мнений) выступает как основа взаимопонимания, координации и совместной работы естественных и искусственных агентов, а также формирования неоднородных многоагентных систем. Здесь центральное место занимает онтологический подход, предполагающий разработку семейства гранулярных и нечетких онтологий [25] для взаимодействующих когнитивных агентов.

Понимание есть важнейшая способность когнитивного агента. В системах «человек-кобот» оно выступает как предпосылка и необходимое условие об-

щения и совместной работы, в частности организации коммуникативно-информационных и коммуникативно-аффективных процессов. Для более полного исследования проблемы взаимопонимания в системе «человек-кобот» построим модифицированную модель «граней понимания» Уиггинса — Мактайга (рис. 3).

Рис. 3. Модифицированная модель Уиггинса — Мактайга для когнитивных агентов

На конференции ГИСИС-2018 [26] нами была подробно изложена аксиологическая трактовка понимания как оценки на основе образца. Ниже рассмотрим остальные пять «граней понимания» с помощью соответствующих диад. Эффективность совместных действий человека и кобота непосредственно зависит от источников и механизмов познания, средств интерпретации ситуации, организации системы рассуждений и аргументации для реализации процедур объяснения и обоснования, имитации эмоциональных механизмов сопереживания.

Взаимосвязи между познанием и пониманием являются двусторонними: сама возможность познания и результативность действий агента во многом определяется уже достигнутым уровнем понимания (предпониманием), но понимание, в свою очередь, сильно зависит от наличия информации, когнитивных возможностей и структуры языка. К примеру, понимание ограниченного естественного языка обеспечивается не только языковыми, но и внеязыковыми факторами [27], в особенности, пресуппозицией, обусловленной предшествующим опытом (рис. 4).

Рис. 4. О взаимосвязях между пониманием и познанием

Вопросы соотношения между пониманием и интерпретацией активно изучаются в герменевтике, где ключевую роль играет цепочка «понимание — интерпретация — смысл». Нередко понимание полностью отождествляется с интерпретацией, трактуемой как корректное истолкование текстового источника. Однако чаще эти категории разводят между собой, причем понимание берется в качестве базиса для всякой интерпретации, или, иначе, интерпретация рассматривается как особый аспект понимания, направленный на смысловое содержание текстов.

Если понимание предполагает установление прямого, очевидного, конкретного смысла, то интерпретация охватывает такие операции, как выявле-

ние скрытого смысла, придание нового смысла, порождение смысла в диалоге. Еще классики герменевтики, в частности В. Дильтей [28] и Х.-Г. Гадамер [29], утверждали, что чем глубже уровень понимания, тем богаче интерпретация, тем более интересные и нетривиальные истолкования могут возникнуть.

Понимание ситуаций, намерений и действий агентов в кобототехнике оказывается гораздо более сложной задачей, чем понимание текстов. Здесь очень важную роль играют диалоги между партнерами и согласование их нормативных представлений.

Важнейшая познавательная процедура, способствующая пониманию в кобототехнических системах, — объяснение задачи человеком коботу. Объяснение — это рассуждение, посылки которого содержат информацию, достаточную для выведения из нее описания объясняемого явления. Объяснение и понимание часто трактуют как две универсальные операции мышления, взаимно дополняющие друг друга [30]. На рисунке 5 показаны базовые взаимосвязи между процедурами объяснения и понимания в процессе сотрудничества когнитивных агентов.

Рис. 5. Диада «объяснение — понимание»: взаимосвязи и различия рассуждений

Объяснение, рассматриваемое как подведение объясняемого явления под некоторый закон, пример или общую истину, опирается на описание и обеспечивает понимание, а понимание как подведение под общее правило или стандарт имеет нормативную базу.

Классическим вариантом объяснения является объяснение *на примерах*. Пример принципиально отличается от образца. *Пример* говорит о том, что имеет место в действительности, а *образец* — о том, что должно быть. Иными словами, примеры используются для поддержки описательных суждений, а ссылки на образцы служат обоснованием правил и норм.

Соответственно, помимо объяснения, понимание агента опирается на такие процедуры, как *обоснование* и *оправдание.* В общем случае обоснование есть процедура аргументации, приведения доводов в пользу принятия определенного решения. Обоснование может быть абсолютным или сравнительным. Схема абсолютного обоснования имеет вид «*A* должно быть принято в силу *C*», где *A* — обосновываемое положение, а *C* — основание для его принятия. Структура сравнительного обоснования сводится к выражению «лучше принять *A*, чем *B*, в силу *C*» [30].

Часто обоснование заключается в проверке полученного решения на предмет непротиворечивости знаниям, которые хранятся в памяти когнитив-

ного агента. Речь идет о погружении нового факта в систему уже имеющихся фактов, таком, что добавление этого факта не порождает противоречий. В то же время *оправдание* означает погружение нового факта в систему ценностей агента, при условии, что положительная оценка данного факта ей не противоречит. Иными словами, реальное обоснование связано с трактовкой истинности как когерентности — степени согласованности факта с располагаемым знанием, а степень оправдания сильно зависит от системы ценностей. В поведенческом плане обоснование направлено на формирование нормативного поведения кобота, а оправдание скорее влечет за собой ситуативное поведение.

Следуя Д. А. Поспелову [31], можно проследить взаимосвязи между видами рассуждений человека-партнера в общении и обучении кобота-партнера, этапами обучения и формируемым у кобота типом поведения. В русле психологического структурного анализа Э. Берн выделил три состояния «Я» когнитивного агента: «Родитель», «Взрослый» и «Ребенок». Рассуждения «Родителя» основаны на жесткой системе аксиом, содержащих незыблемые истины и нормы, т. е. имеем *достоверный вывод* без всякой неопределенности и возможности пересмотра (типичный пример: рассуждения, основанные на законах робототехники А. Азимова). На начальном этапе обучения подобные рассуждения призваны сформировать этические основы нормативного поведения кобота.

Рассуждения «Взрослого» — более гибкие, подразумевая критическое осмысление поступающей информации, а также ее проверку на соответствие реальному миру. Здесь вывод является скорее *правдоподобным*, чем достоверным, а порой и *немонотонным*. Нередко он заменяется аргументацией или простым погружением нового факта в базу знаний кобота, если это не приводит к противоречию. На данном этапе у кобота возникает понимание ситуации совместной деятельности с человеком и выполняемых задач.

Наконец, схема рассуждений, относящаяся к состоянию «Ребенок», тесно связана с чувственной сферой и операциями оправдания. Здесь на первый план выходят *эмоциональные механизмы рассуждений*, основанные на оценочной функции эмоций и направленные на обеспечение сотрудничества.

В контексте общения и взаимопонимания агентов ключевую роль играет *эмпатия,* связанная с вживанием агента в другое «я», и появление у кобота-партнера при взаимодействии с человеком хотя бы зачатков *сопереживания*, что предполагает идентификацию эмоций человека-партнера.

В целом соединение диалоговых процедур обучения путем объяснения и обоснования с процедурами прямого обучения кобота движениям человека, а также учет и воспроизведение эмоциональных факторов сопереживания представляют собой главные условия обеспечения эффективной совместной деятельности в партнерских системах «человек-кобот».

3. Диалоговое управление и расширенный многомодальный интеллектуальный интерфейс в системах «человек-кобот»

Появление коллаборативной робототехники означает переход от жесткого копирующего или полуавтоматического управления к различным стратегиям гибкого, интерактивного управления, направленным на формирование и поддержание партнерских отношений. К их числу относятся подходы и методы информационного, рефлексивного, адаптивного, диалогового управления. Под *информационным управлением* здесь понимается любая форма целенаправленного воздействия человека-партнера, связанная с информированием кобота-партнера, которое побуждает последнего к совершению требуемых действий. Информирование может носить характер целеуказания, ограничения, создания общей информационной картины, уточнения ситуации или оценки действия. Старший партнер (человек) передает сообщение, связанное с его потребностью, младшему партнеру (коботу),который выбирает и согласует с человеком действие на основе своей информированности о существенных параметрах задачи. Оценка результата действия меняет уровень информированности кобота. Таким образом, управляющее воздействие носит косвенный характер; оно запускает определенный алгоритм поведения кобота в неполностью, неточно или нечетко определенной среде.

Близкое понятие *рефлексивного управления* заключается в том, что старший партнер вначале прогнозирует возможные действия младшего партнера в конкретной ситуации, а затем тому сообщается необходимая информация, стимулирующая желательный для коллаборативной системы выбор.

Рефлексивное управление в кобототехнических системах обладает рядом особенностей.

1. Оно носит отражательный характер (у человека-партнера создается представление о возможном действии кобота-партнера: «я думаю, что кобот сделает это так»).

2. В рефлексивном управлении велика роль формирования совместных намерений, определяющих планирование действий.

3. Рефлексивное управление пронизано разного вида неопределенностями.

Адаптивное управление опирается на принцип взаимной адаптации человека и кобота в партнерской системе. В частности, человек-партнер может использовать информацию, получаемую от сенсорной системы кобота-партнера, для оперативной адаптации системы «человек-кобот» к внешней среде.

Диалоговое управление в системе «человек-кобот» представляет собой высшую форму интерактивного управления [23]. Здесь под диалогом понимается любая последовательность коммуникативных актов между партнерами (человеком и коботом), которые считаются способными меняться ролями («активный-пассивный» партнер или «говорящий-слушающий» в процессе общения). Любой диалог предполагает обмен сообщениями между когнитивными агентами, связанный с изменением их задач и состояний (мнений, целей, обязательств и пр.). Диалог человека с коботом включает как целеуказа-

ния и инструкции, передаваемые человеком искусственному агенту, так и обратную связь — сообщения от кобота человеку с просьбой уточнить исходные инструкции,а также сведения о текущей ситуации или информацию о достижении поставленной цели. Он может осуществляться разными способами, например путем использования естественно-языковых средств (голосовых или текстовых). Общая модель диалогового управления представлена на рисунке 6.

В контексте формирования сотрудничества человека и кобота большой интерес представляет организация визуального управления [32] в случае невербального общения. Невербальный диалог на языке мимики, жестов и телодвижений, особенно в условиях дополненной реальности [3], может способствовать не только лучшему пониманию партнера, но и предвидению его оценок и реакций, что позволит коботу оперативно корректировать свои действия и поведение.

Рис. 6. Общая схема диалогового управления

Эффективная организация взаимодействий в системе «человек-кобот» предполагает построение комфортного интеллектуального партнерского интерфейса. В соответствии с [33], главными функциями интеллектуального интерфейса являются «5 О»: Общение, Обучение, Объяснение и Обоснование, Оценивание. Еще в книге [10] было выдвинуто предложение обеспечить антропоцентрический подход к организации интерфейса в человеко-машинных системах гибридного интеллекта. Традиционно дружественный для человека интерфейс в системах «человек-компьютер» связывался с широким использованием ограниченного естественного языка и графических средств, включая иллюстративную и когнитивную графику.

В классическом случае копирующего и полуавтоматического управления человек на основе воспринимаемой информации управляет движениями робота в непрерывном режиме путем движения своих конечностей. Дальнейший прогресс в этом направлении связан с различными технологиями захвата и формирования движений, например с помощью цифровой камеры, подключенной к компьютеру, или так называемого «аватар-костюма», обеспечивающего анализ и передачу движений человека, которые копирует робот.

Речевой интерфейс представляет собой главный способ организации диалога в русле сотрудничества человека и кобота. Поддержание речевого диалога в системе «человек-кобот» предполагает как распознавание и понимание коботом речи человека, так и синтез речи у самого кобота. В то же время реализация партнерских отношений на базе стратегии гибридного интеллекта требует построения многомодального интерфейса «человек-кобот» [34], включающего зрительную, тактильную и другие модальности. Так, трехмерная система технического зрения у кобота позволяет ему автономно функционировать, предотвращать ситуации столкновения с человеком-партнером и препятствиями, а также успешно работать при сбоях встроенного программного обеспечения. Здесь источниками первичной пространственной информации служат теле- и видеокамеры, оптические и голографические датчики.

При непосредственном контакте кобота с человеком-партнером или оборудованием производственной среды ключевую роль играют тактильные датчики, позволяющие реагировать на прикосновение и измерять давление в местах контакта. Эти датчики служат для распознавания обстановки путем ощупывания предметов, а также получения обратных связей по усилиям.

Целью общения человека с коботом в процессе совместной работы может быть выдача целеуказаний, задание вопросов и получение на них ответов, демонстрация намерения или оценки, прямое обучение с помощью показа человеком нужных действий коботу и пр. Поэтому наряду с речевыми, зрительными, тактильными средствами общения, важное место в расширенном интерфейсе «человек-кобот» могут занимать «языки тела человека», включая жесты и позы, движения головы и глаз, выражения лица. Реализация такой синергии модальностей — важный шаг на пути к созданию партнерского интеллектуального интерфейса «человек-кобот».

Вариант общей архитектуры кобота изображен на рисунке 7.

Здесь кобот, имеющий статус когнитивного и коммуникативного агента, содержит многомодальный интеллектуальный интерфейс, в частности систему распознавания речи и мимических оценок человека-партнера, базу знаний (мнений) и семейство сенсорных систем, обеспечивающих оперативное построение динамической модели внешнего мира (в перспективе также модели человека-партнера и себя), исполнительную систему. Главная когнитивная особенность кобота — многоканальность процесса познания, формирование мнений на основе информации, получаемой, по крайней мере, из трех источников: от человека-партнера через многомодальный интеллектуальный интерфейс, из своей базы знаний и системы датчиков.

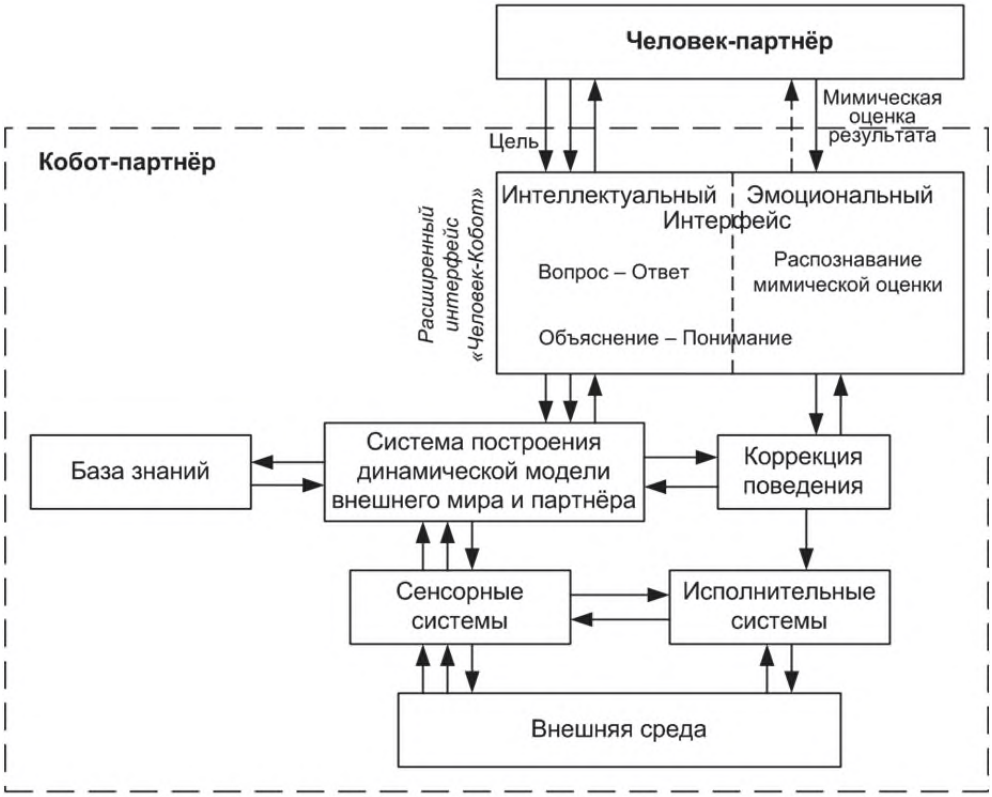


Рис. 7. Общая архитектура кобота как когнитивного агента с расширенным интеллектуальным интерфейсом

Набор коммуникативных возможностей кобота определяется уровнем развития многомодального интерфейса, обеспечивающего принятие целей человека-партнера, поддержку различных «граней» понимания ситуации, интерпретацию намерений партнера, требуемых действий и их оценок, участие в выработке и осуществлении различных вариантов сотрудничества, планировании и выполнении совместных действий.

Дополнение интеллектуального интерфейса эмоциональным интерфейсом играет ключевую роль в различных приложениях систем «человек-кобот»: партнерских производственных системах в русле Индустрии 4.0, сервисных медицинских приложениях, а особенно, в социальной сфере. Речь идет об обслуживании, развлечении и уходе за людьми старческого возраста, абилитации и реабилитации лиц с ограниченными возможностями, поддержке детей, страдающих аутизмом, и т. п. По сути, это начальный шаг на пути к роботам нового поколения — «сознательным» коботам.

4. Что такое сознание?

Для развития науки весьма характерны возвраты к идеям и моделям, которые возникли ранее, но намного опередили свое время и не нашли применения. В истории искусственного интеллекта и смежных областей такие случаи бывали неоднократно. Здесь ярким примером может служить развитие нейронных сетей. Формальные нейроны, введенные еще в 1940-х гг., перцептроны, а также модели распознавания и обучения на их основе, активно развивавшиеся в 1960-е гг., затем, казалось, исчерпали себя и были преданы забвению на протяжении почти двух десятилетий. Возродившись в конце 1980-х гг. на базе специальных аппаратных средств, они приобрели исключительную популярность в наши дни в русле методологии глубокого обучения, реализуемой в сверточных и капсульных нейронных сетях.

Похожая судьба ожидала концепцию *психоники* — исследования, моделирования и использования психологических закономерностей при разработке искусственных систем и соответствующую программу работ по искусственному интеллекту, которая была выдвинута Д. А. Поспеловым. В заключительной части своей книги 1982 г. «Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту» он отмечал, что исследования в этой области должны быть нацелены на «***изучение психики человека*** с целью ее имитации в технических системах, решающих определенный набор практических задач, традиционно считающихся интеллектуальными» [35; с. 211]. Такое широкое представление целей ИИ является чрезвычайно интересным и значительно опередило свое время.

В психологии термин «психика» охватывает как *сознание*, так и сферу *бессознательного*, а сознание человека с древних времен характеризуется психологической триадой «интеллект — чувства — воля».

С позиций психоники, ***сознание*** — это отношение агента к миру со знанием его объективных закономерностей, которое прямо зависит от его способности получать и накапливать совокупное знание людей посредством языка. Сознание характеризуется осознанностью потребностей и формированием целей деятельности агента, понятийным моделированием будущих событий, предвосхищением результатов действий. Оно тесно связано с самосознанием, формированием собственного «Я», основанного на системе ценностей агента.

Интеллект агента неразрывно связан с системой его познавательных способностей, включающей ощущения, восприятие, память, представления, воображение, мышление, обучение, понимание. Именно интеллект кобота определяет его работоспособность в новой ситуации путем надлежащих корректировок поведения.

Роль *эмоций* (*аффектов*) агента связана с пониманием и интерпретацией получаемой информации и формируемых знаний, а также с общей оценкой поведения. *Оценочная функция эмоций*, проявляющаяся в виде переживаний,

по сути, ставит эмоции в один ряд с другими формами познания и понимания. В контексте общения эмоции выполняют также *экспрессивную функцию*, характеризуя текущее состояние агента и его отношение к происходящему.

В системах «человек-кобот» содержание эмоций обусловлено состоянием старшего партнера-человека, его намерениями, действиями кобота и оценкой их выполнения. Поэтому построение персонифицированного партнерского интерфейса может опираться не только на чисто когнитивное моделирование, но и на использование функций эмоций, в особенности, оценочной функции. В частности, при обучении кобота путем наглядной демонстрации нужных движений и действий естественной выглядит оперативная организация обратной связи посредством мимики и жестов. Быстрая оценка действий кобота человеком-партнером с помощью соответствующего выражения лица нередко имеет преимущества по отношению к речевому взаимодействию. Распознавание коботом эмоций человека в процессе их совместной работы, может во многом определять его дальнейшее поведение и эффективность партнерства в целом.

Наконец, *воля* как потребность к преодолению внутренних и внешних препятствий при выполнении действий (в том числе совместных действий в развертывании партнерских отношений) выступает как важнейший агентообразующий и агентосохраняющий фактор. К примеру, ее проявлением выступает настойчивость агента [36]. Волевое поведение предполагает возврат кобота к выполнению поставленной задачи в случае первоначальной неудачи и выяснения ее причин (несколько попыток выполнения задачи).

Следует отметить триединство когнитивных, эмоциональных и волевых процессов, состояний и свойств, обеспечивающих целостность сознания. Познание формирует жизненный цикл информации и знаний у агента, эмоции обеспечивают чувственную интерпретацию имеющихся ощущений, представлений, мнений и знаний, а воля связывает интеллект и эмоции с поведением и деятельностью агента.

Лишь спустя 25 лет после выхода в свет вышеуказанной монографии [35] схожие идеи и подходы к созданию открытых систем искусственного общего интеллекта — Artificial General Intelligence (кратко AGI) [5] стали активно продвигаться в западном научном сообществе. Появились также термины «самоорганизующийся ИИ», «сильный ИИ» и др. В 2000-е гг. вокруг конференций по биологически инспирированным когнитивным архитектурам (Biologically Inspired Cognitive Architectures) образовалось международное общество специалистов по ИИ BICA Society, в центре внимания которого находятся проблемы синтеза искусственного сознания, в частности создания «сознательных» и «любознательных» роботов [37]. В России в середине 2010-х годов появилась научная школа моделирования поведения Г.С. Осипова —«поведение, управляемое сознанием» [38].

«Сознательные» коботы с широкими возможностями сотрудничества с человеком представляют особый интерес в плане практической реализации

AGI. Сознание отнюдь не ограничивается совместным знанием, а, прежде всего, включает «знания, пронизанные переживаниями». Самоорганизация сознания начинается с переживаний.

5. Теоретические предпосылки инженерии эмоций в кобототехнике и построения эмоциональных интерфейсов

5.1. О психонике эмоций

Инженерное проектирование эмоций в кобототехнике и построение эмоциональных интерфейсов «человек-кобот» следует предварить анализом и систематизацией основных положений, сведений и результатов психологии эмоций.

Эмоции выражают состояние субъекта и его отношение к объекту [39]. Отсюда вытекает двухкомпонентность структуры эмоциональных явлений, связанных с отражением как объекта эмоции, так и собственного состояния агента.

Подобно другим психическим явлениям, эмоции могут рассматриваться как процессы и состояния: в устойчивых формах они могут переходить в свойства личности. Примерами эмоциональных состояний служат аффект, подъем, удовлетворение, а эмоционально обусловленных свойств человека — любопытство, отзывчивость, тревожность.

Эмоции имеют внутренний и внешний план (план содержания и план выражения). Во внутреннем плане эмоции представляют собой переживания, имеющие значимость для субъекта. Во внешнем плане эмоции проявляются в первую очередь в мимической активности, жестах, интонациях речи и пр.

Начиная с Ч. Дарвина, выделяют две существенные характеристики эмоций: 1) биполярность (или валентность — наличие положительных и отрицательных эмоций) и 2) силу оппозиции (интенсивность переживания) [39—41]. Типичными примерами биполярных эмоций, упорядоченных по силе оппозиции, служат «счастье — горе» и «радость — печаль» или «любовь — ненависть» и «симпатия — антипатия».

По В. Вундту, эмоции прямо связаны с субъективными ощущениями — приятными и неприятными. Им же предложены цветовые эквиваленты знаковых различий между эмоциями.

Как правило, источником эмоции выступает потребность: простые, базовые эмоции отвечают основным жизненным потребностям агента. Эмоция называется *положительной*, если она возникает в связи с удовлетворением потребности или достижением цели, и, наоборот, *отрицательной* при неудовлетворении потребности или недостижении цели.

Положительная эмоция представляет состояние агента, которое он стремится максимизировать или, во всяком случае, стабилизировать, а отрицательная эмоция — состояние, которое он старается минимизировать.

В то же время шкалы эмоций являются динамическими, а «логика эмоций» отнюдь не всегда выступает двузначной и монотонной. В реальной жизни обычное дело — не только переходы,связанные с изменением интенсивности эмоций (типа описанной еще Ч. Дарвином цепочки «интерес — удивление — изумление»), но и смена знака эмоции, переход от симпатии к антипатии, от страха к гневу и т. п. Такие эмоциональные перескоки происходят ввиду возникновения своего рода напряженно-деформированного состояния базовой биполярной шкалы эмоций и ее простых топологических преобразований (деформации типа растяжения, сжатия, сдвига, изгиба, кручения и т. п.). Например, операция сдвига, расширяющая область полезных для совместной работы эмоций и нарушающая симметрию между полюсами шкалы, означает превращение «классической логики эмоций» в «интуиционистскую».

Ряд психологов, в частности К. Э. Изард [42], обращают особое внимание на амбивалентность эмоций. Например, он утверждает, что такие эмоции, как гнев, страх, стыд и др., нельзя однозначно отнести к положительным или отрицательным. В одних ситуациях они могут ощущаться как полезные для выполнения деятельности и, следовательно, как положительные, а в других — как вредные, т. е. отрицательные.

По времени проявления различают констатирующие и предвосхищающие эмоции. В первом случае эмоции служат для констатации факта, выражая оценку агентом определенной ситуации, связанной с удовлетворением потребности в данный момент. Во втором случае они носят идеаторный характер, относятся к будущим событиям и возникают в связи с пережитыми или воображаемыми ситуациями (например, «предвкушение»).

Эмоции агента часто выступают как побуждения к деятельности и влияют на ее динамику. Они могут быть непосредственно связаны с действиями. Так, В. Плутчик выделил четыре пары базисных оппозиционных эмоций, каждая из которых соотносится с определенными действиями (см.[42]): 1) «одобрение» (принятие) — «отвращение» (отвержение); 2) «радость» (разрешение или воспроизведение) — «уныние» (запрет, лишение); 3) «гнев» (разрушение) — «страх» (защита); 4) «ожидание» (исследование) — «удивление» (ориентация).

Помимо оценочной и экспрессивной функции, выделяют ряд других функций эмоций: 1) сигнальную; 2) регулирующую; 3) информационную; 4) функцию подкрепления и закрепления полезного действия; 5) функцию активизации/мобилизации агента; 6) компенсирующую функцию.

Сигнальная функция эмоций выражается в том, что переживания агента возникают и изменяются в ответ на неблагоприятные изменения состояния среды или самого агента. Регулирующая функция эмоций связана с поддержкой и координацией поведения агента. В обучении важную роль играет подкрепление, а положительная эмоция агента подкрепляет и закрепляет освоенное им полезное действие. В сложной ситуации эмоции активизируют дея-

тельность агента и мобилизуют его прошлый опыт. Наконец, компенсирующая функция эмоций связана с замещением или компенсацией дефицита информации при осуществлении выбора в условиях неопределенности.

Остановимся подробнее на информационной функции эмоций. В результате анализа различных ситуаций информационного обеспечения деятельности и поведения П. В. Симонов [43] разработал потребностно- информационную теорию эмоций. Она опирается на предположение о том, что эмоции агента связаны с оценкой текущей потребности (ее качества и величины N) и возможности ее удовлетворения. При этом степень эмоционального напряжения в ходе выполнении деятельности прямо зависит от силы потребности N, а также от информации I о средствах ее удовлетворения, точнее, от разницы между информацией $I_н$, необходимой для удовлетворения потребности, и информацией $I_р$, располагаемой агентом. Формула эмоций П. В. Симонова имеет вид

$$Э = f\,[N,\, m(I_н - I_р)],$$

где m — мера возможности или вероятности. При дефиците информации $I_н > I_р$ возникают отрицательные эмоции, активно минимизируемые агентом, а избыток информации $I_н < I_р$ приводит к положительным эмоциям, максимизируемым агентом.

5.2. Классификации и пространства эмоций

Первые классификации эмоций носили чисто гедонистический характер. Еще Б. Спиноза определил в качестве базовых эмоций «удовлетворение», «неудовлетворение» и «желание» [39]. Затем В. Вундт выделил три пары биполярных эмоций [41]: 1) «удовольствие — неудовольствие»; 2) «возбуждение — торможение»; 3) «напряжение — расслабление». В его трехмерном пространстве эмоций в дополнение к валентности были введены еще два измерения переживаний, отражающих аспекты активации. При этом двумя первичными формами он также считал «удовольствие» и «неудовольствие» (или «удовлетворение» и «неудовлетворение»). Удовольствие есть следствие и знак успеха, а неудовольствие — неудачи и фрустрации. Возбуждение — составная часть многих аффектов, например гнева, радости.

Эмоции, возникающие в процессе деятельности, могут способствовать повышению или понижению уровня активности, степени возбуждения и в конечном счете работоспособности человека. В первом случае они называются стеническими и характеризуют общее состояние эмоционального подъема, а во втором случае — астеническими, связанными с эмоциональной подавленностью. Примерами стенических эмоций, мобилизующих агента к выполнению действий, служат «любовь», «радость», «ярость», «гнев», а обратными примерами астенических эмоций, подавляющих агента, — «страдание», «грусть», «печаль», «тоска». Так, гнев может быть ориентирован на устране-

ние препятствий, мешающих достижению цели, и таким образом способствовать повышению эффективности деятельности. Направленная на себя печаль заставляет обходиться без той цели, которой не удалось достигнуть, и парализует конструктивное взаимодействие.

Вместо пар «возбуждение — успокоение» и «напряжение — расслабление» в качестве образующих пространства эмоций используют и другие пары, например пару «контроль — импульсивность» (по Ч. Осгуду), доксастические пары: «принятие — отвержение», «уверенность — неуверенность»,

В свою очередь, К. Э. Изард [42] указал 10 базовых индивидуальных эмоций, имеющих специфические нервные субстраты и легко выражаемых с помощью мимики: «радость», «печаль», «любовь» «ненависть», «интерес», «удивление», «гнев», «презрение», «стыд», «страх». Близкая система базовых эмоций была описана в [44].

Упомянутые выше классификации соответствуют представлению эмоций как переживаний, связанных с удовлетворением или неудовлетворением базовых потребностей агентов и допускающих адекватное невербальное (например, мимическое) выражение.

Укрупненные классификации эмоций были предложены в [45; 46]. Ниже представлены их сокращенные варианты применительно к обеспечению сотрудничества в системе «человек-кобот». В классификации Б. И. Додонова эмоции подразделяются на следующие группы: 1) гедонистические эмоции; 2) коммуникативные эмоции (возникающие при общении партнеров и лежащие в основе сотрудничества: уважение, симпатия, одобрение); 3) альтруистические эмоции (участие, желание помогать партнеру, выражение преданности и радости за его успех); 4) гностические эмоции (относящиеся к познанию агента и связанные с потребностью в преодолении когнитивного диссонанса и достижении когнитивной гармонии: удивление, чувство догадки, близости решения, озарение, радость открытия); 5) праксические эмоции (в частности, связанные с успехом или провалом совместной деятельности: вдохновение, заражение, увлеченность работой).

У В. О. Леонтьева группы эмоций выделены по источнику происхождения [46]: а) эмоции агента, связанные с удовлетворением его жизненных потребностей; б) эмоции агента, возникающие в результате взаимоотношений с его партнером; в) эмоции, связанные с удовлетворением потребностей партнера; г) эмоции, возникающие в результате сопоставления объекта с социальными правилами и нормами; д) эмоции агента, относящиеся к самооценке, сравнению своих действий со своими же убеждениями и правилами.

Этим классификациям соответствуют пятимерные пространства эмоций.

5.3. Модель эмоционального взаимодействия партнеров в системе «человек-кобот»

В [46] были указаны четыре основных критерия для классификации эмоций: а) знак эмоции c_1 (положительный или отрицательный); б) направлен-

ность эмоции c_2 (на себя или на других лиц); в) источник происхождения эмоции c_3; г) время возникновения эмоции c_4. На базе этих критериев И. Б. Фоминых [47] построил алгебру эмоций.

Следуя [46; 47], изложим варианты классификации эмоций при совместной работе двух агентов — человека a_1 и кобота a_2. В данном случае у партнера a_1 эмоции характеризуют выполнение собственных потребностей, а у партнера a_2 они возникают в этой связи, т. е. обусловлены чужими эмоциями и зависят от отношений между агентами a_1 и a_2. Таким образом, в результате рефлексии получаем метаэмоцию как «эмоцию от эмоции».

Будем использовать попарно критерии (c_1, c_2) и (c_2, c_3). Пусть e_1 — эмоция, понимаемая как оценка удовлетворения потребности агента a_1, которая может быть положительной e_i^+ или отрицательной e_i^-, r_{21} — отношение агента a_2 к агенту a_1, r_{21}^+означает симпатию, а r_{21}^-— антипатию, и e_{21} — оценка эмоции агента a_1 агентом a_2. Возьмем в качестве базовой пары эмоций при совместной работе в системе «человек-кобот» эмоции удовлетворения и неудовлетворения. Согласно И. Б. Фоминых [47], получаем четыре основных случая эмоциональных оценок и описания соответствующих ситуаций.

1. Совместная радость партнеров: $e_{21}^+ = r_{21}^+ e_1^+$. Агент a_1 чувствует и демонстрирует удовлетворение (радость). Агент a_2 относится к агенту a_1 с симпатией,поэтому он также испытывает удовлетворение от успеха партнера.

Наступает ситуация общего удовлетворения или совместной радости.

2. Сострадание: $e_{21}^- = r_{21}^+ e_1^-$. Агент a_1 демонстрирует неудовлетворение (страдание). Агент a_2 относится с симпатией к агенту a_1, поэтому неудовлетворение партнера приносит ему огорчение. Налицо ситуация сострадания или сочувствия.

3. Зависть: $e_{21}^- = r_{21}^- e_1^+$. Агент a_1 демонстрирует удовлетворение. Агент a_2 имеет к нему антипатию и поэтому испытывает неудовольствие. Получаем ситуацию, когда один агент завидует другому.

4. Злорадство: $e_{21}^+ = r_{21}^- e_1^-$. Агент a_1 демонстрирует неудовлетворение. Агент a_2 относится к нему с антипатией и поэтому испытывает радость по данному поводу (злорадство).

Отсюда видно, что метаэмоции имеют первостепенное значение для конструктивного взаимодействия агентов в системе «человек-кобот». Партнерские отношения (особенно в социальной робототехнике) требуют от кобота a_2 выражения радости в случае успехов партнера a_1 и демонстрации сострадания при его неудачах. Разделение эмоций в рамках сотрудничества предполагает наличие симпатии между агентами и видится как необходимое условие эффективности их совместной деятельности, в противном случае налицо антипатия, которая блокирует сотрудничество.

Для обеспечения эффективной совместной работы человека и кобота надо формировать ситуации эмоционального консонанса, т. е. брать за основу оба случая эмоций одного знака у партнеров. Признаки эмоционального диссонанса, а именно эмоций разных знаков в системе «человек-кобот» сигнализируют о ситуации непродуктивного взаимодействия.

6. Программная реализация распознавания эмоций по выражению лица

Формирование дополнительного, эмоционального интерфейса [48] в системе «человек-кобот» направлено на повышение эффективности совместной работы партнеров благодаря оперативной мимической оценке результатов выполнения в режиме непосредственного контакта. При разработке такого интерфейса можно выделить прямую и обратную задачи инженерии эмоций в кобототехнике [49]: 1) воспроизведение коботом различных выражений лица человека (в плане обеспечения эмоционального консонанса); 2) оценивание эмоционального состояния и намерений партнера-руководителя, т. е. человека по выражению его лица.

Для решения обеих этих задач важное значение имеет обучение кобота распознаванию эмоций по имеющимся архетипам, представленным в виде массива фотографий. Эта вспомогательная задача рассмотрена в бакалаврской работе Т. Панютиной, выполненной под руководством автора. Она решалась с помощью сверточной нейронной сети. При реализации алгоритма обработки изображений в данной сети использована облачная среда Colaboratory от компании Google. Для обучения нейронной сети выбран массив данных о распознавании эмоций человеческого лица FER2013 (FER — сокращение от Facial Emotion Recognition) [50], состоящий из более, чем 36 тыс. изображений лица размером 48×48 пикселей в различных градациях серого. Каждое изображение лица выражает одну из 7 градаций биполярной шкалы эмоций «удовлетворение — неудовлетворение»: «счастье», «радость», «удивление», «нейтральное», «грусть», «страх», «гнев». В результате обучения каждая из 7 эмоций распознается с точностью порядка 70 %, что служит подтверждением применимости мимического оценивания для обеспечения взаимопонимания и успешной совместной работы человека и кобота. В дальнейшей работе предполагается построить гибридную нейро-нечеткую модель распознавания эмоций.

Заключение

Создание партнерских систем «человек-кобот» представляет собой одну из наиболее перспективных стратегий практической реализации подходов гибридного, синергетического интеллекта. Необходимым условием развития классического представления робота как многофункционального инструмента деятельности человека и перехода к организации сотрудничества, совместной работы агентов-партнеров в системе «человек-кобот» является наделение робота способностями когнитивного и коммуникативного агента. Среди этих способностей ключевую роль играет понимание как важнейший фактор эффективности познания, общения и сотрудничества. В «шестиугольнике (точнее, шестиграннике) понимания», рассмотренном в данной работе, тесно переплетаются когнитивные процессы, эмоциональные состояния, волевые про-

явления, включая наглядные интерпретации и мимические оценки, рациональные объяснения и эмоциональные сопереживания, нормативные обоснования и варианты реализации совместных, повторяющихся действий агентов.

В статье развивается диалогический подход к организации совместной работы и достижению взаимопонимания в системе «человек-кобот». Он опирается на методы и алгоритмы интерактивного, диалогового, визуального управления, а также принцип обучения кобота-партнера путем сочетания процедур объяснения и наглядной демонстрации движений и действий человека-партнера. Соответственно предложена концепция и разработана структура расширенного открытого интеллектуального интерфейса «человек-кобот», включающего коммуникативно-информационные (вопросы и ответы, процедуры объяснения, обоснования, демонстрации) и коммуникативно-эмоциональные составляющие. В интересах разработки эмоционального интерфейса «человек-кобот» изложены психонические основы имитации эмоциональной сферы у кобота, представлена модель эмоционального консонанса как основы успешного сотрудничества, кратко описано решение задачи распознавания эмоций по выражению лица человека, полученное с помощью сверточной нейронной сети.

Реализация эмоционального интерфейса «человек-кобот» имеет важное значение для различных приложений кобототехнических систем, включая производственную, сервисную и, особенно, социальную кобототехнику. Так в производственных системах «человек-кобот» на его основе можно осуществлять разные сценарии взаимодействия (рассуждений) старшего и младшего партнеров в зависимости от их состояний (см. выше п. 2), например «Родитель — Ребенок», «Взрослый» — «Ребенок», «Родитель» — «Взрослый». В рамках первого сценария могут применяться такие механизмы эмоционального воздействия в условиях прямого контакта, как внушение коботу-«ребенку» прописных истин и заражение энтузиазмом человека-партнера кобота-«холерика» (см. классификацию типов темперамента в терминах возбуждения и торможения в монографии [48]). Во втором сценарии на первый план в обучении кобота выходят подражание как воспроизведение примера и обучение на примерах. Согласно третьему сценарию, убеждение как интерактивное взаимодействие «человек-кобот», часто перерастающее в дискуссию, означает воздействие и на рациональную, и на эмоциональную сферу кобота с целью побуждения к нужному действию.

Сотрудничество людей и коботов в производственной сфере направлено на обеспечение, с одной стороны, максимальной гибкости производства, а с другой стороны, высокого качества повторяющихся (репродуктивных) процессов, физическую разгрузку и облегчение работы персонала, снижение рисков производственных травм и заболеваний благодаря обслуживанию коботами опасных или вредных для здоровья технологических процессов и т. д.

Еще большую роль эмоциональный интерфейс играет в социальной кобототехнике. Это следует из самого определения: социальный кобот есть авто-

номный физический агент, который взаимодействует с человеком, общаясь с ним в основном на эмоциональном уровне, следуя правилам социального поведения в соответствии со своей ролью. Главная задача социальной кобототехники заключается в обеспечении повседневной, повсеместной и многофункциональной поддержки (как физической, так и психологической) лиц с ограниченными возможностями в любое время и любом пункте их пребывания. Решение этой задачи требует расширения коммуникативных (в первую очередь коммуникативно-эмоциональных) возможностей коботов и изучения вариантов их социализации. Примерами социальных коботов служат коботы-учителя, реализующие разные сценарии педагогики сотрудничества для абилитации и обучения детей, страдающих аутизмом (кобототерапия, игровое обучение походке, мимике, жестам и пр.), коботы-компаньоны и помощники лиц с ограниченными возможностями, коботы-уборщицы и сиделки для обслуживания и ухода за людьми старческого возраста и т. п. Важнейшая функция социальных коботов — эмоциональная поддержка, в том числе предотвращение или снятие стрессов и фрустраций у людей. Чаще всего социальные коботы выглядят как гуманоиды или анималоиды, например роботы-собачки AIBO компании Sony.

В целом эмоциональный интерфейс в партнерских системах «человек-кобот» должен обеспечивать: 1) адекватное воспроизведение эмоций партнера; 2) восприятие и распознавание эмоций партнера; 3) понимание эмоций в контексте взаимодействия и оценки работы кобота; 4) управление эмоциями, в частности использование эмоций для установления и поддержания партнерских отношений, стимуляции совместных действий.

Перечисленные факторы, среди которых трудно не упомянуть экономический потенциал кобототехнических систем в условиях пандемии, должны в скором времени привести к массовому производству и применению «эмоциональных», «понимающих» коботов в разных сферах нашей жизни.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 20-07-00770 и № 19-07-01208).

Список литературы

1. *Kagermann H., Helbig J., Hellinger A., Wahlster W.* Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry // Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.

2. *Шваб К.* Четвертая промышленная революция / пер. с англ. М. : Эксмо, 2016.

3. *Тарасов В. Б.* Технологии Индустрии 4.0: от цифрового производства и интернета вещей до коллаборативных роботов и интеллектуального имитационного моделирования // Мягкие измерения и вычисления. 2018. Т. 2, № 12. С. 4—19.

4. *Евгенев Г. Б.* Индустрия 5.0 как интеграция Интернета знаний и Интернета вещей // Онтология проектирования. 2019. № 1. С. 7—23.

5. *Goertzel B., Pennachin C.* (*Eds.*). Artificial General Intelligence. Berlin: Springer, 2007.

6. *Wang P., Goertzel B*. Theoretical Foundations of Artificial General Intelligence. Beijing: Atlantis Press, 2012.

7. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. М. : Эдиториал УРСС, 2002.

8. *Тарасов В.Б.* Синергетический искусственный интеллект: моделирование переговоров между автономными агентами // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы II Международного Поспеловского симпозиума (Светлогорск, Калининградская область, 30 июня — 6 июля 2014 г.). Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2014. С. 340—358.

9. *Karpov V.E., Tarassov V.B*. Synergetic Artificial Intelligence and Social Robotics // Proceedings of the 2nd International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'17, Varna, September 14—16, 2017) / ed. by A. Abraham, S. Kovalev, V. Tarassov et al. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 679. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. P. 3—15.

10. *Венда В.Ф.* Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика. М. : Машиностроение, 1990.

11. *Tarassov V.B*. Enterprise Total Agentification as a Way to Industry 4.0: Forming Artificial Societies via Goal-Resource Networks // Proceedings of the 3rd International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'18, Sochi, September 17—20, 2018). Vol. 1 / ed. by A. Abraham, S. Kovalev, V. Tarassov et al. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 874. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. P. 26—42.

12. *Atzori L., Iera A., Morabito G., Nitti M.* The Social Internet of Things (SIoT) — When Social Networks Meet the Internet of Things: Concept, Architecture and Network Characterization // Computer Networks. 2012. Vol. 56, № 16. P. 3594—3608.

13. *Емельянов В.В.* Многоагентная модель децентрализованного управления потоком производственных ресурсов // Труды Международной конференции «Интеллектуальное управление: новые интеллектуальные технологии в задачах управления» (ICIT'99, Переславль-Залесский, 6—9 декабря 1999 г.). М. : Физматлит, 1999. С. 121—126.

14. *Tarassov V.B.* Information Granulation by Cognitive Agents and Non-Standard Fuzzy Sets // Proceedings of the Sixth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW'2011, Antalya, Turkey, September 1—2, 2011) / ed. by R.A. Aliev, K.W. Bonfig, V. Kreinovich, I.B. Turksen. Kaufering: b-Quadrat Verlag, 2011. P. 59—74.

15. *Colgate J.*, *Peshkin M.* Cobots // Industrial Robots. 1999. Vol. 2, № 5. С. 335—341.

16. *Faneuff J.* Designing for Collaborative Robotics. Sebastopol Ca: O'Reilly, 2016.

17. *Ющенко А.С.* Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 12. С. 812—819.

18. *Ostergaard E.H.* The Role of Cobots in Industry 4.0. Universal Robots. White Paper.

19. *Bahrin M.A.K., Ottman M.F., Azli N.H., Talib M.F.* Industry 4.0: A Review of Industrial Automation and Robotic // Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2016. Vol. 78, 6—13. P. 137—143.

20. *Гладун В.П.* Партнерство с компьютером. Киев : Port-Royal, 2000.

21. *Стефанюк В.Л.*, *Жожикашвили А.В.* Сотрудничающий компьютер: проблемы, теории, приложения. М. : Наука, 2007.

22. *Попов Е.П., Ющенко А.С.* Роботы и человек. М. : Наука, 1984.

23. *Ющенко А.С.* Состояние и перспективы диалогового управления роботами // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. Труды Института психологии РАН. Вып. 7 / под ред. А.А. Обознова и А.Л. Журавлева. М. : Институт психологии РАН, 2015. С. 408—423.

24. *Ефремова Т.Ф.* Современный толковый словарь русского языка : в 3 т. М. : АСТ, 2006.

25. *Тарасов В.Б., Калуцкая А.П., Святкина М.В.* Гранулярные, нечеткие и лингвистические онтологии для обеспечения взаимопонимания между когнитивными агентами // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : материалы II Международной научно-технической конференции (Минск, БГУИР, 16—18 февраля 2012 г.). Минск : БГУИР, 2012. С. 267—278.

26. *Тарасов В.Б.* Биполярные шкалы, многозначные семантики и решетки модальностей в моделировании когнитивных агентов // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции (Светлогорск, Калининградская обл., 14—19 мая 2018 г.). Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 98—115.

27. *Попов Э.В.* Общение с ЭВМ на естественном языке. М. : Едиториал УРСС, 2004.

28. *Дильтей В.* Собрание сочинений в 6 томах / пер. с нем. М. : Дом интеллектуальной книги, 2001. Т. 4 : Герменевтика и теория литературы.

29. *Гадамер Х.-Г.* Истина и метод: основы философской герменевтики / пер. с нем. М. : Прогресс, 1988.

30. *Ивин А.А.* Логика оценок и норм. Философские, методологические и прикладные аспекты. М. : Проспект, 2016.

31. *Поспелов Д.А.* Моделирование рассуждений: состояние и ближайшее будущее // Теория и применение искусственного интеллекта. Созополь, Болгария, 1989. С. 46—53.

32. *Колесников А.В.* Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции (Светлогорск, Калининградская область, 14—19 мая 2018 г.). Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 18—81.

33. *Поспелов Д.А.* Интеллектуальные интерфейсы для ЭВМ новых поколений // Электронная вычислительная техника : сб. статей. М. : Радио и связь, 1989. Вып. 3. С. 4—20.

34. *Ронжин А.Л., Карпов А.А., Ли И.В.* Речевой и многомодальный интерфейсы. М. : Наука, 2006.

35. *Поспелов Д.А.* Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту. М. : Наука, 1982.

36. *Moffat D., Frijda N.H.* Where There Is a Will There Is an Agent // Intelligent Agents. Proceedings of ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ECAI-94, Amsterdam, August 8—9, 1994) / ed. by N.J. Wooldridge N.R. Jennings. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 890. Berlin : Springer-Verlag, 1995. P. 245—260.

37. Proceedings of 2017 Annual Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures (Moscow, August 1—6, 2017). Heidelberg: Springer-Verlag, 2017.

38. *Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. Часть 1. Картина мира и целеполагание // Известия РАН: Теория и системы управления. 2014. № 14. С. 49—62.

39. *Рубинштейн С. Л.* Основы общей психологии : в 2 т. М. : Педагогика, 1988.

40. *Шадриков В. Д.* Введение в психологию: эмоции и чувства. М. : Логос, 2002.

41. *Вундт В. М.* Введение в психологию / пер с нем. 3-е изд. М. : КомКнига, 2007.

42. *Изард К. Э.* Психология эмоций / пер. с англ. СПб. : Питер, 1999.

43. *Симонов П. В.* Потребностно-информационная теория эмоций // Вопросы психологии. 1982. № 6. С. 44—56.

44. *Экман П., Фриззен У.* Узнай лжеца по выражению лица / пер. с англ. СПб. : Питер, 2019.

45. *Додонов Б. И.* Эмоция как ценность. М. : Политиздат, 1978.

46. *Леонтьев В. О.* Классификация эмоций. Одесса : Изд-во ИИЦ, 2003.

47. *Фоминых И. Б.* Эмоции как аппарат оценок поведения интеллектуальных систем // Труды 10-й национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2006 (Обнинск, 25—28 сентября 2006 г.). Т. 2. М. : Физматлит, 2006. С. 687—694.

48. *Карпов В. Э., Карпова И. П., Кулинич А. А.* Социальные сообщества роботов. М. : ЛЕНАНД, 2019.

49. *Ющенко А. С., Конышев Д. В.* Моделирование эмоций в робототехнике с использованием нечеткой логики // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сборник научных трудов VIII международной научно-практической конференции (ИММВ-2015,Коломна,18—20 мая 2015 г.). М. : Физматлит, 2015. Т. 2. С. 515—525.

50. *Pramerdorfer Ch., Kampel M.* Facial Expression Recognition Using Convolutional Neural Netrworks: State-of the-Art // ArXiv, 2016.

И. Б. Фоминых[1], Н. П. Алексеев[2]
Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия
e-mail: [1]igborfomin@mail.ru, [2]alekseevnp@list.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПОЗНАВАТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ КОГНИТИВНОГО АГЕНТА В УСЛОВИЯХ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Введение

Одна из наиболее важных и сложных проблем теории интеллектуальных систем — обеспечение их устойчивости («неуязвимости») к непредвиденным заранее ситуациям («аномалиям») [1]. Аномалии возникают из-за несовершенства имеющихся у агента знаний о внешней среде и о собственных познавательных процессах и отрицательно влияют на его функционирование. Особенно тяжелыми последствия аномалий могут быть в интеллектуальных системах жесткого реального времени. В работе [2] был предложен подход к моделированию поведения интеллектуального агента, направленного на повышение устойчивости к аномалиям в условиях жестких временных ограни-

© Фоминых И. Б., Алексеев Н. П., 2020

чений. Этот подход основан на использовании концепции метапознания, реализованной средствами специально разработанного для этой цели шаговой теории семейства активных логик. Однако существует важный класс аномалий, рассмотренный ниже, при возникновении которых указанный подход оказывается недействительным. В работе предлагается способ преодоления данной проблемы, в основе которого лежит специализированный вариант грануляции времени.

1. Особенности функционирования агента в условиях существенных временных ограничений

Системы реального времени обычно классифицируются как системы мягкого и жесткого реального времени. Для систем мягкого реального времени характерно плавное ухудшение качества их функционирования при увеличении времени отклика на изменения, происходящие во внешней среде. Для систем жесткого реального времени характерно существование критического временного порога (deadline) решения стоящей перед системой задачи. Превышение этого порога чревато катастрофическими последствиями. Типичный пример аномалии для интеллектуальных систем такого рода — ситуация, когда событие, ожидаемое в назначенное время, тем не менее не наступило и можно говорить о возникновении угрозы превышения времени, отпущенного на осуществление познавательного процесса, цель которого — решение задачи, т. е. о катастрофическом ухудшении качества функционирования агента.

2. Концепция метапознания

Так как для интеллектуального агента, функционирующего в режиме жесткого реального времени, временной ресурс отводится в первую очередь на некий познавательный процесс, то и аномалии, с которыми может столкнуться такой агент, проявляются в том, что познавательный просс начинает идти «как-то не так», как ожидает агент. Ясно, что для того чтобы вовремя выявить аномальное течение познавательного процесса, агенту потребуется в некотором смысле метапознавательная деятельность.

Термин «метапознание» (metacognition) введен Д. Флэйвеллом [3; 4] и определен им как осведомленность индивидуума о своих когнитивных процессах и связанных с ними стратегиях, или, говоря его словами, как «знание и познание относительно познавательных явлений». В других источниках метапознание часто определяют как рассуждения о рассуждениях, имея в виду при этом «познание второго порядка» [5—7].

В развитие этой концепции для улучшения устойчивости агента к аномалиям предложено понятие «метакогнитивный цикл» [8], который определяется как циклическое выполнение следующих трех этапов:

— самонаблюдение (мониторинг);

— самооценка (анализ выявленной аномалии);

— самосовершенствование (регуляция познавательного процесса).

Этап самонаблюдения, на котором выявляются аномалии познавательного процесса, строится с привязкой возможных действий агента, влияющих на внешнюю среду, к ожидаемым последствиям этих действий. Признаком аномалии при этом является несоответствие ожиданий агента поступающей информации о внешней среде. На этапе самооценки устанавливается степень угрозы для качества функционирования агента, которую таит в себе выявленная аномалия, а на этапе самосовершенствования, если угроза реальна, происходит выбор новой стратегии решения задачи, стоящей перед агентом. Таким образом, логическая система, формализующая рассуждения агента с жестко ограниченными ресурсами, должна давать ему возможность оценивать имеющийся у агента временной ресурс в каждый момент времени таким образом, чтобы в зависимости от результатов оценки агент мог менять ход своих рассуждений (темпоральная чувствительность [9]). Кроме того, агент должен быть толерантен к противоречиям в своих знаниях и быть способен их выявлять. Необходимое условие также — способность агента оценивать в каждый момент времени полноту имеющихся у него знаний и осознавать не только то, что он знает, но и то, чего именно он не знает. Логические системы, предоставляющие агентам такие возможности, рассмотрены ниже.

3. Рассуждения во времени и метарассуждения на основе шаговой теории активной логики

Для того чтобы дать возможность наблюдать за процессом рассуждения агента *во время* его осуществления, предложена логическая система, получившая название «активная логика» [1; 9—11]. В дальнейшем она модифицирована как шаговая теория активной логики [2; 12; 13], обладающая рядом преимуществ, в том числе, лучшими характеристиками вычислительной сложности, свойством паранепротиворечивости; реализацией принципа грануляции времени. Для дальнейшего улучшения управления познавательным процессом предложены формализмы расширенных шаговых теорий [14; 15], отличающиеся от стандартных шаговых теорий введением наряду с сильным отрицанием субъективного отрицания, что дает возможность агенту осознавать и выражать в явном виде не только то, что он знает, но и то, чего он не знает в данный момент.

Сохраняя вероятность рассуждать об агентах, как бы «глядя на них со стороны», в то же время шаговая теория позволяет самому агенту соотносить процесс своего рассуждения с событиями, происходящими во внешней среде, в результате его деятельности или помимо нее. Как модель дедукции шаговая теория характеризуется языком, множеством дедуктивных правил, а также множеством «наблюдений». Рассуждение во времени характеризуется выполнением циклов дедукции, называемых *шагами*. Так как в основе активной логики лежит дискретная модель времени, то эти шаги играют роль временного эталона — время измеряется в шагах. Знания агента ассоциируются с индексом шага, на котором они были впервые получены.

То, что узнал агент на шаге t (t-знания), используется для вывода новых знаний на шаге $(t + 1)$. Наиболее важные дедуктивные правила вывода в активной логике представлены ниже:

$$\frac{t : now\ (t)}{t{+}1 :\ now\ (t{+}1)}$$ отсчет времени,

где *now* (.) — одноместный метапредикат, выражающий текущее время;

$$\frac{t : \phi,\ \phi \rightarrow \psi}{t{+}1 :\ \psi}$$ *modus ponens*;

$$\frac{t : \varphi,\ sub\ (\ \lceil\phi\rceil,\ \lceil\varphi\rceil),[\phi]}{t{+}1 :\ \neg K\ (t,\ \phi\ )}$$ негативная интроспекция,

где ϕ — любая формула, не известная агенту i на шаге t, но являющаяся подформулой некоторой известной ему формулы φ, *sub* (.,.) — двухместный метапредикат, выражающий отношение «быть подформулой», $\lceil\phi\rceil$, $\lceil\varphi\rceil$ — константы, обозначающие имена формул ϕ и φ, $[\phi]$ — нотация, означающая, что формула ϕ отсутствует в текущих знаниях агента на шаге t, K(.,.) — двухместный метапредикат, используемый для выражения того факта, что агенту известна некоторая формула в некоторый момент времени;

$$\frac{t :\ \phi,\ \neg\phi}{t +1 :\ contra\ (t,\ \lceil\phi\rceil,\ \lceil\neg\phi\rceil\ )}$$ выявление «прямых» противоречий,

где *contra(.,.,.)* — трехместный метапредикат, используемый для выражения того факта, что в текущих знаниях агента присутствуют формула ϕ и ее отрицание $\neg\phi$ в некоторый момент времени t.

Наблюдения могут происходить на любом шаге дедуктивного процесса. Результатом наблюдения является формула, выражающая некоторое утверждение и ассоциированная с соответствующим шагом.

4. Множественная грануляция времени

Как уже отмечалось, рассуждение во времени осуществляются посредством выполнения циклов дедукции, называемых шагами. При этом делается допущение, что шаги рассуждений имеют примерно одинаковую длительность: если длительность различных шагов также различна, то этой разницей можно пренебречь. Однако на практике это не всегда так: на длительность дедуктивных циклов могут влиять различные факторы, иногда не поддающиеся учету. Нетрудно видеть, что в таких случаях свойство темпоральной чувствительности агента утрачивается: измерение времени в дедуктивных шагах оказывается слишком неточным. Это означает, что аномалии данного типа могут быть не распознаны агентом, чье поведение описывается средствами шаговой теории.

Представляется, что эту проблему можно преодолеть, если каждому конкретному дедуктивному циклу сопоставить его индивидуальную длительность, отказавшись при этом от постулата о неразличимости различных дедуктивных циклов по времени их осуществления. Если при использовании длительности дедуктивного цикла в качестве временного эталона (как это принято в активной логике) мы имеем пример грануляции временной информации [16], то переход к индивидуальной длительности каждого цикла естественно назвать множественной грануляцией времени: теперь каждому дедуктивному циклу соответствует индивидуальная временная гранула. Представленный ниже подход к решению проблемы непредвиденного увеличения длительности дедуктивного цикла базируется на построениях, приведенных в [17], и основан на следующем.

Время рассматривается как бесконечная последовательность натуральных чисел из множества N. Будем обозначать ее Gck (глобальные часы). Так как моделирование поведения когнитивного агента осуществляется в различных условиях (= прогонах), каждому такому прогону ставятся в соответствие так называемые часы прогона модели Ck, отражающие его специфику (принцип грануляции времени). Часы прогона модели — это конечная или бесконечная строго возрастающая подпоследовательность глобальных часов, члены которой интерпретируются как моменты времени (на глобальных часах) завершения дедуктивных циклов. Множество всех таких моментов времени обозначим Ck^*. Каждый «тик» часов прогона модели соответствует одному выполнению конкретного дедуктивного цикла. При этом порядковый номер этого цикла совпадает не с моментом времени его завершения, а только с порядковым номером данного момента времени на часах прогона модели. Это позволяет, меняя часы прогона модели, имитировать различные условия работы агента. Используются также две функции — *clock* (.) и *rank* (.). Первая отображает множество N во множество Ck^*. Терм *clock* (n) интерпретируется как момент времени, имеющий порядковый номер n на часах прогона модели. Вторая функция является обратной по отношению к первой, т. е. для всех $t \in Ck^*$ $rank\ (t) = clock^{-1}\ (t)$ ее значением является порядковый номер момента времени t на часах прогона модели Ck. Тогда, если время завершения предыдущего дедуктивного цикла было t, следующий дедуктивный цикл завершится в момент времени $clock\ (rank(t)+1)$. Обозначим ($clock\ (rank\ (t)+1)$) как $next\ (t)$, т. е. момент времени, следующий после момента t на часах ck. Тогда в условиях грануляции времени дедуктивные правила вывода изменятся следующим образом (на примере правила отсчета времени):

$$\frac{t:\quad now(t)}{next(t):\ now(next(t))}\ .$$

5. Пример обнаружения аномалии познавательного процесса

Ниже приведен пример процесса метарассуждений, когда факт, что вопреки ожиданиям агента, некоторое событие A не стало вовремя ему известно (момент времени 2), проявляется в виде прямого противоречия.

Пример .

Пусть ck = (0, 1, 13, 15, 17, …)

0: … $now\,(0)$, $(now\,(t) \wedge t \geq 5) \rightarrow K\,(next\,(t), A)$, …

1: … $now\,(1)$, $(now\,(t) \wedge t \geq 5) \rightarrow K\,(next\,(t), A)$, $\neg K\,(1, A)$, …

13: … $now\,(13)$, $(now\,(t) \wedge t \geq 5) \rightarrow K\,(next\,(t), A)$, $\neg K\,(1, A)$, $\neg K\,(13, A)$, $\neg K\,(15, A)$, …

15: … $now\,(15)$, $(now\,(t) \wedge t \geq 5) \rightarrow K\,(next\,(t), A)$, $\neg K\,(1, A)$, $\neg K\,(13, A)$, $\neg K\,(15, A)$, $K\,(13, A)$, …

17: … $now\,(17)$, $(now\,(t) \wedge t \geq 5) \rightarrow K\,(next\,(t), A)$, $\neg K\,(1, A)$, $\neg K\,(13, A)$, $\neg K\,(15, A)$, $K\,(13, A)$, $contra\,(15, K\,(13, A), \neg K\,(13, A))$ …

В моменты времени 0, 1, 13, 15 сработало правило негативной интроспекции, в результате чего были последовательно выведены формулы $\neg K\,(1, A)$, $\neg K\,(13, A)$, $\neg K\,(15, A)$. В момент времени 15 сработало правило $(now\,(t) \wedge t \geq 5) \rightarrow K\,(next\,(t), A)$, выражающее ожидание, что по прошествии 5 единиц времени агент будет знать, что в результате осуществляемого им познавательного процесса произошло событие A. В момент времени 17 сработало правило обнаружения противоречия, в данном случае между ожиданием агента, что он узнает о наступлении события A по истечении 5 единиц времени, и фактом, что к указанному времени информации о наступлении события A агенту не поступила. Заметим, что без множественной грануляции времени данная аномалия не была бы выявлена вовремя.

Заключение

Рассмотренная в докладе множественная грануляция времени ориентирована для применения поведения когнитивного агента при существенных временных ограничениях. Опыт практического использования метапознавательных стратегий в сочетании со множественной грануляцией времени существенно расширяет класс непредвиденных ситуаций, которые могут быть успешно разрешены при моделировании поведения интеллектуальных агентов. Тем не менее рассмотренный подход не следует трактовать как панацею, решающей все проблемы, связанные с обеспечением устойчивости к аномалиям интеллектуальных систем. Не вызывает сомнений также, что на пути решения этих проблем метакогнитивный подход является необходимым звеном.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-07-00213, 18-29-03088, 19-07-00123).

Список литературы

1. *Michael L. Anderson, Don Perlis.* Logic, self-awareness and self-improvement: The metacognitive loop and the problem of brittleness, in Journal of Logic and Computation. 2005. 15. 1.

2. *Виньков М.М., Фоминых И.Б.* Повышение устойчивости к аномалиям интеллектуального агента с ограниченным временным ресурсом: метакогнитивный подход // Труды XII национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010. М. : Физматлит, 2010.

3. *Flavell J.H.* (1979). Speculations about the nature and development of metacognition // In F. Weinert & R. Kluwe, eds., *Metacognition and Motivation*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

4. *Flavell J.H.* (1987) Metacognition and cognitive monitoring: A new era in cognitive- developmental inquiry. American Psychologist, 34(10), 1987. P. 906—911.

5. *Brown A.* (1987). Metacognition, executive control, self control, and other mysterious mechanisms // F. Weinert and R. Kluwe (Eds.), Metacognition, Motivation, and Understanding. Hillsdale, NJ: Erlbaum. P. 65—116.

6. *Cox Raja*. Metareasoning: Manifesto, in BBN Technical Memo TM-2028, 2007

7. *Metcalfe J., Shimamura A.P.* (1994). Metacognition: knowing about knowing. Cambridge, MA: MIT Press.

8. *Michael L.* Anderson and Tim Oates and Waiyian Chong and Don Perlis. The metacognitive loop I: Enhancing reinforcement learning with metacognitive monitoring and control for improved perturbation tolerance. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence. 2006. 18. 3. 387—411.

9. *Elgot-Drapkin J.* Step Logic: Reasoning situated in time. PhD thesis. Department of computer science, University of Maryland, Colledge-Park, Maryland, 1988.

10. *Michael L. Anderson, Bryant Lee*. Empirical results for the use of meta-language in dialog management. Proceedings of the 26th Annual Conference of the Cognitive Science Society. 2004.

11. *Purang K., Purushothaman D., Traum D. et al.* Practical Reasoning and Plan Executing with Active Logic. 1999. Proceedings of the IJCAI'99 Workshop on Practical Reasoning and Rationality.

12. *Фоминых И.Б., Виньков М.М., Пожидаев А.К.* Активная логика и логическое программирование // Программные продукты и системы. 2015. №3. С. 42—48.

13. *Виньков М.М., Фоминых И.Б.* Аргументационная семантика для шаговых теорий активной логики с грануляцией времени // Искусственный интеллект и принятие решений. М. : УРСС, 2015. №3. С. 95—101.

14. *Fominykh I., Vinkov M.* Paraconsistency of Argumentation Semantics for Stepping Theories of Active Logic // Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'16): Springer, 2016. Vol. 1. P. 171—180.

15. *Fominykh I.B., Vinkov M.M.* Stepping Theories of Active Logic with Two Kinds of Negation // Advances in electrical and electronic engineering. 2017. Vol. 15, No. 1. S. 84—92.

16. *Тарасов В.Б.* Грануляция информации, нестандартные и гибридные нечеткие множества // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сборник трудов VI Международной научно-практической конференции (Коломна, 16—19 мая 2011 г.). М. : Физматлит, 2011. Т. 1. С. 35—49.

17. *Виньков М.М.* Время как внешняя сущность при моделировании рассуждений ционального агента с ограниченными ресурсами // Труды XI национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008. М. : Физматлит, 2008.

Секция 1

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ГИБРИДНЫХ И ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Руководители секции — проф. А. В. Колесников
проф. А. П. Еремеев

С. С. Анцыферов[1], К. Н. Фазилова[2]
МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия
e-mail: [1]c_standard@fel.mirea.ru, [2]fazilova@mirea.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ НЕРАВНОВЕСНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОГНИТИВНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Введение

Когнитивные интеллектуальные системы (КИС) как самоорганизующиеся системы обладают особым свойством неравновесной устойчивости, предполагающим способность функционирования системы в устойчивом и неустойчивом режимах. Вопросам исследования свойств неравновесной устойчивости посвящен ряд работ [1—12].

Режим неравновесной устойчивости характеризуется способностью возврата системы в исходный или близкий к исходному режим в условиях внутренних и внешних возмущающих воздействий, т. е. не выходить за некоторые границы области неравновесного функционирования.

В случае выхода из этой области система перестает адекватно реагировать на изменение информационного потока, при этом связи между элементами ослабляются, и система распадается на независимые элементы.

Область устойчивого функционирования зависит от таких факторов, как количество (N) структурных элементов (СЭ) в составе системы, меры эффективности каждого отдельного структурного элемента и их попарных взаимодействий, от соотношения приращений интенсивности входящего информационного потока и приращения интенсивности обработки информационного потока в рамках принятой модели.

Учитывая способность когнитивных интеллектуальных систем к самоорганизации, важно определить метод оценки меры эффективности структурных элементов в реальном масштабе времени с последующим численным моделированием с целью установления точности полученных оценок, а также границ области неравновесной устойчивости.

1. Модель неравновесной устойчивости

Адекватной моделью неравновесной устойчивости КИС может служить, согласно [5; 6], следующее нелинейное уравнение, характеризующее как устойчивое, так и неустойчивое функционирование системы (рис. 1):

© Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., 2020

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} = KH, \tag{1}$$

где $H = H_1 + H_2 = \left[-\sum_i P_i \log P_i\right] + \left[-\sum_i \sum_j P_{ij} \log P_{ij}\right]$ — энтропия системы; (2)

P_i — вероятность меры информативности i-го элемента;

P_{ij} — вероятность попарного взаимодействия;

$$K = \Delta I - \Delta JH, \tag{3}$$

где ΔI — приращение интенсивности информационного потока на входе системы;

ΔJ — приращение интенсивности обработки информационного потока в системе;

ΔJH — параметр, характеризующий управление процессом формирования структуры, показатель функциональной организованности системы;

$$\dot{H} = \Delta IH - \Delta JH^2 = -\Delta J(H^2 - \frac{\Delta I}{\Delta J}H) =$$

$$= -\Delta J\left[H^2 - \frac{\Delta I}{\Delta J}H + (\frac{1}{2}\frac{\Delta I}{\Delta J})^2 - \frac{\Delta I^2}{4\Delta J^2}\right] = -\Delta J\left[(H - \frac{\Delta I}{2\Delta J})^2 - \frac{\Delta I^2}{4\Delta J^2}\right]. \tag{4}$$

Корни данного уравнения: $H_0 = 0$, $H_1 = \frac{\Delta I}{\Delta J}$.

H_0 и H_1 — точки устойчивости.

H_2 — точка неустойчивости, соответствующая значению энтропии, при котором происходит распад системы на несвязные СЭ.

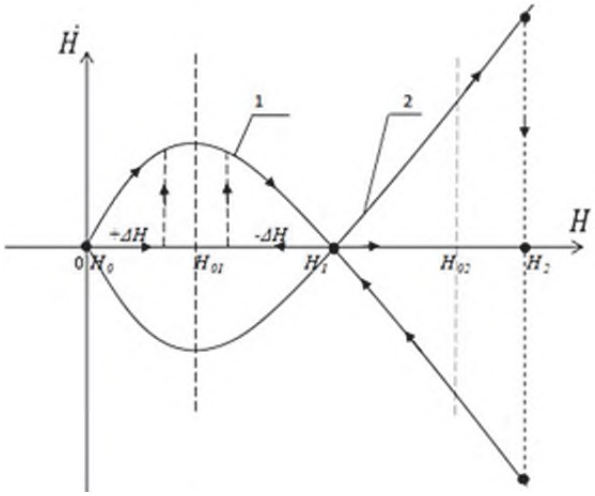


Рис. 1. Фазовый портрет функционирования:
1 — $\Delta I, \Delta J > 0$; *2* — $\Delta I, \Delta J < 0$

2. Метод оценки меры эффективности структурных элементов в реальном масштабе времени

Для оценки меры эффективности структурных элементов предлагается применять метод попарных предпочтений. Для установления алгоритма, реализующего данный метод (рис. 2), необходимо установить количество структурных элементов, показатели их эффективности и тип оценочной шкалы (для более точной оценки используется многоуровневая шкала).

Исходя из установленного формируется матрица попарных предпочтений (*sr*) по каждому показателю эффективности и рассчитывается вероятностный показатель предпочтений (*q*), кроме того, определяется коэффициент весомости для каждого показателя эффективности (α). Затем вычисляется значение эффективности P_s

$$P_s = 1 - \sum_{js} q_{js} a_j \text{ , где} \tag{5}$$

$$q_{js} = \frac{(\Pi_{r=1}^{M} \delta_{sr})^{1/M}}{\sum_{s=1}^{M} (\Pi_{r=1}^{M} \delta_{sr})^{1/M}}, \; 0 \le q_{js} \le 1 \tag{6}$$

$$a_j = \frac{(\Pi_{s=1}^{n} \delta_{js})^{1/n}}{\sum_{j=1}^{n} (\Pi_{s=1}^{n} \delta_{js})^{1/n}}. \tag{7}$$

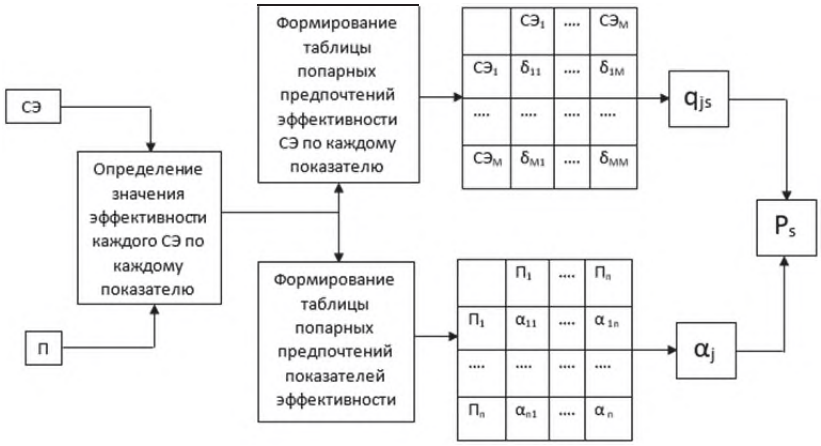


Рис. 2. Алгоритм оценки мер эффективности СЭ КИС

3. Численное моделирование

Для реализации численного моделирования используется *N* структурных элементов и *n* показателей их эффективности. Показан пример для случая, когда $N = 10$, $n = 3$ (Π_1 — быстродействие; Π_2 — время вхождения в замкнутый цикл; Π_3 — достоверность оценки результатов (принимаемых решений)).

Таблица 1

Попарные предпочтения СЭ для $П_1$

Для $П_1$	$СЭ_1$	$СЭ_2$	$СЭ_3$	$СЭ_4$	$СЭ_5$	$СЭ_6$	$СЭ_7$	$СЭ_8$	$СЭ_9$	$СЭ_{10}$
	0,82	0,74	0,93	0,9	0,85	0,79	0,71	0,87	0,83	0,78

	$СЭ_1$	$СЭ_2$	$СЭ_3$	$СЭ_4$	$СЭ_5$	$СЭ_6$	$СЭ_7$	$СЭ_8$	$СЭ_9$	$СЭ_{10}$	q_{js}
$СЭ_1$	1	1/4	5	4	2	1/2	1/5	3	2	1/3	0,072571
$СЭ_2$	4	1	9	7	5	3	1/2	6	5	3	0,225804
$СЭ_3$	1/5	1/9	1	1/2	1/4	1/7	1/9	1/3	1/5	1/7	0,015595
$СЭ_4$	1/4	1/7	2	1	1/3	1/6	1/8	1/2	1/4	1/6	0,021483
$СЭ_5$	1/2	1/5	4	3	1	1/4	1/6	2	1/2	1/4	0,043687
$СЭ_6$	2	1/3	7	5	3	1	1/4	4	3	1/2	0,10784
$СЭ_7$	5	2	9	8	6	4	1	7	5	3	0,286111
$СЭ_8$	1/3	1/6	3	2	1/2	1/4	1/7	1	1/3	1/5	0,03094
$СЭ_9$	1/2	1/5	5	4	2	1/3	1/5	3	1	1/3	0,059328
$СЭ_{10}$	2	1/3	7	6	4	2	1/3	5	3	1	0,136642

Таблица 2

Попарные предпочтения СЭ для показателя $П_2$

Для $П_2$	$СЭ_1$	$СЭ_2$	$СЭ_3$	$СЭ_4$	$СЭ_5$	$СЭ_6$	$СЭ_7$	$СЭ_8$	$СЭ_9$	$СЭ_{10}$
	0,88	0,79	0,71	0,8	0,74	0,92	0,85	0,9	0,76	0,84

	$СЭ_1$	$СЭ_2$	$СЭ_3$	$СЭ_4$	$СЭ_5$	$СЭ_6$	$СЭ_7$	$СЭ_8$	$СЭ_9$	$СЭ_{10}$	q_{is}
$СЭ_1$	1	1/5	1/8	1/4	1/7	3	1/2	2	1/6	1/3	0,027223
$СЭ_2$	5	1	1/4	2	1/3	6	3	5	1/2	3	0,105387
$СЭ_3$	8	4	1	5	2	9	7	9	3	6	0,294491
$СЭ_4$	4	1/2	1/5	1	1/3	6	3	5	1/3	3	0,084254
$СЭ_5$	7	3	1/2	3	1	8	5	7	2	5	0,20522
$СЭ_6$	1/3	1/6	1/9	1/6	1/8	1	1/4	1/2	1/7	1/4	0,015616
$СЭ_7$	2	1/3	1/7	1/3	1/5	4	1	3	1/5	1/2	0,040352
$СЭ_8$	1/2	1/5	1/9	1/5	1/7	2	1/3	1	1/7	1/3	0,020797
$СЭ_9$	6	2	1/3	3	1/2	7	5	7	1	4	0,156534
$СЭ_{10}$	3	1/3	1/6	1/3	1/5	4	2	3	1/4	1	0,050126

Таблица 3

Попарные предпочтения СЭ для показателя $П_3$

Для $П_3$	$СЭ_1$	$СЭ_2$	$СЭ_3$	$СЭ_4$	$СЭ_5$	$СЭ_6$	$СЭ_7$	$СЭ_8$	$СЭ_9$	$СЭ_{10}$
	0,75	0,76	0,87	0,73	0,91	0,84	0,78	0,72	0,81	0,8

	$СЭ_1$	$СЭ_2$	$СЭ_3$	$СЭ_4$	$СЭ_5$	$СЭ_6$	$СЭ_7$	$СЭ_8$	$СЭ_9$	$СЭ_{10}$	q_{js}
$СЭ_1$	1	2	6	1/2	7	5	2	1/2	3	3	0,152659
$СЭ_2$	1/2	1	5	1/2	7	4	2	1/2	3	3	0,127617
$СЭ_3$	1/6	1/5	1	1/7	3	1/2	1/5	1/7	1/3	1/4	0,023941
$СЭ_4$	2	2	7	1	8	5	3	1/2	4	4	0,199076
$СЭ_5$	1/7	1/7	1/3	1/8	1	1/4	1/6	1/9	1/5	1/5	0,01499
$СЭ_6$	1/5	1/4	2	1/5	4	1	1/3	1/6	1/2	1/3	0,034917
$СЭ_7$	1/2	1/2	5	1/3	6	3	1	1/4	2	2	0,087818
$СЭ_8$	2	2	7	2	9	6	3	1	5	4	0,240962
$СЭ_9$	1/3	1/3	3	1/4	5	2	1/2	1/5	1	1/2	0,052246
$СЭ_{10}$	1/3	1/3	4	1/4	5	3	1/2	1/4	2	1	0,065774

Таблица 4

Попарные предпочтения показателей эффективности

$П_1$	$П_2$	$П_3$
0,85	0,83	0,89

	$П_1$	$П_2$	$П_3$	α_j
$П_1$	1	1/2	3	0,332515928
$П_2$	2	1	3	0,527836133
$П_3$	1/3	1/3	1	0,139647939

Получив значения q_{js} и a_j, рассчитывается значение эффективности P_s по формуле (5).

Таблица 5

Оценка эффективности СЭ

	Расчетные Значения $P_э$	Установленные Значения $P_э$	Δ_i	$\overline{\Delta}$
P_1	0,94	0,82	0,12	0,088
P_2	0,85	0,76	0,09	
P_3	0,84	0,84	0	
P_4	0,92	0,81	0,11	
P_5	0,88	0,83	0,05	
P_6	0,95	0,85	0,1	
P_7	0,87	0,78	0,09	
P_8	0,95	0,83	0,12	
P_9	0,89	0,8	0,09	
P_{10}	0,92	0,81	0,11	

В результате численного моделирования установлено, что точность оценки зависит от числа СЭ (N) и от числа показателей эффективности (n) (рис. 3).

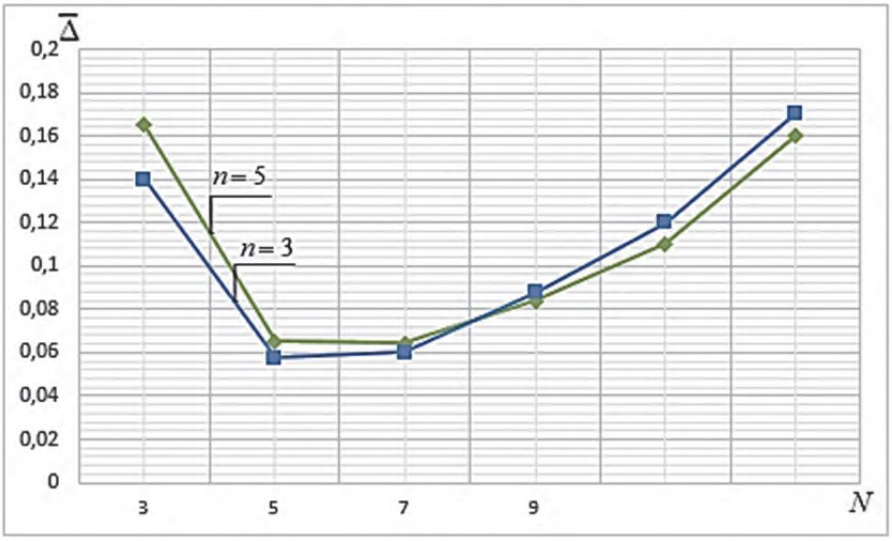


Рис. 3. Точность оценки меры эффективности СЭ

Наиболее приемлемая по точности оценка достигается в пределах значений N от 5 до 10.

4. Определение границ области неравновесной устойчивости КИС

Показателями неравновесной устойчивости когнитивных систем могут служить P, H, $\dot{H}$, $H*$ L,

где $L = 1 - \dfrac{H}{H*}$ — показатель избыточности системы;

$H*$ — максимальное значение энтропии для выбранного числа структурных элементов.

Данные показатели позволяют определить границы области устойчивого функционирования (рис. 4) путем графического построения.

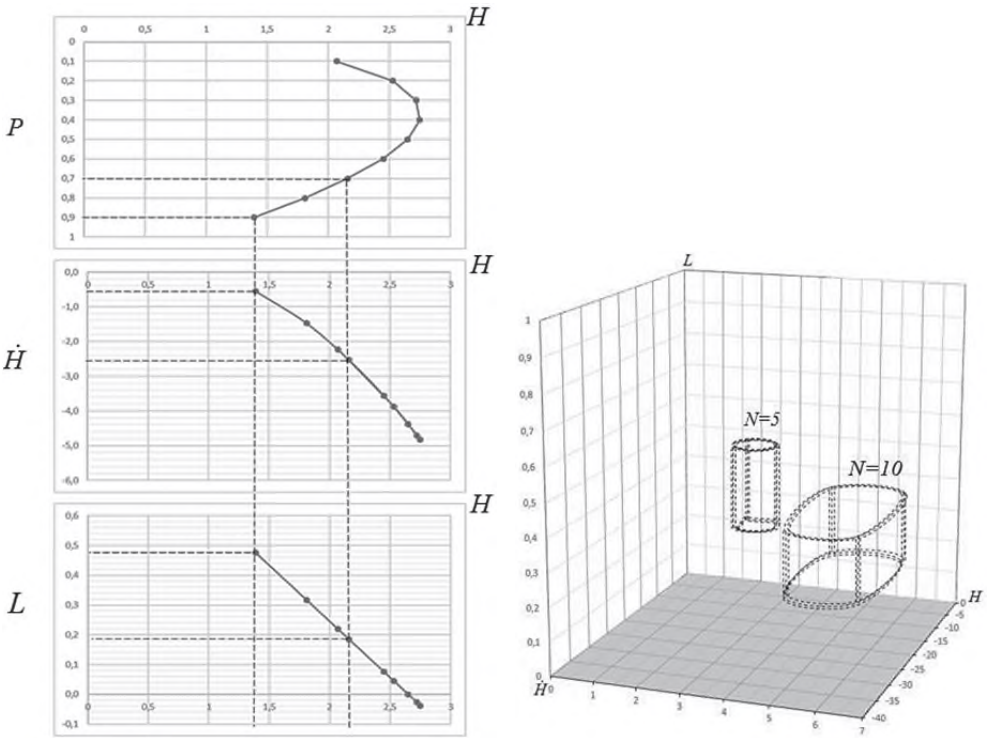


Рис. 4. Определение границ области неравновесной устойчивости

Заключение

Согласно предложенной модели основными показателями неравновесной устойчивости являются P, H, $\dot{H}$, $H*$, L. Предложенный метод оценки меры эффективности структурных элементов в реальном масштабе времени по результатам численного моделирования обеспечивает достаточно приемлемую точность оценок.

Определение границ неравновесной устойчивости в реальном масштабе времени позволяет осуществлять контроль состояния системы и необходимость последующих трансформаций.

Список литературы

1. *Анцыферов С. С.* Общие принципы построения и закономерности функционирования интеллектуальных систем // Искусственный интеллект. 2011. № 3. С. 6—15.

2. *Анцыферов С. С.* Вопросы метрологического обеспечения интеллектуальных систем // Мир измерений. 2012. № 5. С. 46—51.

3. *Анцыферов С. С.* Стандартизация показателей качества продукции когнитивных технологий // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15. № 7. С. 7—13.

4. *Метрологическое* обеспечение наукоемких технологий / С. С. Анцыферов, М. С. Афанасьев, А. С. Сигов. М. : Изд. ИКАР, 2016.

5. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Показатели неравновесной устойчивости когнитивных систем // Проблемы искусственного интеллекта. 2016. № 2 (3). С. 4—11.

6. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Стандартизация показателей неравновесной устойчивости когнитивных систем // Наукоемкие технологии. 2017. № 5. С. 15—20.

7. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Определение показателей устойчивого функционирования нейроподобных систем // Материалы XXV Всероссийского семинара «Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных», 29 сентября — 1 октября 2017 г., Красноярск : Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2017. С. 8—13.

8. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Имитационная динамическая модель когнитивных систем // Проблемы искусственного интеллекта. 2017. № 2 (5). С. 32—39.

9. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Принципы построения и функционирования интеллектуальных систем обработки информации пространственно-временных полей // Наукоемкие технологии. 2018. № 2. С. 36—45.

10. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н.* Оценка показателей устойчивого функционирования интеллектуальных систем с активными элементами // Информатика и технологии // Инновационные технологии в промышленности и информатике (РНТК ФТИ-2018) : сборник трудов конференции. 2018. С. 286—291.

11. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Моделирование неравновесной устойчивости когнитивных систем // Моделирование неравновесных систем: Материалы XXI Всероссийского семинара, 5—7 октября 2018 г., Красноярск: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. С. 9—14.

12. *Анцыферов С. С., Фазилова К. Н., Русанов К. Е.* Оценка неравновесной устойчивости когнитивных систем // Наукоемкие технологии. 2018. № 11. С. 14—19.

Д.В. Березкин[1], И.Е. Сергеев[2], В.Ю. Сидоров[3]
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Россия
e-mail: [1]berezkind@bmstu.ru, [2]ilay19940@gmail.com, [3]sidorow.valentin@gmail.com

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Введение

Успешное определение геолокации фотографии может использоваться во многих проектах, среди которых в первую очередь необходимо выделить развитие Интернета вещей (IoT). Выполненные авторами предварительные исследования [1; 2] показали, что данная задача весьма сложная. В качестве подхода к ее решению авторами было предложено использовать методы проектирования гибридных интеллектуальных систем (ГИС), позволяющие наиболее полно реализовать преимущества традиционных средств и методов искусственного интеллекта, и в то же время преодолевать присущие им недостатки и решать задачи, которые до сих пор неудовлетворительно решались отдельными методами искусственного интеллекта [3]. В работах [1; 2] авторы предложили обобщенную структуру гибридной интеллектуальной системы определения местоположения объектов по их фотографиям. Для оценки местоположения предлагается анализировать как данные о GPS координатах исходной фотографии и схожих с ней, так и классификацию объектов на фотографии: город, природа. Геолокация рассматривается как проблема классификации, когда земная поверхность делится на непересекающиеся смежные ячейки. В данной работе будут рассмотрены детали реализации некоторых элементов этой ГИС и проанализированы результаты проведенных экспериментов.

1. Актуальность исследования

Во многих ситуациях требуется определение местонахождения объектов по их фотографиям. Если фотография сделана современным цифровым фотоаппаратом со встроенным GPS-датчиком, фиксирующим координаты объекта, то проблема решается достаточно просто. Координаты объекта размещаются в скрытых метаданных фотографии, которые явно невидны, но могут быть получены с помощью специализированных программных средств.

Однако наличие метаданных о местоположения объекта на фотографии (геолокации) зависит от нескольких факторов. Во-первых, от устройства, которым была сделана фотография. В некоторых камерах или мобильных устройствах может не быть GPS-датчика, фиксирующего координаты съемки. Во-вторых, от желания пользователей мобильных устройств: они могут отключить геолокацию из соображений приватности или уменьшения нагрузки

© Березкин Д.В., Сергеев И.Е., Сидоров В.Ю., 2020

на аккумулятор. В-третьих, наличие таких данных зависит от ресурса, на котором фотография была опубликована. Социальные сети Facebook, Twitter или Instagram удаляют метаданные фотографий во время их загрузки на серверы этих ресурсов. Проверить наличие метаданных довольно просто. Для этого можно загрузить файл фотографии и проверить его свойства. Для более быстрого и эффективного анализа метаданных фотографии, которые содержатся в EXIF-файле данных, можно использовать специальные онлайн-ресурсы.

Следует отметить, что во многих случаях метаданные о фотографии отсутствуют или искажены. В то же время определение местонахождении объекта по его фотографии необходимо для решения ряда задач и в первую очередь при анализе больших данных, поступающих от различных датчиков. При этом должно быть выполнено автоматическое определение местоположения объекта на фотографии только исходя из наличия самой фотографии и анализа ее содержания. Проведенный предварительный анализ [1; 2] показал, что задача установления местонахождения объектов по их фотографиям является актуальной в условиях бурного развития технологий IoT.

2. Обзор существующих подходов к геолокации

В настоящее время интеллектуальные системы, как правило, не разрабатываются отдельно, а встраиваются в виде модулей в традиционные информационные системы для решения задач, связанных с интеллектуальной обработкой данных и знаний.

Корпорацией Google было заявлено, что ее поисковик в скором времени сможет определять место, в котором была сделана та или иная фотография. Для этого сотрудники компании создали нейронную сеть, получившую название PlaNet [4], в базу данных которой было загружено более 90 миллионов снимков с указанием мест, в которых они были сняты. Во время совершения поиска места PlaNet будет сравнивать снимок с изображениями из базы данных на пиксельном уровне. В случае совпадения она выдаст предположение о том, где была сделана фотография. Основные принципы распознавания изложены в статье [4]. Следует отметить, что пока система далека от идеала. Во время первых тестирований программа смогла правильно определить страну лишь в 28,4 % случаев, а континент — в 48 %.

В работе [5] представлен проект Im2GPS, в котором оценка геопозиции происходит исходя из сравнения исходной фотографии с 6 миллионами подготовленных снимков из Flickr, для которых заданы координаты GPS. Сравнительные результаты оценки геопозиции проектов PlaNet и Im2GPS описаны в [4; 6].

3. Структура и алгоритм работы системы

Анализ известных подходов к определению местоположения объектов по фотографиям и их реализаций показал отсутствие приемлемых с точки зре-

ния качества распознавания готовых решений. В связи с этим для решения практических задач необходимо разработать собственную систему геолокации, для которой предлагается следующий алгоритм работы.

1. По фотографии из тестового набора (у которой отсутствуют или искажены метаданнные) попробовать найти похожую фотографию, затем ее описание (или проанализировать окружающий контекст) и метаданные, если они есть. Затем извлечь информацию геолокации путем интеллектуального анализа собранной текстовой информации.

2. Проанализировать фотографию из тестового набора с помощью обученной нейросети (или нескольких специализированных нейросетей, предварительно обученных способами, описанными ниже). При этом могут применяться методы компьютерного зрения (фильтрация помех, удаление фона и т. п.) В результате анализа формируется вектор признаков (тегов) и оценка соответствия тега изображению. Из тегов формируется поисковый запрос и выполняется поиск изображений в имеющейся базе данных изображений или в Интернете. Определяется наиболее похожее из них, а также его название и контекст, которой затем анализируется способом, приведенном в пункте 1.

3. Результат анализа изображения может проверяться и уточняться с использованием онтологических справочников. В результате проверки может быть улучшено качество геолокации, исправлены некоторые ошибки и обоснован полученный результат.

На рисунке показана обобщенная структура многоагентной ГИС определения местоположения объектов по их фотографиям, реализующая предлагаемый алгоритм работы.

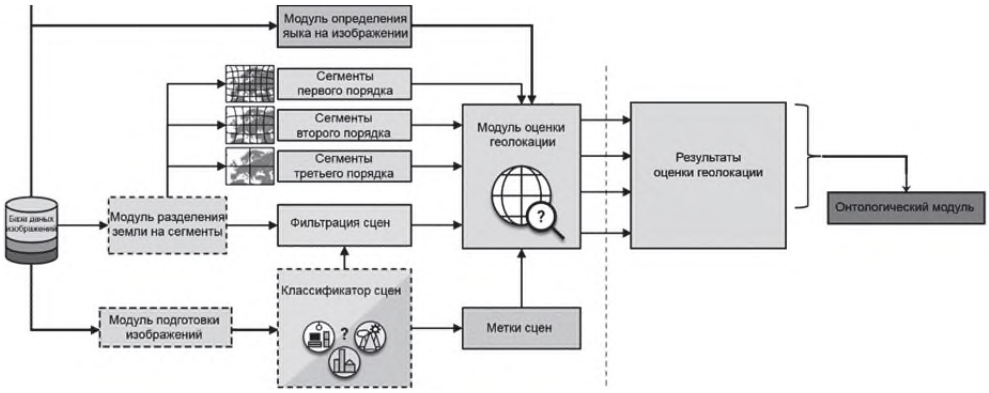


Рис. Обобщенная структура многоагентной ГИС
определения местоположения объектов по их фотографиям

Рассмотрим особенности реализации некоторых функций системы и модулей, представленных на рисунке.

4. Предварительная обработка изображений

Важная функция системы — предварительная обработка изображений. Она реализована модулем подготовки изображений с использованием нейронной сети. Данные для обучения нейросети берутся с открытых источников, например из социальной сети Flickr, поэтому изображения могут содержать фильтры или обработку, добавленную пользователем, которая будет создавать ошибки и мешать в обучении. Модуль предобработки изображения определяет параметры изображения и устраняет дефекты на нем.

Проведенный анализ показал, что исходные фотографии, используемые для обучения, могут содержать следующие дефекты:

- расфокусировка изображения;
- блики, занимающие более 20 % фотографии;
- слишком темные и слишком светлые изображения;
- посторонние объекты (пыль, капли, насекомые и т. п.);
- наличие различных фильтров, которые меняют цветокоррекцию изображения.

Операции предварительной обработки изображений выполняются с помощью открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV. После сортировки фотографий и избавления от дефектов при съемке производятся такие дополнительные операции по улучшению изображений, как: изменение контраста, размытие по Гауссу, преобразование изображения в градацию серого, а также создание копий изображения в разных масштабах, с разной детализацией и с искаженными углами наклона плоскости изображения.

При реализации данной функции учитывались следующие факторы, влияющие на последующую обработку изображений при помощи нейронных сетей.

1. Обеспечение одинакового размера соотношения сторон обрабатываемых изображений. Большинство моделей нейронных сетей принимают квадратное входное изображение, означающее, что каждое изображение нужно проверять, квадратное оно или нет и обрезано ли соответствующим образом. Во время такой обрезки важно соблюдать необходимое качество центральной части изображения.

2. Анализ среднего стандартного отклонения входных данных, под которым понимается степень отклонения данных наблюдений или множеств от среднего значения, полученного путем принятия средних значений для каждого пикселя во всех примерах обучения. Эта величина дает представление о некоторой базовой структуре изображений, которое используется на следующем этапе их обработки.

3. Нормализация исходных изображений, поступающих на вход системы. Это гарантирует, что каждый входной параметр (пиксель) имеет аналогичное распределение данных и ускоряет конвергенцию при обучении сети. Нормализация данных производится путем вычитания среднего значения из каждого пикселя, а затем деления результата на стандартное отклонение.

5. Распознавание текста на изображении

Распознавание языка, на котором написан текст на изображении, очень важная часть системы выявления местоположения по фотографии. Это позволяет сократить поиск до группы стран, если распознанный язык является государственным для нескольких стран, или установить конкретную страну, если язык является уникальным.

Поиск и определение принадлежности языка в изображении происходит в несколько этапов. Первый этап заключается в поиске текста на изображении. Для реализации данной функции могут применяться методы компьютерного зрения.

После того как изображение будет обработано данным детектором, на изображении будут выделены все области, содержащие текстовую информацию, и станут известны координаты расположения данных областей. Второй этап заключается в извлечении текста с изображения. Для этого используется открытое программное обеспечение Tesseract [7].

Проведенные предварительные исследования подтвердили, что такой механизм показывает высокую точность на предобработанных данных, но он будет работать недостаточно хорошо, если на изображении присутствует значительный шум или оно недостаточно обработано и очищено. Также, кроме непосредственного поиска и извлечения изображения, необходимо в автоматическом режиме определить, на каком языке написан текст. Для этого в модуле определения языка на изображении используются открытая библиотека Langdetect, написанная для языка Python или Java. Данная библиотека генерирует языковые профили на основании xml аннотаций из Википедии, определяет язык текста, используя байесовскую фильтрацию. Ее точность составляет 99 % для 53 языков.

6. Сегментирование земной поверхности

Так как разрабатываемая система должна анализировать огромные объемы фотографий, каждая из которых может быть расположена в любой точке планеты, целесообразно разделить земную поверхность на непересекающиеся сегменты и анализировать принадлежность фотографий тому или иному сегменту. Это позволяет уменьшить временные затраты работы системы. Программные решения для сегментирования земной поверхности известны, например, GeoHash и Google S2. Каждое из этих решений подразумевает иерархическое разбиение земного шара на ячейки, т. е. присутствует такое понятие, как «уровень» ячейки. На одном уровне ячейки имеют одинаковый размер.

GeoHash имеет ряд серьезных недостатков, например наличие всего 12 «уровней» сегментирования земной поверхности, разброс расстояния между которыми достигает больших значений (Google S2 имеет 30). По этой причине некоторые области могут быть недостаточно подробно рассмотрены.

Также нельзя не отметить тот факт, что для кодирования местоположения, используя решение GeoHash, потребуется от 1 до 12 байт памяти, в зависимости от уровня сегментирования, тогда как для S2Geometry — 1 байт [8].

Google S2 имеет неоспоримое преимущество в виде адаптивного иерархического разделения земной поверхности на ячейки. Более подробное описание и тестирование вышеуказанных проектов описывается в [8].

Геометрическая библиотека S2 используется для генерации набора неперекрывающихся географических ячеек. Чаще всего поверхность Земли проецируют на плоскость (как в случае GeoHash), что приводит к немалым погрешностям, поскольку земной шар имеет сферическую форму. S2 решает эту проблему применением исключительно сферической проекции и сферической геометрии. Географические ячейки представляют собой иерархическое разложение сферы на компактные представления областей или точек. Области также могут быть аппроксимированы с помощью этих же ячеек

Библиотека S2 находится в открытом доступе, активно поддерживается Google и используется в проектах.

В разрабатываемой системе было решено применять динамическое разделение земной поверхности на сегменты, используя три «уровня» сегментирования библиотеки S2, причем «уровень» конкретного сегмента зависит от плотности и количества фотографий, расположенных внутри него. Проведенные предварительные эксперименты показали, что применение такого подхода позитивно скажется на производительности всей системы.

В проектируемой ГИС возможно выполнить геопривязку только тех фотографий, которые сделаны на суше. Поэтому учитывать сегменты, не относящиеся к материковой поверхности, нет необходимости. Библиотека S2 позволяет ограничить материковую территорию, используя полигоны.

С помощью формата обмена пространственными данными GeoJSON можно быстро и удобно преобразовать набор координат каждой страны в полигоны, чтобы затем применять их для работы S2Geometry.

Пакет геоданных, предоставляющий полигоны GeoJSON для всех стран мира, предоставляется сервисом NaturalEarth.

7. Классификация элементов изображений и оценка геолокации

При решении задачи определения местоположения объектов по фотографии необходимо правильно их распознать и классифицировать. Кроме этого следует отличать ключевые и фоновые объекты на изображении для увеличения точности распознавания.

На данном этапе работы система выполняет поиск объектов на фотографиях и их тегирование. Это осуществляется при помощи нейросетевых технологий. Анализ известных подходов к решению этой задачи [4; 9] показал, что невозможно обучить сеть, чтобы она могла успешно распознавать все признаки на изображении. В связи с этим было решено использовать гибридную нейросеть.

Так, универсальная нейросеть проводит общий анализ изображения на предмет наличия на нем объектов, относящихся к различным классам, например дома, улицы — город, лес, река — природа. Это позволит выполнить сортировку изображений для последующего анализа другими нейросетями.

Текстово-аналитическая нейросеть осуществляет поиск текстовых данных на изображениях, их извлечение и анализ. Анализ текста заключается в попытке определить язык текста и на основе этого сделать предположение по принадлежности изображения к конкретному региону.

Также нейросеть может извлекать текст, что позволяет формировать запросы в поисковые системы. Например, если на фотографии удалось выделить название магазина, то его адрес в ряде случаев можно будет установить в результате поиска информации в Интернете.

Описываемая система должна применять методы машинного обучения и, в частности, глубокого обучения входящих в ее состав нейросетей. Для решения задачи классификации объекта на изображении предлагается использовать многослойные сверточные нейронные сети [4; 6; 9], при этом обучение и настройка параметров нейронной сети должна выполняться с учетом специфики массивов обрабатываемых фотографий.

8. Уточнение геолокации с использованием онтологий

Для формирования итоговых результатов анализа предлагается применять онтологический подход, что позволяет уточнить результаты геолокации и обосновать принятые ГИС выводы.

Для решения задачи построения онтологических справочников предусмотрен этап создания предварительных описаний и их автоматическое преобразование к виду формальных онтологий консорциума W3C, для редактирования которых используется редактор онтологий Protégé, как это было предложено в работе [10].

Хранение онтологий в виде RDF-триплетов возможно в различных СУБД с применением системы Jena, доступ к ним осуществляется на языке SPARQL. Вопросы повышения скорости выполнения SPARQL-запросов решаются путем их эффективного кэширования.

Заключение

В докладе предложена ГИС определения местоположения объектов по их фотографиям, с использованием данных, извлеченных из больших баз неструктурированной информации. Описаны особенности реализации ее основных элементов. Намечены пути повышения точности определения местоположения за счет проверки и уточнения получаемых нейросетью решений при помощи онтологий. Внедрение предложенной технологии позволит улуч-

шить анализ неструктурированной информации социальных сетей, решать новые задачи в области IoT и BigData. В качестве дополнительного способа уточнения предполагается применить метод анализа иерархий [11], позволяющий с помощью экспертной информации вычислить приоритет каждого альтернативного варианта геолокации, формируемого ГИС на основе набора критериев. Приоритетность критериев относительно цели решения задачи вычисляется на основе попарных сравнений, выполняемых экспертами на этапе обучения ГИС.

Список литературы

1. *Пролетарский А.В., Березкин Д.В., Терехов В.И., Секирин П.А., Сергеев И.Е., Сидоров В.Ю.* Подход к созданию гибридной интеллектуальной системы определения местоположения объектов по их фотографиям // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. № 1. С. 30—39.

2. *Proletarsky A., Berezkin D., Sidorov V., Sergeev I.* Application of the methods of hybrid artificial intelligence to determine the location of objects by their photography // Proceedings of the 16th International conference on Applied Computing 2019, Cagliari, Italy. 2019. Nov. 7—9. P. 245—250.

3. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.* Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М. : ИПИ РАН, 2014.

4. *Weyand T., Kostrikov I., Philbin J.* Planet-photo geolocation with convolutional neural networks. European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016. P. 37—55.

5. *Nam N. Vo, Nathan J., James H.* Revisiting IM2GPS in the Deep Learning Era // ICCV 2017. P. 2640—2649.

6. *Eric Müller-Budack* Kader Pustu-Iren Ralph Ewerth. Geolocation Estimation of Photos Using a Hierarchical Model and Scene Classification // Computer Vision — ECCV 2018. P. 575—592.

7. *Thakare S., Kamble A., Thengne V. et al.* Document Segmentation and Language Translation Using Tesseract-OCR // 13th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2018 — Proceedings. P. 148—151.

8. *Deiotte R., La Valley R.* Comparison of Spatiotemporal Mapping Techniques for Enormous Etl and Exploitation Patterns // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. IV-4/W2. P. 7—13.

9. *Fedorenko Y.S., Gapanyuk Y.E.* The Neural Network with Automatic Feature Selection for Solving Problems with Categorical Variables // International Conference on Neuroinformatics. Springer, Cham, 2, 2018. P. 129—135.

10. *Березкин Д.В.* Технология управления разнородными знаниями // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы 2-го Международного Поспеловского симпозиума / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.В. Колесникова. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2014. С. 45—53.

11. *Riza S.P., Murtuzayeva M.* Application Saaty pair comparisons method to the investments distribution in parameters of ecological sustainability // Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), 2012 IV International Conference. IEEE, 2012. P. 1—3.

С. А. Бутенков[1], В. В. Кривша[1], Н. С. Кривша[2]
[1]Вычислительный центр им. А. А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия
[2]Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия
e-mail: [1]averkin2003@inbox.ru, [2]Sergey.Yarushev@icloud.com

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГРАНУЛЯЦИИ

Введение

Областью применения гибридных интеллектуальных систем (ГИС) обычно считают методы принятия решений [1]. Согласно А. В. Колесникову, гибридная система — это записанная на математическом языке комбинация нескольких автономных методов, каждый из которых имеет преимущества в моделировании одного из этапов решения интеллектуальной задачи [2].

С этим определением консонируют идеи L. Zadeh [3] в области теории информационной грануляции (ТИГ) и методологии гранулярных вычислений (Granular Computing, GrC), разновидность которых — мягкие вычисления (Soft Computing, SC): «По существу мягкие вычисления являются объединением вычислительных методологий. … Существенным аспектом мягких вычислений является то, что составляющие методологии по большей части дополнительны скорее, чем противостоящи и исключительны. … Я верю, что в будущем большинство информационных/интеллектуальных систем будут гибридного типа» [4].

Структуру будущих ГИС предсказал в 1991 г. Д. А. Поспелов: «Поиск новых систем представления знаний должен принести к широкому распространению в интеллектуальных системах сращивания текстовой и зрительной информации, к появлению интегрированных систем, в которых одновременно сосуществует и обрабатывается информация различной модальности (символьная, текстовая, зрительная, акустическая, тактильная и т. п.)» (цит. по: [2]).

Д. А. Поспелов указал на ведущую роль в ГИС базовых задач обработки визуальной, акустической и других видов первичной информации (данных). Такие задачи по классификации L. Zadeh относятся к области вычислительного интеллекта (ВИ) или Computational Intelligence (CI) [3]. Требование единства математического подхода у L. Zadeh звучит достаточно слабо — «скорее дополнительны, чем противоположны».

В то же время А. В. Колесников явно указывает на необходимость введения соответствующего математического аппарата, синтезирующего разные уровни решения задач в ГС [2]. Такой аппарат предоставляет теория алгебраических систем (АС) А. И. Мальцева [5]. Построение новых типов АС [6] требует наличия адекватных решаемым задачам базовых элементов (носителя), на котором задаются операции и отношения [7].

© Бутенков С. А., Кривша В. В., Кривша Н. С., 2020

В ряде наших работ разработан новый гибридный математический аппарат обработки данных на основе грануляции [8—12]. Введение АС над подмножествами исходного пространства данных позволяет сохранить их содержательность при гранулировании. В ходе дальнейшей обработки можно оперировать непосредственно гранулами, не возвращаясь в исходное пространство [13]. В связи с этой особенностью он был назван методом пространственной грануляции.

Необходимого для практических приложений радикального повышения аппаратной и временной эффективности систем вычислительного интеллекта [14] можно добиться только путем их реализации на современных вычислительных системах высокой производительности [15]. Наиболее эффективны реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) на полях ПЛИС, избавленные от недостатков фон-неймановской схемы организации вычислений [16].

Нами предложены структурные решения, реализующие пространственную грануляцию в базисе высокопроизводительных РВС [17].

1. Цель работы и постановка задачи

Данная работа объединяет ранее опубликованные результаты по введенному нами новому математическому аппарату гибридной обработки многомерных данных на основе гранулирующего подхода. Основным множеством в нем служат пространственные гранулы, модель которых основана на применении определителей специального вида, которые представляют декартовы подмножества исходного пространства данных. Для гранул вводятся внутренние операции, связанные со свойствами определителей [14], и нечеткие отношения, основанные на топологии гранул [12].

Цель — разработка методологии реализации введенных алгоритмов для задач вычислительного интеллекта в виде типовых труктур машин гранулированных вычислений на базе ПЛИС.

2. Идеология грануляции в представлении сложных типов данных

Методология ТИГ, по L. Zadeh, основывается на применении информационной неразличимости некоторых подмножеств исходного пространства данных [3]. В частности, для изображений, представляющих класс многоосновных многомерных данных, характерно наличие колоссальной избыточности пикселов, при одновременной сильной топологической связности отдельных областей изображения [13].

На рисунке 1 показан пример грануляции изображения с использованием нечетких отношений [18] с целью выделения объекта интереса для его дальнейшего анализа.

Рис. 1. Иерархическая информационная грануляция изображения в задачах интеллектуальной обработки по L. Zadeh [3]

Формализация процесса информационной грануляции по работам L. Zadeh [3] завершается введением декартовых гранул для лингвистических переменных [18]. На основе новой алгебры декартовых гранул построена и также и введенная нами теория пространственной грануляции [6]. Однако наши гранулы имеют выраженный геометрический смысл [9] и инвариантны к аффинным (и некоторым типам нелинейных) преобразованиям координат, как и построенные на них нечеткие топологические отношения [12]. Рассмотрим математические основы новой теории.

3. Аппарат грануляции многомерных данных пространственными гранулами

Введем обозначения, позволяющие различать координаты векторов и их индексацию по номерам геометрических объектов. Тогда контравариантный вектор номера j в $\mathbb{R}^n$ будет обозначаться как ${}^{j}\mathbf{x} = \left({}^{j}x^1, {}^{j}x^2, {}^{j}x^3, ..., {}^{j}x^n \right)^T$. Поскольку мы имеем дело с подмножествами (кластерами) в $\mathbb{R}^n$, то для A — кластера точек данных ${}^{i}X\left({}^{i}x^1, {}^{i}x^2, {}^{i}x^3, ..., {}^{i}x^n \right), i = 1, 2, ..., \mathrm{M}$ в $\mathbb{R}^n$ можно получить модель покрывающей (инкапсулирующей по L. Zadeh [3]) декартовой гранулы ${}^{+}G_n\left(A\right)$ согласно [6]. Поскольку в графических данных (изображениях) основную роль играют алгебраические модели геометрических объектов, общая алгебраическая модель декартовой гранулы, покрывающей кластер A, может быть обобщена для произвольного аффинного пространства $\mathbb{R}^n$ в виде определителя специального вида порядка $(n+1)$ по [13]:

$$ {}^{+}G_n(A) = \begin{vmatrix} \min\left({}^{i}x^1\right) & \ldots & \min\left({}^{i}x^n\right) & \sigma(-1)^n \\ \max\left({}^{i}x^1\right) & \ldots & \min\left({}^{i}x^n\right) & \sigma(-1)^n \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \max\left({}^{i}x^1\right) & \ldots & \max\left({}^{i}x^n\right) & \sigma(-1)^n \end{vmatrix}, \quad i = 1,2,\ldots,m. \qquad (1) $$

Общая модель гранулы (1) описывает элементы, представленные декартовым произведением подмножеств координатных осей аффинной системы координат, или информационной гранулой в определении L. Zadeh [3]. Нормирующий множитель $\sigma > 0$ позволяет сохранить инвариантность значения (1) при произвольных аффинных преобразованиях [14]. Далее мы станем рассматривать модели и отношения в декартовой прямоугольной системе координат (ДПСК), потому что полученные результаты будут справедливы в любой аффинной системе координат [13].

Модель инкапсулирующей гранулы вида (1) не является тензором [7], так как содержит всего два индекса для любой размерности вмещающего пространства $\mathbb{R}^n$. Тем не менее она полностью отображает основные геометрические свойства декартовых гранул в $\mathbb{R}^n$ на их модели в $\mathbb{R}^2$, подобно проектированию пространственных объектов п на картинную плоскость $\mathbb{R}^2$. Модели (1) позволяют наглядно представить гранулы в $\mathbb{R}^n$ в виде объектов в $\mathbb{R}^2$, подобно изображениям [6], в чем и заключается их прикладное значение.

Отметим, что все известные меры на гранулах основываются на введении метрик в пространстве гранул [5]. Полезно иметь некоторую меру (возможно, не транзитивную), которая была бы инвариантна при преобразованиях в аффинных координатах, а также по возможности в некоторых типах криволинейных координат [7]. Модель (1) инкапсулирующей гранулы позволяет ввести инвариантную меру сходства на основе отношения определителей [13].

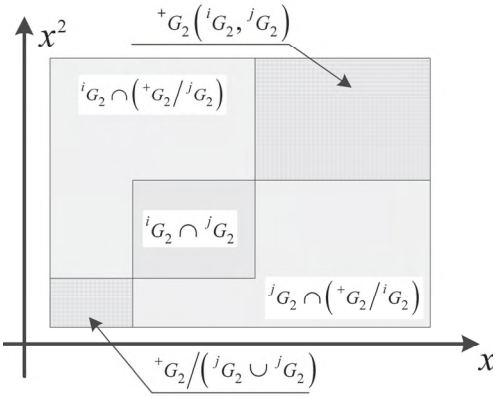


Рис. 2. Таксономия отношений пространственных гранул (1) в $\mathbb{R}^2$

Выбор пар гранул для построения отношений определяется их геометрическим смыслом согласно диаграмме (рис. 2).

Как показано в [12], на основе операции инкапсуляции (1) пар подмножеств (рис. 2), выбирая различные пары, можно построить ряд нечетких мер сходства вида:

$$SIM\left({}^{i}G_n, {}^{j}G_n\right) = \left({}^{i}G_n + {}^{j}G_n\right) \Big/ {}^{+}G_n\left({}^{i}G_n, {}^{j}G_n\right). \quad (2)$$

Введенная функция SIM пары подмножеств или гранул ${}^{i}G_n$ и ${}^{j}G_n$ является ограниченной монотонной функцией принадлежности на геометрических объектах в $\mathbb{R}^2$ и определяет симметричное и рефлексивное отношение между двумя моделями гранул, т. е. нечеткое отношение сходства [13]. Инвариантную нечеткую меру сходства (2) используют для решения прикладных задач вычислительного интеллекта, а также описания формы и положения объектов [12] или для классификации гранулированных изображений [9].

Введенная гибридная методология служит основой для построения вычислительных структур, реализующих идеи Л. Т. Кузина о машинах тензорных вычислений [7].

4. Организация структуры машины гранулированных вычислений

Для эффективной реализации нового метода необходимо разработать систематическую структуру применения вычислений на гранулах [20] (рис. 3).

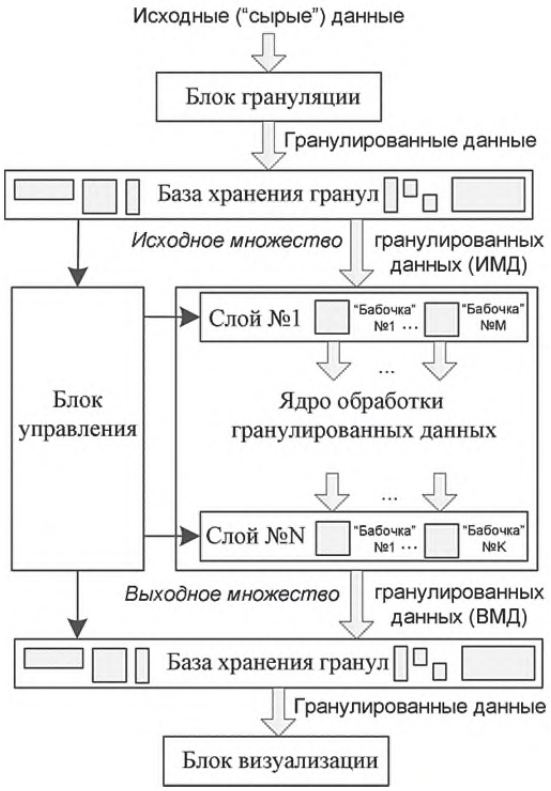


Рис. 3. Организация структуры машины гранулированных вычислений для обработки многомерных данных на поле ПЛИС

В работе [17] предложен быстрый алгоритм вычисления определителей вида (1) и его структурная реализация. Она представляет собой типовой макрос — аналог «бабочки», применяемой при построении алгоритмов БПФ. Базовая структура многослойной (по этапам, см. рис. 1) организации машины гранулированных вычислений на РВС изображена на рисунке 3.

Для сборки слоев РВС из типовых макросов используются разработанные в НИЦ СЭ и НК высокоуровневые средства проектирования — алгоритмический язык COLAMO и язык уровня ассемблера Fire Constructor [16].

5. Применение машин гранулированных вычислений для интеллектуальной обработки изображений

Приведем пример применения разработанных нами алгоритмов [15] и вычислительных структур [17] для интеллектуальной сегментации низкокачественного изображения при реализации послойной обработки низкокачественного изображения в структуре (рис. 3) с целью отделения камуфлированного объекта интереса от визуально неоднородного фона (рис. 4—6).

Рис. 4. Исходное изображение низкого качества (яркость 4 бита) и результат его предварительной сегментации (слои 1—2 машины ГВ)

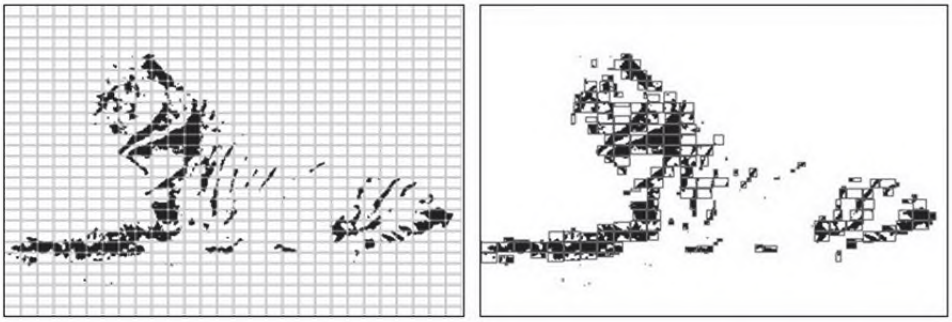


Рис. 5. Сетка и локальная грануляция исходного изображения на 76 гранул (слои 3—4 машины ГВ)

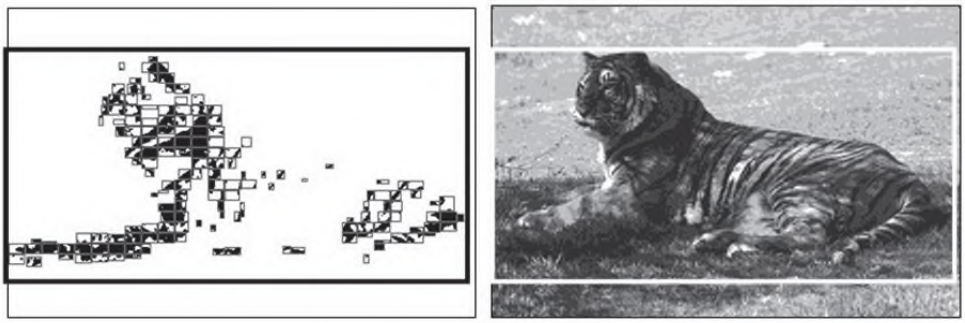


Рис. 6. Глобальная грануляция исходного изображения (получение одной гранулы) и результат захвата камуфлированного объекта на неоднородном фоне (слои 5—6 машины ГВ)

Отметим, что в приведенном примере использовалось изображение низкого разрешения с искусственно заниженным диапазоном значений яркости. Тем не менее захват камуфлированных объектов происходит устойчиво [8].

Заключение

Сочетание прогрессивного математического и алгоритмического аппарата [14; 15] с высокоэффективными аппаратными средствами, разрабатываемыми НИЦ СЭ и НК, позволяет обрабатывать данные большого размера, в том числе и в реальном масштабе времени [16; 17]. Область применения предложенных средств не ограничивается приведенными примерами графических данных, а может распространяться на любые объемы цифровых данных, для которых формулируются интеллектуальные задачи обработки [8].

В перспективе возможно применение методологии пространственной грануляции не только в аффинных, но и в криволинейных координатах. При этом структуры ядра машины гранулированных вычислений останется прежней [13].

Список литературы

1. *Колесников А.В., Кириков И.А.* Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М. : ИПИ РАН, 2007.

2. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / под. ред. А.М. Яшина. СПб. : Изд-во СПбГТУ. 2001.

3. *Zadeh L.A.* Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems // Soft Computing 2 (1998) 23—25, Springer-Verlag, 1998.

4. *Medsker L.R.* Hybrid Intelligent Systems. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1995.

5. *Мальцев А.И.* Алгебраические системы. М. : Наука, 1970.

6. *Бутенков С.А., Жуков А.Л.* Информационная грануляция на основе изоморфизма алгебраических систем // Сб. трудов Международной алгебраической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения А.И. Кострикина. Нальчик, 2009. С. 206—209.

7. *Кузин Л.Т.* Основы кибернетики : в 2 т. Т. 1 : Математические основы кибернетики : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1994.

8. *Butenkov S.* Robust Representation and Processing for weakly structured information // In Proceedings of IEEE-sponsored International Conference on Artificial Intelligence «AIS 2004», Divnomorskoe, Russia, September 5—10, 2004. P. 89—91.

9. *Butenkov S.* Granular Computing in Image Processing and Understanding. In Proceedings of IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications «AIA 2004», Innsbruk, Austria, February 10—14, 2004.

10. *Бутенков С.А*. Вычисления со словами в задачах интеллектуальной обработки многомерной информации // Сб. трудов III Международного научно-практического семинара «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Коломна, 2005. С. 133—139.

11. *Бутенков С.А.* Развитие парадигмы интеллектуального анализа многомерной информации применительно к теории информационной грануляции // Сб. трудов IV Международного научно-практического семинара «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Коломна, 2007. Т. 1. С. 188—194.

12. *Бутенков С.А., Жуков А.Л., Джинави Я.А*. Топологические модели в задачах информационной грануляции // Сб. трудов V Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Коломна, 2009. Т. 1. С. 312—324.

13. *Бутенков С.А.* Алгебраические модели в задачах интеллектуального анализа многомерных данных // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Математическая теория систем 2009» (МТС-2009). М., 2009. С. 93—101.

14. *Butenkov S., Zhukov A., Nagorov A., Krivsha N.* Granular Computing Models and Methods Based on the Spatial Granulation // XII Int. Symposium «Intelligent Systems», INTELS'16, 5—7 October 2016, Moscow, Russia. Elsevier Procedia Computer Science 103 (2017). P. 295—302.

15. *Krivsha N., Krivsha V., Beslaneev Z., Butenkov S.* Greedy algorithms for Granular Computing Problems in Spatial Granulation Technique // XII Int. Symposium «Intelligent Systems», INTELS'16, 5—7 October 2016, Moscow, Russia. Elsevier Procedia Computer Science 103 (2017). P. 303—307.

16. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. и др.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2009.

17. *Бутенков С.А.* Методы информационной грануляции в параллельных вычислениях // Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «СКТ-2014», 29 сентября — 4 октября 2014 г. Дивноморское, Геленджик, 2004. Т. 1. С. 99—104.

18. *Keller J., Matsakis P.* Aspects of High Level Computer Vision Using Fuzzy Sets // in proc. of FUZZ-IEEE 1999, Seoul, Korea, 1999. P. 847—852.

Г.П. Виноградов, И.А. Конюхов, К.В. Куприянов
ЗАО «НИИ Центрпрограммсистем», Тверь, Россия
E-mail: wgp272ng@mail.ru

ПАТТЕРНЫ В УПРАВЛЕНИИ АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ

Автономные системы военного назначения (РТК) следует рассматривать как киберфизический объект, который должен обладать свойством самодостаточного поведения при выполнении миссий. Это автономная интеллектуальная система (далее — агент), проявляющая поведение, подобное человеческому. Она имеет: 1) бортовые измерительные устройства-сенсоры, позволяющие получать информацию о состоянии внешней среды и собственном состоянии; 2) бортовые исполнительные устройства для воздействия на внешнюю среду и на самого себя; 3) средства коммуникации с другими системами; 4) «бортовой интеллект», составляющими которого являются вычислительные средства, программное обеспечение.

Агент выполняет поставленные задачи, исходя из понимания своего состояния, состояния среды и развития боевой ситуации, а также информации, получаемой через модуль коммуникации. Развитие эффективности подобных систем проводится по двум направлениям: а) совершенствование функциональной и аппаратной составляющей в перспективных образцах РТК; б) разработка более совершенных алгоритмов выполнения задач. Один из подходов решения этой проблемы — агентно-ориентированное моделирование [1; 2], где агент рассматривается как система, способная адекватно реагировать на изменение внешней среды, не предусмотренной явно встроенными поведенческими механизмами. Однако следует отметить, что подавляющее число исследований в этой области остается на теоретическом уровне. Существует разрыв между примитивными моделями поведения сущностей, например в роевой робототехнике, моделями их взаимодействия и ожиданиями со стороны практики.

Психологи утверждают, что процесс познания человеком окружающего мира на основе поступающей информации происходит на бессознательном уровне и доказательства оцениваются интуитивно, а не согласно логическим утверждениям и математическим формулам. Поэтому усилия разработчиков должны быть направлены на системную интеграцию всех подсистем бортового оборудования и операторов путем разработки соответствующих информационных технологий на базе моделей алгоритмов искусственного интеллекта и сетевых технологий [3; 4]. Подход должен быть основан на формировании и использовании лучших паттернов поведения.

Требования к автономии и интеллектуальности киберфизических систем

Роль автоматизированных систем при выполнении боевых задач должна рассматриваться с позиции их влияния на человека. Они призваны помогать

© Виноградов Г.П., Конюхов И.А., Куприянов К.В., 2020

командиру, упрощая и повышая эффективность его работы. Командир при этом должен и обязан быть элементом системы управления (human in the loop control). Их взаимодействие нацелено на передачу опыта как от человека к машине, так и в обратном направлении, обеспечивая тем самым приспособительное поведение. Это предполагает исследование и разработку систем, содержащих так называемый *кооперативный интеллект*. Необходимо реализовать схему мониторинга за киберфизической системой для выявления классов ситуаций и успешных способов действия для формирования моделей поведения (паттернов) на основе данных, получаемых в результате выполнения миссий. Такой процесс обучения образует метауровень, основное звено которого — командир пункта управления с его штабом. При таком подходе автоматизированные роботизированные системы различной степени «интеллектуальности» и автономности становятся органичной составной частью будущих разработок для областей боевого применения различными родами войск.

Исходные предположения и гипотезы

Как правило, ситуации, возникающие перед автономной системой, достаточно сложны для конструктивной формализации их традиционными формальными методами, но они хорошо описываются средствами естественного языка и по ним имеется опыт (паттерны) их лучшего разрешения. Поэтому интеллектуализация РТК реализуется в направлении включения его в деятельность и согласовываться с оператором (командиром). Его поведение и действия должны быть понятны и корректируемы.

Примем гипотезу, что переживания/поведение человека следует рассматривать как функцию взаимодействия ситуации и человека. Целенаправленное действие человека зависит как от признаков ситуации, так и от его личностных черт (степень мотивации, структуры способностей, знания и т. п.). Ситуацию можно интерпретировать как компонент причины, которая порождает субъективное отражение ее у человека. Человек, выбирая определенное поведение на основе субъективного представления ситуации, оказывает влияние на ситуацию, изменяя ее. В то же время процессы, происходящие в сознании человека при выполнении определенных действий, приводят к расширению его структуры способностей (знания, опыт). То есть устойчивые черты человека, которые проявляются в его действиях, через поведение и переживания, могут влиять на ситуацию, изменяя ее. И наоборот, ситуация может оказывать обратное влияние на устойчивые черты человека, когда он, интерпретируя ее, изменяет свои ценности, нормы, способы действия и опыт. Модель поведения агента также должна учитывать этот феномен взаимовлияние РТК и ситуации. Отметим, что технология использования РТК в соответствии с вышеизложенным предполагает при решении проблемы их «интеллектуализации» разработку, как минимум, трех систем: 1) внебортовых интеллектуальных систем подготовки РТК к выполнению текущей боевой задачи, которые должны: обеспечить перенесение на борт РТК всей необходимой для

успешного выполнения миссии информации (цели, задачи, карты, алгоритмы связи, способы получения коррекций и т. п.); подготовку экипажа сопровождения РТК; 2) вторую группу составляют собственно бортовые интеллектуальные системы управления, обеспечивающие выполнение боевой задачи в автономном режиме; 3) третью группу представляют интеллектуальные системы анализа результатов выполнения миссии РТК. Результаты их работы — основа для накопления эффективной и актуальной базы паттернов, а также формирования требований к функциональной и аппаратной составляющей РТК.

При разработке бортовых интеллектуальных систем управления конструктивным оказалось понятие «типовая ситуация» (ТС). Под ним понимается функционально замкнутая с четко обозначенной значимой целью часть работы РТК, которая как единое целое встречается в различных миссиях, конкретизируясь в них по условиям протекания и по доступным способам разрешения возникающих в ТС проблемных субситуаций [5].

При полной интеллектуализации РТК ТС и способы действия, как реакция на нее, образуют индивидуальный паттерн поведения. Так как деятельность регулируют определенные когнитивные модели целенаправленных действий, то эти модели включают в себя представление о временной последовательности выполнения отдельных видов действий. Основой для выработки способов действия следует рассматривать субъективные представления агента о ситуации целеустремленного состояния [3; 6]. Будем предполагать, что наблюдаемая деятельность агента — функция выработанных им программ, являющихся, в свою очередь, результатом присущих ему когнитивных процессов и которые с различной степенью эффективности служат выполнению поставленных задач или достижению желаемых результатов. Таким образом, план деятельности и его реализация — продукт внутреннего программирования. Его результат — программа (*алгоритм*) действий, использующий операции, доступные агенту. Она позволяет агенту путем ее реализации преобразовать наблюдаемую ситуацию в желаемую (целевую). Реализуемость созданного алгоритма человек оценивает лингвистическими переменными *убежденность* и *эффективность*.

Определение. Паттерн — это результат активности человека (группы лиц), связанный с действием, принятием решений, поведения и т. п., осуществленный в прошлом и рассматриваемый как шаблон (образец) для повторных действий или как обоснование действий по этому шаблону. Человек, проводя освоение своего опыта, нацелен на агрегирование его путем создания моделей паттернов.

Следовательно, модель паттерна следует рассматривать как единицу человеческого опыта, для которой в ситуации, схожей с типовой (кластер), у человека сформирована определенная степень уверенности в получении желаемых состояний. Моделирование паттернов выполняется с ограниченным подмножеством естественного языка, в том числе и моделирование рассуждений на паттернах (case based reasoning), что образует специфическую часть человеческого опыта — метаопыт.

Модель нечеткого описания ситуации целеустремленного состояния

Описанное целеустремленное поведение связано с выбором, который происходит в ситуации целеустремленного состояния [3]. Возможный вариант такой конструкции предложено строить путем «парадигмальной прививки» идей, транслируемых из других наук, например [1; 7].

Целеустремленное состояние складывается из следующих компонент: 1) субъект, осуществляющий выбор $k \in K$; 2) окружение выбора (S), под которым понимается множество элементов и их существенных свойств, изменение в любом из которых может стать причиной изменения состояния целеустремленного выбора; 3) доступные способы действий $c_j^k \in C^k$, $j = \overline{1,n}$ k-го агента, которые могут быть использованы им для достижения i-го результата; 4) возможные при окружении S результаты, существенные для агента — $o_i^k \in O^k$, $i = \overline{1,m}$; 5) ограничения, отражающие требования, накладываемые ситуацией выбора на выходные переменные и управляющие воздействия; 6) модель предметной области, которая представляет собой множество соотношений, описывающих зависимость управляющих воздействий, параметров и возмущений с выходными переменными.

В докладе рассматривается реализация описанного подхода при управлении выполнении поисковых миссий группой автономных необитаемых аппаратов

Список литературы

1. *Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.* Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и ее расширения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. №5. С. 102—121.

2. *Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В., Фомина Е.Е.* Теоретико-игровая модель целенаправленного субъективно рационального выбора // Нейроинформатика. 2017. Т. 10, №1. С. 1—12.

3. *Виноградов Г.П., Кузнецов В.Н.* Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. №3. С. 58—72.

4. *Vinogradov G.P.* A Subjectve Rational Choice // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series 803 (2017) 012176 DOI: 10.1088/1742—6506/803/1/012176.

5. *Федунов Б.Е., Прохоров М.Д.* Вывод по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. №3. С. 63—72.

6. *Виноградов Г.П.* Моделирование принятия решений интеллектуальным агентом // Программные продукты и системы. 2010. №3. С. 45—51.

7. *Борисов П.А., Виноградов Г.П., Семенов Н.А.* Интеграция нейросетевых алгоритмов, моделей нелинейной динамики и методов нечеткой логики в задачах прогнозирования // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. №1. С. 78—84.

А.В. Колесников[1], С.Б. Румовская[2], Э.В. Ясинский[3]
[1,3] БФУ им. И. Канта, [2] КФ ФИЦ ИУ РАН, Калининград, Россия
e-mail: [1]avkolesnikov@yandex.ru, [2]sophiyabr@gmail.com, [3]ejasinski96@gmail.com

ЯЗЫК ПРЕДИКАТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ СЛОВЕСНО-ВЕРБАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ О РЕСУРСАХ, СВОЙСТВАХ, ДЕЙСТВИЯХ, СТРУКТУРАХ, СОСТОЯНИЯХ И РЕЖИМАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ С ВЫСОКОЙ ДИНАМИКОЙ

Введение

Д.А. Поспелов и В.Н. Пушкин в [1] подчеркивали: «Мышление — это прежде всего установление отношений между предметами. С помощью специальных мыслительных механизмов среда, в которой живет и действует субъект, воссоздается в его голове с отражением тех признаков и связей, которые обнаруживаются между предметами. В отличие от языка восприятия, в котором фиксируются прежде всего те свойства предметов, которые проявляются в воздействиях на органы чувств, для мышления характерен специальный язык отношений и связей. Посредством этого специфического языка субъект получает возможность для внутренней работы с теми объектами и их свойствами, которые не даны в восприятии, которые находятся вне сферы его непосредственных контактов».

Исследованию представлений о лексических (объектных, семантических) отношениях посвящены работы по философии, логике, математике, информатике, методологии науки и теории систем А.И. Уемова, Е.К. Войшвилло, Ю.А. Шрейдера, Д.П. Горского, В.Ш. Рубашкина, С.В. Лурье, Л.Ф. Замятиной, З. Вендлера, А.Я. Райбекаса, В.И. Свидерского, М.М. Новоселова, Г.Д. Левина, П.М. Колычева, по филологии, языковедению, лингвистике, прикладной лингвистике В.В. Мартынова, Ю.Д. Апресяна, Н.Д. Арутюновой, Л.В. Щербы, О.Н. Селиверстовой, Д.Н. Шмелева, Г.Д. Ахметовой, Э.Ф. Скороходько, Е.С. Кубряковой, З.В. Поповой, Ю.Н. Караулова, Г.А. Золотовой, Н.С. Трубецкого, Т.В. Булыгиной, Л.М. Васильева, Т.Д. Шабановой, А.В. Бондарко, Ю.С. Степанова, А.И. Варшавской, М.В. Всеволодовой, В.И. Кодухова, Н.Н. Леонтьевой, когнитивной, контрастивной лингвистике Н.Н. Болдырева, Э.А. Сорокиной, А.И. Стернина, Е.В. Дзюба, У. Чейфа, общей психологии, психофизиологии, психологии речи, психолингвистики Т.Н. Ушаковой, В.П. Белявина, Ю.А. Сорокина, В.Н. Пушкина, С.А. Дружилова, А.Н. Соколова, психотерапии В.Н. Мясищева, новым методам управления, искусственному интеллекту, представлению знаний в интеллектуальных системах Д.А. Поспелова, А.В. Колесникова, Л.Б. Нисенбойма, Е.Ю. Кандрашиной, Л.В. Литвинцевой, Г.С. Осипова, С.О. Варосян.

© Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В., 2020

Первые результаты наших исследований семантики отношений в вербально-знаковых представлениях знаний интеллектуальных систем отражены в [2], позже они развиты в [3; 4] в рамках лингвистического подхода к гибридизации и проблемно-структурной методологии и технологии функциональных гибридных интеллектуальных систем (ГиИС).

В докладе применительно к новому классу систем искусственного интеллекта (ИИ) когнитивным ГиИС — экзокортексу, дополняющему и усиливающему интеллектуальные способности человека-оператора в проблемных ситуациях, рассматривается разработка языка описания отношений и связей (ЯООС) для предикативного кодирования словесно-вербальных знаний о ресурсах, свойствах и действиях персонала, грамматики тождественных преобразований и функциональной деформации когнитивного образа состояния объекта управления.

1. Предикативная модель когнитивного и оперативного образа объекта оперативно-технологического управления (ОТУ) в системах с высокой динамикой

Основная особенность операторского труда — дистанционный, опосредствованный характер управления объектом, находящимся вне поля зрения управляющего субъекта-оператора, когда своими воздействиями он физически преобразует объект управления, не наблюдая его непосредственно. В таких условиях особое значение приобретает образ объекта управления (ОУ) — представление, «превращающее отсутствующий предмет в присутствующий в уме» [5]. Управление будет эффективным, если образ отражает важные особенности ОУ для оператора и релевантен его оперативным действиям. Отсюда и следует актуальность формирования, использования и модификации его собственных образных, ментальных представлений о ресурсах-предметах, их свойствах, взаимоотношениях, событиях, ситуациях, производственном процессе и о его географическом месте, состоянии и режимах ОУ. По мере накопления опыта эти образы становятся основным психическим компонентом, материалом и объектом интеллектуальной деятельности оператора.

Когнитивный образ (КО) объекта управления, по Д. А. Ошанину, — результат познавательной функции отражения, инструмент полноты познания ОУ. Это мировоззрение и «кладовая» сведений об объекте управления. КО избыточный, энтропийный и непрерывно развивающийся, обогащающийся и редуцируемый, внутренне переструктурирующийся, средство «инвентаризации» потенциально полезных свойств ОУ. Когнитивный образ — открытая информационная система гибкого переключения с одних структур на другие в зависимости от изменения релевантных параметров.

Оперативный образ объекта (ОО) управления, по Д. А. Ошанину, — образ ОУ как результат регулирующей функции отражения, формирующийся у человека-оператора — субъекта управления в процессе выполнения им задач ОТУ, функциональная психологическая система (модель), перерабатывающая информацию о последовательных состояниях объекта в целесообразные воз-

действия на него. Размышления оператора над образом ОУ и изменения (трансформации), которые при этом образ ОУ претерпевает, называются динамикой ОО по Д.А. Ошанину. Оперативный образ динамичен, изменчив, текуч, противоречив и регулирует конкретное действие во времени и в пространстве. Он прагматичен, «подчинен» решаемой задаче и релевантеней, специфичен, пригоден только для конкретной задачи, лаконичен, своеобразно ограничен, «отвлечен» от неиспользуемых в данный момент для решения особенностей ОУ.

Семантику КО и ОО отражает язык профессиональной деятельности (ЯПД) человека-оператора. Традиционная модель абстрактных знаний ЯПД — предикативная модель с базовой структурой «предикат-аргумент», которой можно присвоить значения «верно» или «ложно» [6], имевшая успех в лингвистике благодаря возможности организации вычислений и долгие годы предопределявшая «лингвистическом поворот» в философии познания [7]. В классической логике Аристотеля субъект определялся как предмет, о котором выносится суждение. Субъект (σ) может соотноситься либо с ресурсом ОУ, либо с понятием о нем в сознании человека-оператора. Суждение о ресурсе выносится в форме предиката (ρ), утвердительного или отрицательного высказывания. Структуру атрибутивного суждения представляет формула $\sigma - \rho$. В нее может вводиться связка (глагол есть) как компонент, выражающий присущность или неприсущность признака ресурсу.

Впоследствии атрибутивную логику стала вытеснять реляционная логика, определяющая предикат не как свойство ресурса $(\sigma\ -\rho$ *или* σ *есть* $\rho)$, а как отношение между двумя (тремя и т.д.) ресурсами, аргументами, что отразилось в формулах типа $\rho(x,y)$, $\rho(x,y,z)$, где ρ символизирует двухместный или одноместный предикат: располагаться на (трансформатор, подстанция) = трансформатор расположен на подстанции; располагаться между (ЛЭП, ТЭЦ-2, подстанция Северная) = ЛЭП расположена между ТЭЦ-2 и подстанцией Северная.

Предикат (лат. *praedicatum* — заявленное, упомянутое, сказанное) — термин логики и языкознания, обозначающий конститутивный член суждения — то, что высказывается (утверждается или отрицается) о субъекте. В славянских терминологических системах «предикат» заменен на «сказуемое», с которым ассоциируется формальный аспект этого члена предложения, а с термином «предикат» — содержательный.

По количеству актантов предикаты делятся на: одноместные (Сигнал аварийный); двухместные (Дома близко к ЛЭП); трехместные (Дом близко к ЛЭП и видеокамере); четырехместные (Дерево заслоняет опору ЛЭП от видеонаблюдения большими ветками); бывают еще пяти-, шести- и семиместные предикаты. На синтаксическом уровне предикат — ядерная структура с n актантами (рис. 1). Ядро — глагольная конструкция, а актанты объединяются с ядром системой отношений. Узлы в этой конструкции — имена (существительное, местоимение, числительное) в их атрибутивной форме.

Рис. 1. Структура предиката:
ДЕЙСТВИЕ — ядро, глагольная конструкция; СУБЪЕКТ; ОБЪЕКТ 1, … , ОБЪЕКТ 7 — актанты предиката; r_0 — отношение «быть субъектом»; r_i — отношения предиката

Синтаксис (формализованная запись) предиката для атомарного предложения принимается в следующей интерпретации:

(ДЕЙСТВИЕ) иметь субъектом (СУБЪЕКТ), (ДЕЙСТВИЕ) иметь объектом (ОБЪЕКТ 1), (ДЕЙСТВИЕ) иметь место (ОБЪЕКТ 2), иметь результат (ОБЪЕКТ 3), (ДЕЙСТВИЕ) иметь средство (ОБЪЕКТ 4), (ДЕЙСТВИЕ) иметь средство (ОБЪЕКТ 5), откуда (ОБЪЕКТ 6), (ДЕЙСТВИЕ) куда (ОБЪЕКТ 7), (ДЕЙСТВИЕ) (r_0(СУБЪЕКТ) r_1(ОБЪЕКТ 1) r_2(ОБЪЕКТ 2), r_3(ОБЪЕКТ 3) r_4(ОБЪЕКТ 4) r_5(ОБЪЕКТ 5) r_6(ОБЪЕКТ 6) r_7(ОБЪЕКТ 7)),

$$\left({}^{Д}x_1\right)\left(r_0\left({}^{C}x_1\right)r_1\left({}^{O}x_1\right)r_2\left({}^{O}x_2\right),r_3\left({}^{O}x_3\right)r_4\left({}^{O}x_4\right)r_5\left({}^{O}x_5\right)r_6\left({}^{O}x_6\right)r_7\left({}^{O}x_7\right)\right),$$

где ДЕЙСТВИЕ, ${}^{Д}x_1$ — ядро предиката (предикатор), в общем случае, — глагольная конструкция, которая может иметь дополнительно атрибутивные компоненты; СУБЪЕКТ, ${}^{C}x_1$ — субъект предиката, материальная сущность, нематериальный объект, «пусто»; ОБЪЕКТ 1, ${}^{O}x_1$,…,ОБЪЕКТ 7, ${}^{O}x_7$ — актанты; могут быть представлены отдельными объектами, или в форме конкретных характеристик предикатора, обозначенных наречиями (вчера, сегодня, там, здесь и т. п.); r_0 — отношение быть субъектом, $r_1,\ldots,r_7$ — отношения предиката.

В формализованных представлениях предиката «сверху-вниз» сокращается «размер» сообщения, оно кодируется, т. е. конвенциально, по установленной заранее договоренности, имен отношений иметь субъектом, иметь объктом, иметь местом и др. заменяются на их кодовые обозначения (*r*-коды) $r_0,\ldots,r_7$ соответственно, а также имен ДЕЙСТВИЕ, СУБЪЕКТ, ОБЪЕКТ на их *x*-коды, от которых зависит качество и эффективность использования когнитивного образа и переработки оперативного образа в когнитивных ГиИС.

Такое семантическое rx-кодирование исследовалось Э. Ф. Скороходько, Л. С. Загадской (Болотовой) и Ю. И. Клыковым и применялось в языке ситуа-

ционного управления Д.А. Поспелова. Калининградская школа [2] в разработках компилятора с ограниченного естественного языка описания состояния морского рыбного порта во внутримашинное представление внесла в *rx*-коды третью составляющую — k, символ классификационного признака понятий и отношений. Такое кодирование названо предикативным *rkx*-кодированием, а сами коды имен отношений и понятий стали формироваться по правилам сообразно с классификацией ресурс-ресурс, свойство-свойство, действие-действие, ресурс-свойство, свойство-ресурс, ресурс-действие, действие-ресурс, действие-свойство, свойство-действие и их формально-логических свойств [8].

Семантические *rkx*-коды, включающие не только признак имени: отношения — *r*, понятия — *x*, их номер в словаре, но и признак формально-логических свойств (симметричное, транзитивное и др., прямое, обратное) и признаки принадлежности к классам, по Д.А. Поспелову (классификации, признаковые, количественные, сравнения, принадлежности и др.), и классам, по А.В. Колесникову и В.Ф. Пономареву, — k были экспериментально апробированы на материалах языка профессиональной деятельности диспетчера морского рыбного порта, а программное обеспечение, написанное на языке РЕФАЛ объемом 1552 РЕФАЛ-предложения, использующее *rkx*-кодирование, показало высокую эффективность формирования языка описания состояния объекта управления как основополагающей составляющей полиязыковой семиотической модели интеллектуальной системы управления в памяти компьютера. Семантическое *rkx*-кодирование появилось одновременно с моделью концептуальной зависимости Р. Шенка и практически было вытеснено из работ по семиотическим моделям и искусственному интеллекту алгеброй Кодда и реляционными базами данных.

Формирование синтагматических, ситуационных отношений быть временем, быть пространством, быть причиной, быть следствием и т.п. происходит иным путем. Ситуационные отношения распространены в ЯПД, потому что воссоздают пространственно-временные и причинно-следственные связи, явно или неявно всегда присутствующие в оперативных сообщениях. Языковая практика выработала формы реализации этих отношений — синтагмы и синтагматические цепи.

Синтагма, по П.М. Колычеву [9], — двучленное соположение каких-либо элементов языка отношений в линейной последовательности: ЗНАЧЕНИЕ *равно* 50, ПОДСТАНЦИЯ СЕВЕРНАЯ *рядом* КАЛИНИНГРАД, ТРАНСФОРМАТОР *находится* НА ПОДСТАНЦИИ. На абстрактном уровне синтагма имеет следующую форму:

$$(\text{ОБЪЕКТ 1})\,r\,(\text{ОБЪЕКТ 2}) \text{ или } \left({}^{O}x_1\right) r \left({}^{O}x_2\right),$$

где ОБЪЕКТ 1, ${}^{O}x_1$ — абстракция от ЗНАЧЕНИЕ, ПОДСТАНЦИЯ СЕВЕРНАЯ, ТРАНСФОРМАТОР; ОБЪЕКТ 2, ${}^{O}x_2$ — абстракция от 50, КАЛИНИНГРАД, ПОДСТАНЦИИ; r — абстракция от *равно*, *рядом*, *находится* на и им подобным.

Синтагма, «тройка» как простая ядерная конструкция, по Д. А. Поспелову, — основная единица языка отношений ситуационного управления. В средней ее позиции находится отношение *r*, а в крайних позициях, называемых левым ${}^{O}x_1$ и правым полюсами ${}^{O}x_1$, — понятия (круглые скобки использованы как разделители). Отношения *r* связывают между собой ресурсы объекта управления, которые выступают в них как определенные роли, семантика которых определяется видом отношения. Такие отношения *r* называются ролевыми.

2. Лексика языка отношений и связей когнитивного и оперативного образов в предикативной модели

Классификация понятий интерпретирует три философские категории «вещь», «свойство» и «отношение» А. И. Уемова в терминах предметной области «интеллектуальные системы управления электросетями и электроустановками».

Каждое понятие в ЯОСС обозначается $x^n \in X^n$, где $n=0$ — признак базового понятия, $n \in \{1,2,\ldots\}$ — признак производного, сложного понятия. Представим множество понятий ЯОСС $X^0 = X^0_\alpha \cup X^0_\beta$, где X^0_α, X^0_β — основное и вспомогательное подмножества. Основное множество определено тремя категориями: ресурс, свойство и действие. В предложениях ЯПД они в основном выражаются именами существительными, именами прилагательными, порядковыми числительными и определительными наречиями. Вспомогательное множество понятий определено категориями: мера, значение, характеристика, параметр, имя, состояние, оценка. Для построения классификатора X^0 приняты соответствующие определения [3], которым взаимнооднозначно сопоставлены следующие предикаты: $\rho^1_1(x^0)$ — быть ресурсом, $\rho^1_2(x^0)$ — быть свойством, $\rho^1_3(x^0)$ — быть действием, $\rho^1_4(x^0)$ — быть мерой, $\rho^1_5(x^0)$ — быть значением, $\rho^1_6(x^0)$ — быть характеристикой (характеристическим свойством), $\rho^1_7(x^0)$ — быть параметром (физическим свойством), $\rho^1_8(x^0)$ — быть именем (именным свойством), $\rho^1_9(x^0)$ — быть состоянием, $\rho^1_{10}(x^0)$ — быть оценкой, $\rho^1_{11}(x^0)$ — быть экзотическим понятием.

Введенные категории определены через родо-видовые отличия, примеры и связи с частями речи, что делает разбиение X^0 на классы понятным и намечает определенный формализм в семантическом разложении выражений ЯПД. Экзотические понятия делают классификацию легко расширяемой за счет анализа элементов ${}^{11}X^0$ и введения новых определений и соответствующих предикатов.

Задав на X^0 три первых из введенных выше предикатов

$$M_1 = \left\langle X^0, \rho_i^1\left(x^0\right) \mid i \in \overline{1;5}, i \in \{9,10,11\} \right\rangle,$$

получим разбиение X^0 на восемь подмножеств: ${}^1X^0$ — ресурсы, ${}^2X^0$ — свойства и ${}^3X^0$ — действия, ${}^4X^0$ — меры, ${}^5X^0$ — значения, ${}^6X^0$ — состояния, ${}^7X^0$ — оценки и ${}^8X^0$ — экзотические понятия. При этом должны выполняться $X^0 = \bigcup_i {}^iX^0$, при $i \in \overline{1;8}$ и $\varnothing = \bigcup_i \left({}^iX^0 \bigcap {}^jX^0 \right)$, при $i \neq j$ и $i, j \in \overline{1;8}$. В силу неформальности процедуры разбиения X^0 на подмножества могут иметь место два явления: ${}^ix_k^0 \equiv {}^jx_m^0$ и ${}^ix_k^0, {}^jx_m^0 \in {}^zX^0 \mid i = j = z$ — дублирование понятий, а также ${}^ix_k^0 \equiv {}^jx_m^0$ и ${}^ix_k^0 \in {}^iX^0, {}^jx_m^0 \in {}^jX^0 \mid i \neq j$ — омонимия. Оба явления формально обнаружимы, однако если первое легко устраняется, то второе требует анализа субъектом.

Задав на ${}^2X^0$ предикаты $\rho_6^1\left(x^0\right)$, $\rho_7^1\left(x^0\right)$, $\rho_8^1\left(x^0\right)$:

$$M_2 = < {}^2X^0, \rho_i^1\, {}^2x^0) \mid i \in \overline{6;8} >,$$

получим разбиение ${}^2X^0$ на три подмножества ${}^{21}X^0$ — параметры, ${}^{22}X^0$ — характеристики, ${}^{23}X^0$ — имена. Должны выполняться: ${}^2X^0 = \bigcup_i {}^{21i}X^0$, при $i \in \overline{1;3}$ и $\varnothing = \bigcup \left({}^{21i}X^0 \bigcap {}^{21j}X^0 \right)$, при $i \neq j$ и $i, j \in \overline{1;3}$. Если $x_k^0 \in X^0$ и $\forall \rho_i^1\left(x_k^0\right) \mid i \in \overline{1;10}$ = ложно, то $x_k^0 \in {}^8X^0$.

Вторую группу лексических единиц ЯОСС составляют отношения следующих классов по Д. А. Поспелову: определения (ОП15 — здесь и ниже код определения класса отношений), сравнения (ОП16), пространственные (ОП17), временные (ОП18), включения (ОП19), причинности (ОП20) и предпочтения (ОП21).

В ЯПД отношения ресурсов обозначаются именами существительными (часть, тождество, равенство, объект, субъект, средство и т. п.) и соотносимыми с ними именами прилагательными (тождественные, равные и т. п.), глаголами (иметь, быть, существовать, характеризовать и т. п.), предлогами, союзами или их сочетаниями (быть над, находиться за, быть раньше и т. п).

Каждое отношение (связь) в ЯОСС обозначается $r^0 \in R^0$ или $r^{\text{п}} \in R^{\text{п}}$ в зависимости от того, словом или словосочетанием оно обозначено в ЯПД. Сопоставим определениям ОП15 — ОП21 предикаты: $\rho_{12}^1\left(r^0\right)$ — быть отношением определения, $\rho_{13}^1\left(r^0\right)$ — быть отношением сравнения, $\rho_{14}^1\left(r^0\right)$ —

быть отношением пространственным, $\rho^1_{15}\left(r^0\right)$ — быть отношением временным, $\rho^1_{16}\left(r^0\right)$ — быть отношением включения, $\rho^1_{17}\left(r^0\right)$ — быть отношением причинности, $\rho^1_{18}\left(r^0\right)$ — быть отношением предпочтения.

Тогда, задав на R^0 введенные предикаты:

$$M_3 = \left\langle R^0, \rho^1_i\left(r^0\right) \middle|\ i \in \overline{12;18} \right\rangle,$$

получим разбиение R^0 на семь подмножеств отношений: ${}^1R^0$ — определения, ${}^2R^0$ — сравнения, ${}^3R^0$ — пространственные, ${}^4R^0$ — временные, ${}^5R^0$ — включения, ${}^6R^0$ — причинности, ${}^7R^0$ — предпочтения. При этом должны выполняться: $R^0 = \bigcup {}^iR^0$, при $i \in \overline{1;7}$, и поскольку r^0_1 — быть $\in {}^2R^0, {}^3R^0, {}^4R^0$, а r^0_2 — иметь $\in {}^1R^0, {}^5R^0, {}^6R^0, {}^7R^0$, то в общем случае $\varnothing = \bigcup\left({}^iR^0 \bigcap {}^jR^0 \right)$, при $i \neq j$ и $i, j \in \overline{1;7}$.

Модель M_3 следует классификации Д. А. Поспелова и позволяет выделить в ЯПД отношения и связи семи классов и заполнить соответствующие словари, однако она не задает структуру знаков ЯОСС.

Построим полный граф G_1

$$G_1 = \left({}^1X^0, {}^2X^0, {}^3X^0; R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{12}, R_{21}, R_{13}, R_{31}, R_{23}, R_{32} \right),$$

где $R_{11} = \left\{ R^0_{11}, R^{\text{п}}_{11} \right\}$, $R_{22} = \left\{ R^0_{22}, R^n_{22} \right\}, \ldots, R_{32} = \left\{ R^0_{32}, R^n_{32} \right\}$.

Дадим определения отношениям R^0_{ij}, не выходя за рамки классификаций понятий M_1 и M_2, классификации отношений M_3 и, понимая под $1/R$ — обратным R, такое отношение в X^0, что для любых ${}^iX^0$ и ${}^jX^0$ из X^0 соотношение ${}^iX^0 \ 1/R \ {}^jX^0$ равносильно ${}^jX^0$ R ${}^iX^0$:

О30 (R^0_{11} — отношение между понятиями ${}^1x^0 \in {}^1X^0$, включающее ${}^1R^0_{11}$, ${}^3R^0_{11}$, ${}^5R^0_{11}$,

О31 $\left(R^0_{22} - {}^2x^0 \in {}^2X^0;\ {}^1R^0_{22},\ {}^3R^0_{22},\ {}^5R^0_{22} \right)$,

О32 $\left(R^0_{33} - {}^3x^0 \in {}^3X^0;\ {}^1R^0_{33},\ {}^4R^0_{33},\ {}^5R^0_{33},\ {}^6R^0_{33} \right)$,

О33 $\left({}^1X^0\ R^0_{12}\ {}^2X^0 = \left\{ {}^1X^0\ {}^1R^0_{12}\ {}^2X^0 \right\} \right)$,

О34 $\left({}^2X^0 R^0_{21}\ {}^1X^0 = \left\{ {}^2X^0\ {}^1R^0_{21}\ {}^1X^0 \middle|\ {}^1R^0_{21} = 1/\ {}^1R^0_{12} \right\} \right)$,

О35 $\left({}^{1}X^{0}\, R_{13}^{0}\, {}^{3}X^{0} = \left\{ {}^{1}X^{0}\ {}^{1}R_{13}^{0}\ {}^{3}X^{0},\ {}^{1}X^{0}\ {}^{6}R_{13}^{0}\ {}^{3}X^{0} \right\} \right)$,

О36 $\left({}^{3}X^{0}\, R_{13}^{0}\, {}^{1}X^{0} = \left\{ {}^{3}X^{0}\ {}^{1}R_{31}^{0}\ {}^{1}X^{0},\ {}^{3}X^{0}\ {}^{6}R_{31}^{0}\ {}^{1}X^{0} \middle|\ {}^{6}R_{31}^{0} = 1 /\ {}^{6}R_{13}^{0} \right\} \right)$,

О37 $\left({}^{3}X^{0}\, R_{32}^{0}\, {}^{2}X^{0} = \left\{ {}^{3}X^{0}\ {}^{1}R_{32}^{0}\ {}^{2}X^{0} \right\} \right)$,

О38 $\left({}^{2}X^{0}\, R_{23}^{0}\, {}^{3}X^{0} = \left\{ {}^{2}X^{0}\ {}^{1}R_{23}^{0}\ {}^{3}X^{0} \middle|\ {}^{1}R_{23}^{0} = 1 /\ {}^{1}R_{32}^{0} \right\} \right)$.

Построим граф G_2, вершины которого обозначены множествами ${}^{2}X^{0}$, ${}^{4}X^{0}$, ${}^{5}X^{0}$. Тогда ребра определят систему отношений, из которых выделим: R_{24} — свойство-мера, R_{25} — свойство-значение, R_{45} — мера-значение:

$$G_2 = \left({}^{2}X^{0}, {}^{4}X^{0}, {}^{5}X^{0}, R_{44}, R_{55}, R_{25}, R_{45} \right),$$

где $R_{24} = \left\{ R_{24}^{0}, R_{24}^{\text{п}} \right\}$, $R_{25} = \left\{ R_{25}^{0}, R_{25}^{\text{п}} \right\}$, … , $R_{45} = \left\{ R_{45}^{0}, R_{45}^{\text{п}} \right\}$. Остальные отношения, не противоречащие смыслу: R_{44} — мера-мера, например километр больше метра, кВ больше в, R_{55} — значение-значение, например 10 > 2, высоковольтный больше низковольтный, будем учитывать, задавая R_{22}.

Тогда дадим определения О39 — О41:

О39 $\left({}^{2}X^{0}\, R_{24}^{0}\, {}^{4}X^{0} = \left\{ {}^{2}X^{0}\ {}^{1}R_{24}^{0}\ {}^{4}X^{0} \right\} \right)$,

О40 $\left({}^{2}X^{0}\, R_{25}^{0}\, {}^{5}X^{0} = \left\{ {}^{2}X^{0}\ {}^{1}R_{25}^{0}\ {}^{5}X^{0} \right\} \right)$,

О41 $\left({}^{4}X^{0}\, R_{45}^{0}\, {}^{5}X^{0} = \left\{ {}^{2}X^{0}\ {}^{1}R_{24}^{0}\ {}^{4}X^{0} \right\} \right)$.

Построим граф G_3, вершины которого обозначены множествами ${}^{1}X^{0}$, ${}^{3}X^{0}$, ${}^{6}X^{0}$, ${}^{7}X^{0}$

$$G_3 = \left({}^{1}X^{0}, {}^{3}X^{0}, {}^{6}X^{0}, {}^{7}X^{0}, R_{66}, R_{77}, R_{16}, R_{37} \right),$$

где $R_{66} = \left\{ R_{66}^{0}, R_{66}^{\text{п}} \right\}$, $R_{77} = \left\{ R_{77}^{0}, R_{77}^{\text{п}} \right\}$, $R_{16} = \left\{ R_{16}^{0}, R_{16}^{\text{п}} \right\}$, $R_{37} = \left\{ R_{37}^{0}, R_{37}^{\text{п}} \right\}$. Тогда ребра определят систему отношений, из которых выделим: R_{66} — состояние-состояние, R_{77} — оценка-оценка, R_{16} — ресурс-состояние, R_{37} — действие-оценка.

Тогда дадим определения О42 — О45:

О42 $\left({}^{1}X^{0}\, R_{16}^{0}\, {}^{6}X^{0} = \left\{ {}^{1}X^{0}\ {}^{1}R_{16}^{0}\ {}^{6}X^{0} \right\} \right)$,

О43 $\left({}^{3}X^{0}\, R_{37}^{0}\, {}^{7}X^{0} = \left\{ {}^{3}X^{0}\ {}^{1}R_{37}^{0}\ {}^{7}X^{0} \right\} \right)$,

О44 $\left({}^{6}X^{0} R_{66}^{0}\, {}^{6}X^{0} = \left\{ {}^{6}X^{0}\ {}^{4}R_{66}^{0}\ {}^{6}X^{0},\ {}^{6}X^{0}\ {}^{6}R_{66}^{0}\ {}^{6}X^{0} \right\} \right)$,

О45 $\left({}^{7}X^{0}\, R_{77}^{0}\, {}^{7}X^{0} = \left\{ {}^{7}X^{0}\ {}^{7}R_{77}^{0}\ {}^{7}X^{0},\ {}^{7}X^{0}\ {}^{2}R_{77}^{0}\ {}^{7}X^{0} \right\} \right)$.

Установим взаимнооднозначное соответствие определений О30 — О45 и предикатов: $\rho^1_{20}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{11}, $\rho^1_{21}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{22}, $\rho^1_{22}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{33}, $\rho^1_{23}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{12}, $\rho^1_{24}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{21}, $\rho^1_{25}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{13}, $\rho^1_{26}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{31}, $\rho^1_{27}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{23}, $\rho^1_{28}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{32}, $\rho^1_{29}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{24}, $\rho^1_{30}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{25}, $\rho^1_{31}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{45}, $\rho^1_{32}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{16}, $\rho^1_{33}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{37}, $\rho^1_{34}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{66}, $\rho^1_{35}\left(r^0\right)$ — быть R^0_{77}. Тогда, задав на R^0 введенные предикаты:

$$M_4 =< R^0,\ \rho^1_i\left(r^0\right)|\ i \in \overline{20;31} >,$$

получим разбиение R^0 на подмножества R^0_{11}, R^0_{22}, … , R^0_{23}, R^0_{24}, R^0_{25}, R^0_{45}, R^0_{16}, R^0_{37}, R^0_{66}, R^0_{77}. При этом должны выполняться $R^0 = \bigcup\limits_{ij} R^0_{ij}$, при $i \in \overline{1;7}$, $j \in \overline{1;7}$, а в общем случае $\varnothing = \bigcup\left(R^0_{ij} \bigcap R^0_{km}\right)$, при $i \neq k$, $j \neq m$ и $i,k \in \overline{1;7}$, $j,m \in \overline{1;7}$.

Пример: R^0_{11}= {быть, в, рядом, часть, иметь состав}, R^0_{22}={быть, больше, меньше, равным}, R^0_{33}={быть одновременно, раньше}, R^0_{31} ={иметь, субъект, объект, средство}, R^0_{13}={быть, условие, объект, средство, место}, R^0_{32} ={иметь, продолжительность, результат}. Отношения из классов R^0_{12}, R^0_{21}, R^0_{23}, R^0_{24}, R^0_{25}, R^0_{45}, R^0_{16}, R^0_{37} включают слова быть, иметь, а также введенные в M_1 и M_2 понятия «параметр», «характеристика», «имя», «мера» и т. п.

После определения базовых отношений R^0_{ij} перейдем к рассмотрению производных $R^{\text{п}}_{ij}$.

Назовем языком первого уровня L_1 (X^0, R^0_{ij}, $\mathcal{P}^1$) = { $r^{\text{п}}_{ij_l}$ } — множество производных отношений $\{ r^{\text{п}}_{11_1}, r^{\text{п}}_{11_2}, \ldots, r^{\text{п}}_{11_\delta}, r^{\text{п}}_{22_1}, r^{\text{п}}_{22_2}, \ldots, r^{\text{п}}_{22_\varepsilon}, \ldots, r^{\text{п}}_{45_1}, r^{\text{п}}_{45_2}, \ldots, r^{\text{п}}_{45_\xi} \}$, равное $R^{\text{п}}_{ij}$ выводимых из целевых отношений r^0_1 — иметь и r^0_2 — быть по правилам $\mathcal{P}^1 = \left\{ p^1_1,\ p^1_2 \right\}$.

Правило p^1_1, которое зададим индуктивно, применяется к классам R^0_{11}, R^0_{22}, R^0_{33}: 1) если r^0_k — целевое отношение, а $r^{\text{п}}_{ij_m} \in R^0_{ij}|\ i = j = \{1,2,3\}$, то $r^{\text{п}}_{ij_l} = r^0_k r^0_{ij_m} |\ k \in \overline{1;2}$ — производное отношение в $R^{\text{п}}_{ij}$; 2) если $r^{\text{п}}_{ij_l}$ — производное отношение, то $r^{\text{п}}_{ij_l} r^0_{ij_m}$ — также производное отношение; 3) никаких других производных отношений в $R^{\text{п}}_{ij}$ нет.

Правило p_2^1 применяется к классам R_{12}^0, R_{21}^0, R_{23}^0, R_{32}^0, R_{24}^0, R_{25}^0, R_{45}^0, R_{16}^0, R_{37}^0, ${}^{211}X^0$, ${}^{212}X^0$: 1) если r_k^0 — целевое отношение, а $r_{ij_m}^0 \in R_{ij}^0 \mid i = \{1,2,4\}, j \in \overline{1;5},\ i \neq j$, ${}^{21n}x^0 \in {}^{21n}X^0 \mid n = \{1,2\}$, то $r_{ij_l}^{\text{п}} = r_k^0 r_{ij_m}^0 \mid k \in \{1,2\}$ или $r_{ij_l}^{\text{п}} = r_k^0\ {}^{21n}x^0$ — производное отношение в $R_{ij}^{\text{п}}$; 2) никаких других производных отношений в $R_{ij}^{\text{п}}$ нет.

3. rkx-кодирование семантики отношений и связей когнитивного и оперативного образов в предикативной модели языка профессиональной деятельности

Таким образом, выявлены базовые и производные отношения на ${}^1X^0$, ${}^2X^0$, …, ${}^7X^0$ и можно получить граф $G = G_1 \cup G_2 \cup G_3$. Модели M_1 — M_4 определяют содержание компонент G, который, в свою очередь, задает структуры цепочек ЯОСС. Чтобы показать это, дополним систему M_1 — M_4 еще одной моделью:

$$M_5 = < \hat{X}, \{\rho_{i,j}^1({}^v x^0)\}, \{\rho_{i,j}^2({}^d x^0, {}^\varepsilon x^0)\}, \{\rho_{i,j}^3({}^g x^0, {}^q x^0, {}^h x^0)\}, \mid i = \{12,\ldots,18\}, j = \{1,2,3,20,\ldots,31\} >,$$

где

$$\rho_{i,j}^1({}^v x^0) = \begin{cases} u, \text{ если } r_{ij_l}^{\text{п}}\ {}^v x^0, \\ л, \text{ в противном случае}, \end{cases}$$

$$\rho_{i,j}^2({}^d x^0, {}^\varepsilon x^0) = \begin{cases} u, \text{ если } {}^d x^0 r_{ij_m}^n\ {}^\varepsilon x^0, \\ л, \text{ в противном случае}, \end{cases}$$

$$\rho_{i,j}^3({}^g x^0, {}^q x^0, {}^h x^0) = \begin{cases} u, \text{ если } {}^g x^0\ r_{ij_k}^n\ {}^q x^0\ \ r_{ij_k}^n\ {}^h x^0, \\ л, \text{ в противном случае}, \end{cases}$$

$$\hat{X} = X^0 \cup \varnothing; r_{ij_l}^n, r_{ij_m}^n, r_{ij_k}^n \in R_{ij}^n; {}^f x^0 \in {}^f X^0 \mid f = v,d,\varepsilon,g,q,h.$$

Если задать на сигнатуре

$$P_5 = \left\{ \left\{\rho_{i,j}^1({}^v x^0)\right\}, \left\{\rho_{i,j}^2({}^d x^0, {}^\varepsilon x^0)\right\}, \left\{\rho_{i,j}^3({}^g x^0, {}^q x^0, {}^h x^0)\right\} \right\}$$

операцию конкатенации "$\circ$", то структуры цепочек, обозначающих ресурс, свойство, действие, связь ресурсов и действий, определены соответственно выражениями (аксиомами) А1 — А5:

А1. $\rho_{11,1}^1({}^1 x_a^0) \circ \rho_{11,20}^2({}^1 x_a^0, {}^2 x_b^0) \circ \rho_{11,22}^2({}^1 x_a^0, {}^3 x_c^0) \circ \rho_{15,17}^2({}^1 x_a^0, {}^1 x_d^0)$,

A2. $\rho^1_{11,2}\left({}^2x^0_a\right)\circ\rho^2_{11,21}\left({}^2x^0_a,\ {}^1x^0_b\right)\circ\rho^2_{11,26}\left({}^2x^0_a,\ {}^3x^0_c\right)\circ\rho^2_{11,26}\left({}^2x^0_a,\ {}^4x^0_d\right)\circ$
$\rho^2_{11,27}\left({}^2x^0_a,\ {}^5x^0_c\right)\circ\rho^2_{15,18}\left({}^2x^0_a,\ {}^2x^0_t\right)$,

A3. $\rho^2_{11,3}\left({}^3x^0_a\right)\circ\rho^2_{11,25}\left({}^3x^0_a,\ {}^2x^0_b\right)\circ\rho^2_{11,23}\left({}^3x^0_a,\ {}^1x^0_c\right)\circ\rho^2_{15,19}\left({}^3x^0_a,\ {}^3x^0_d\right)$,

A4. $\rho^2_{13,1}\left({}^1x^0_a,\ {}^1x^0_b\right)\circ\rho^3_{13,1}\left({}^1x^0_a,\ {}^1x^0_b,\ {}^2x^0_c\right)$,

A5. $\rho^2_{16,3}\left({}^3x^0_a,\ {}^3x^0_b\right)\circ\rho^2_{14,3}\left({}^3x^0_a,\ {}^3x^0_b\right)\circ\rho^3_{14,3}\left({}^3x^0_a,\ {}^3x^0_b,\ {}^2x^0_c\right)$, и только ими.

Если A1 — A3 не требуют пояснений, то в A4 — A5 двуместные предикаты определяют качественные пространственные отношения, а трехместные — количественные пространственные и временные. Рассмотренная система M_1 — M_5 — семантическая, предикативная модель выражений ЯПД и, с одной стороны, позволяет их анализировать (M_1 — M_4), а с другой — синтезировать цепочки ЯОСС.

Понятия ${}^1x^0$, ${}^3x^0$ обозначают в ЯОСС классы ресурсов и действий, без учета каких-либо отличительных особенностей последних и соответствуют в основном словам ЯПД. Моделирование ресурсов и действий состоит в конструировании высказываний-цепочек, обозначающих элементы классов или подклассы ресурсов и действий, соответствующих словосочетаниям ЯПД и состоящих из понятий ${}^1x^0$, ${}^2x^0,\ldots,\ {}^7x^0$ и производных отношений $r^{\text{п}}_{ij_l}$. Обозначение — это не только замещение реалии знаком в ЯОСС, но и указание, когда всякой цепочке можно сопоставить ресурс, действие или их связи. Обозначение простых и сложных ресурсов, свойств, действий в ЯОСС выполняется на втором и третьем уровнях соответственно. Языком второго уровня назовем

$$L_2\left(X^0,\ {}^1R^{\text{п}}_{ij},\ (,),\ \mathcal{P}^2\right)=\left\{{}^ix_k\right\}$$

— множество производных понятий
$\left\{{}^1x_1,\ {}^1x_2,\ldots,\ {}^1x_\eta,\ {}^2x_1,\ {}^2x_2,\ldots,\ {}^2x_\varphi,\ {}^3x_1,\ {}^3x_2\ \ ,\ldots,\ {}^3x_\psi\right\}=X$, получаемых из X^0, ${}^1R^{\text{п}}_{ij}$, $(\ ,)$ по правилам $\mathcal{P}^2$ и обозначающих простые ресурсы, свойства и действия.

Рассмотрение правил $\mathcal{P}^2=\left\{p^2_1,p^2_2,p^2_3\right\}$, интерпретирующих аксиомы A1 — A3, соответственно, удобнее начать с p^2_2. Обозначения: ОП — основной, ДП — дополнительный признаки соответственно, ПП — производное понятие.

Правило p^2_2.

1) Если $r^n_{22_l}\in{}^1R^n_{22}$, а ${}^2x^0_m\in{}^2X^0$, то $r^{\text{п}}_{22_l}\ {}^2x^0_m$ — ОП в ${}^2X$.

2) Если $r^n_{ij_l} \in {}^1R^n_{21}, {}^1R^n_{23}, {}^1R^n_{24}, {}^1R^n_{25}$, а $i=2, j=\{1,3,4,5\}$, ${}^jA = {}^jx^0_k$, ${}^jA = {}^jA\,{}^jx^0_n$, то $\left({}^2x^0_k r^{\text{п}}_{ij_l}\,{}^jA\right)$ или $r^{\text{п}}_{ij_l}\left({}^jA\right)$ — ДП в ${}^2X$.

3) Если ${}^2B$ – ОП, а ${}^2C$ – ДП, то ${}^2B\,{}^2C$ – ПП в ${}^2X$.

4) то ${}^2D\,{}^2C$ – ПП в ${}^2X$;

5) Никаких других ПП в ${}^2X$ нет.

Правило p^2_1.

1) Если $r^{\text{п}}_{11_l} \in {}^1R^{\text{п}}_{11}$, а ${}^1x^0_m \in {}^1X^0$, то $r^{\text{п}}_{11_l}\,{}^1x^0_m$ — ОП в ${}^1X$.

2) Если $r^{\text{п}}_{ij_f} \in {}^1R^{\text{п}}_{12}, {}^1R^{\text{п}}_{13}$, а $i=1, j=\{2,3\}$, ${}^jA = {}^jx^0_n$, ${}^jA = {}^jx_k$, ${}^jA = {}^jA\,{}^jx^0_a$, ${}^jA = {}^jA\,{}^jx_b$, то $\left({}^1x^0_k r^{\text{п}}_{ij_f}\,{}^jA\right)$ или $r^{\text{п}}_{ij_f}\left({}^jA\right)$ — ДП в ${}^1X$.

3) Если ${}^1B$ – ОП, а ${}^1C$ – ДП, то ${}^1B\,{}^1C$ – ПП в ${}^1X$.

4) Если ${}^jD$ – ПП в ${}^2X$ или ${}^3X$, то $\left({}^1x^0_m r^n_{ij_f}\left({}^jD\right)\right)$ – ДП в ${}^1X$.

5) Если ${}^1D$ – ПП, а ${}^1C$ – ДП, то ${}^1D\,{}^1C$ – ПП в ${}^1X$.

6) Никаких других ПП в ${}^1X$ нет.

Правило p^2_3.

1) Если $r^n_{33_l} \in {}^1R^n_{33}, a\,{}^3x^0_m \in {}^3X^0$, то $r^n_{33_l}\,{}^3x^0_m$ – ОП в ${}^3X$.

2) Если $r^n_{ij_f} \in {}^1R^n_{31}, {}^1R^n_{32}\, a\, i=3, j=\{1,2\}$, ${}^jA = {}^jx^0_n$, ${}^jA = {}^jx_k$, ${}^jA = {}^jA\,{}^jx^0_a$, ${}^jA = {}^jA\,{}^jx_b$, то $\left({}^3x^0_m r^n_{ij_f}\,{}^jA\right)$ или $r^n_{ij_f}\left({}^jA\right)$ – ДП в ${}^3X$;

3) Если ${}^3B$ – ОП, а ${}^3C$ – ДП, то ${}^3B\,{}^3C$ – ПП в L_2.

4) Если ${}^jD$ – ПП в ${}^1X$ или ${}^2X$, то $\left({}^3x^0_m r^{\text{п}}_{ij_f}\left({}^jD\right)\right)$ – ДП в ${}^3X$.

5) Если ${}^3D$ – ПП, а ${}^3C$ – ДП, то ${}^3D\,{}^3C$ – ПП в ${}^3X$.

6) Никаких других ПП в ${}^3X$ нет.

Наконец, определим производное понятие языка второго уровня L_2. Производное понятие L_2 есть ПП в ${}^1X$, или ПП в ${}^2X$, или ПП в ${}^3X$. Никаких других ПП в L_2 нет.

Из определения L_2 и правил $\mathcal{P}^2$ видно, что производное понятие, с одной строны, есть один символ — ${}^1x_k$, а с другой — цепочка признаков. Если между ${}^1x_1, {}^1x_2, \ldots, {}^1x_\eta, {}^2x_1, {}^2x_2, \ldots, {}^2x_\varphi, {}^3x_1, {}^3x_2, \ldots, {}^3x_\psi$ и цепочками ${}^jD_k \mid k=\{1,2,\ldots,\eta,\ldots,\varphi,\ldots,\psi\}$ установить взаимнооднозначное соответствие ${}^1x_k = {}^jD_k$, то ${}^1x_k$ — определяемое понятие, а ${}^jD_k$ — его определение. Такая запись, когда производное понятие представляется в единстве определяемого и определения используется в тождественных преобразованиях.

Языком третьего уровня назовем

$$L_3\left(X^0, X\ ,\ {}^5R^{\text{п}}_{ij}, (,),\ \mathcal{P}^3\right) = \left\{\ {}^i x^n_k\right\}$$

— множество ПП $\{\ {}^1x^n_1,\ {}^1x^n_2,\ldots,\ {}^1x^n_\eta,\ {}^2x^n_1,\ {}^2x^n_2,\ldots,\ {}^2x^n_\varphi,\ {}^3x^n_1,\ {}^3x^n_2,\ldots,\ {}^3x^n_\psi\ \} = X^n$, получаемых из $X^0, X\ ,\ {}^5R^{\text{п}}_{ij}, (,)$ по правилу $p^3_1 \in \mathcal{P}^3$, общему для свойств, ресурсов и действий.

Правило p^3_1.

1) Если $r^n_{ij_l} \in {}^5R^n_{ij}$, а $i = j = \{1,3\}$, ${}^iA = {}^ix^0_f$, ${}^iA = {}^ix_k$, ${}^iA = {}^iA\ {}^jx^0_a$, ${}^iA = {}^iA\ {}^jx^0_b$, то $r^{\text{п}}_{ij_l}\left({}^iA\right)$ — признак в ${}^iX^n$ (в общем случае может быть ${}^iA = \varnothing$).

2) Если ${}^iC$ – признак в ${}^iX^n$, а ${}^iD$ – ДП в ${}^iX^n$, то ${}^iD\ {}^iC$ – ПП в ${}^iX^n$.

3) Никаких других ПП в ${}^iX^n$ нет.

По существу, правило p^3_1 языка L_3 упорядочивает производные понятия L_2 по отношению включения (иметь в составе или быть частью) и формирует иерархическую структуру. Таким образом, если ${}^1x^n_k$ конкретны, т. е. каждое из них соответствует единственному ресурсу, то ${}^3x^n_k$ — абстракция, обозначающая план действий и определяющая его свойства и перечень свойств ресурсов, привлекаемых для осуществления. Если этот перечень содержит именное свойство, план действия становится реальностью, что, в свою очередь, приводит к установлению отношений $r^{\text{п}}_{ij_l} \in {}^3R^{\text{п}}_{ij}$ на ресурсах и формирует ситуацию ОУ.

Моделирование пространственной, производственной структур, Р- и О-ситуаций выполняется на четвертом уровне ЯОСС. Языком четвертого уровня назовем

$$L_4\left(X^0, X^n, \{{}^fR^{\text{п}}_{ij}\}, (,),\ \mathcal{P}^4\right) = \left\{\ {}^i\pi_k\right\}$$

— множество ПП $\{\ {}^1\pi_1,\ {}^1\pi_2,\ldots,\ {}^1\pi_\lambda,\ {}^3\pi_1,\ {}^3\pi_2,\ldots,\ {}^3\pi_\nu\ \} = \Pi$, получаемых из $X^0, X^n,\ {}^3R^{\text{п}}_{ij},\ {}^4R^{\text{п}}_{ij},\ {}^6R^{\text{п}}_{ij}, (,)$ по правилу $p^4_1 \in \mathcal{P}^4$.

Правило p^4_1.

1) Если $r^n_{ij_l} \in {}^3R^n_{11}$, а ${}^1D_a$ и ${}^1D_m$ – ПП в ${}^1X^n$, то $\left({}^1D_a\ r^n_{11_l}\left({}^1D_m\right)\right)$ – ПП в ${}^1\Pi \subset \Pi$.

2) Если $r^n_{33_l} \in {}^4R^n_{33},\ {}^6R^n_{33}$, а ${}^3D_a$ и ${}^3D_m$ – ПП в ${}^3X^n$, то $\left({}^3D_a\ r^n_{33_l}\left({}^3D_m\right)\right)$ – ПП в ${}^3\Pi \subset \Pi$.

3) Если ${}^i\pi_k$ и ${}^i\pi_m$ – ПП в ${}^i\Pi$, то $\pi_k\ \ \pi_m$ – ПП в ${}^i\Pi$.

4) Если $r^n_{11_l} \in {}^3R^n_{11}, r^n_{33_l} \in {}^4R^n_{33},\ {}^6R^n_{33},\ {}^3D_k$ и ${}^3D_m$ – ПП в ${}^1X^n, {}^3X^n$, то $r^n_{11_l}\ {}^1D_k$ и $r^n_{33_l}\ {}^3D_m$ — признаки в ${}^1\Pi, {}^3\Pi$.

5) Если ${}^{i}A$ и ${}^{i}B$ — признаки, то ${}^{i}A\,{}^{i}B$ также признак в ${}^{i}\Pi$.

6) Если ${}^{i}D_b$ – ПП в ${}^{i}X^n$, а ${}^{i}A$ — признак в ${}^{i}\Pi$, то$\left({}^{i}D_b\ \left({}^{i}A\right)\right)$ – ПП в ${}^{i}\Pi$.

7) Никаких других ПП в П нет.

Очевидно, что в ${}^{1}\Pi$ может быть описана как пространственная структура ОУ ${}^{1}\Pi_{\text{С}} \subset {}^{1}\Pi$, так и текущая Р-ситуация ${}^{1}\Pi_{\text{Р}} \subset {}^{1}\Pi$, аналогично в ${}^{3}\Pi$ производственной структуре соответствует ${}^{3}\Pi_{\text{С}} \subset {}^{3}\Pi$, а О-ситуации ${}^{3}\Pi_{\text{О}} \subset {}^{3}\Pi$.

Формализм языка пятого уровня позволяет определить понятие «когнитивный образ состояния объекта управления». Введем пятый уровень ЯОСС

$$L_5\left(\Pi,\ \mathcal{P}^5\right)=\left\{\ s_k\right\}$$

как множество ПП — КО состояний $\{s_1, s_2, \ldots, s_\omega\} = S$, формально выводимых по правилу $p_1^5 \in \mathcal{P}^5$. Прежде чем дать индуктивное определение КО состояния, введем правило подстановки: если ${}^{1}x_m = {}^{1}D_m$, ${}^{3}x_l = {}^{3}D_l$ — производные понятия в ${}^{1}X^n$, ${}^{3}X^n$ соответственно и ${}^{1}x_f^0 \in {}^{1}D_m$, ${}^{3}D_l$, то подстановкой назовем замену ${}^{1}x_f^0$ в ${}^{3}D_l$ на ${}^{1}x_m$ или ${}^{1}D_m$. После подстановки план действия ${}^{3}x_l = {}^{3}D_l$ становится реальностью ${}^{3}\hat{x}_l = {}^{3}\hat{D}_l$.

Правило p_1^5:

1) Если ${}^{1}\Pi_p \subset {}^{1}\Pi$, ${}^{3}\hat{\Pi}_o\,{}^{3}\Pi$, $\{{}^{3}x_o\,{}^{3}D_o\}$ — подмножества производных понятий в ${}^{1}X^n$ и ${}^{3}X^n$ соответственно, а ${}^{212}x^n = {}^{212}D\,|\left(r^{\text{п}}_{22_3}\ {}^{212}x^0_\mu\ r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x^0_\omega\right)\right) \in$ $\in {}^{212}D$, ${}^{212}x^0_\mu$ — режим, ${}^{5}x^0_\omega \in \{\text{нормальный, аварийный}\}$ — ПП в ${}^{212}X^0$, то ${}^{3}\hat{\Pi}_{\text{О}}\,{}^{1}\Pi_{\text{Р}}\,{}^{212}x^n_\mu$, где $\left\{{}^{3}\hat{x}_{\text{О}} = {}^{3}\hat{D}_{\text{О}}\right\}$ получены в результате подстановки, есть ПП в S.

2) Никаких других ПП в S нет.

Рассмотрим пример высказывания $s \in S$. Допустим, что в момент времени t одновременно выполняются два действия

$${}^{3}x_1^1 = r^{\text{п}}_{33_1}\,{}^{3}x_1^0 r^{\text{п}}_{31_1}\left({}^{1}x_1^0\right) r^{\text{п}}_{31_2}\left({}^{1}x_2^0\right) r^{\text{п}}_{31_3}\left({}^{2}x_3^0\right),\quad {}^{3}x_2^1 = r^{\text{п}}_{33_1}\,{}^{3}x_2^0 r^{\text{п}}_{31_1}\left({}^{1}x_4^0\right) r^{\text{п}}_{31_2}\left({}^{1}x_5^0\right),$$

тогда ${}^{3}\pi_{\text{О}} = \left({}^{3}x_1^1\ r^{\text{п}}_{33_2}\ {}^{3}x_2^1\right)$. Если для осуществления действий привлечены ресурсы

$${}^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\,{}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_1}\,{}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_1^0\right)\right) r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_2}\,{}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{24_1}\left({}^{4}x_1^0\right) r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_2^0\right)\right),$$

$${}^{1}x_2^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\,{}^{1}x_2^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_1}\,{}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_3^0\right)\right) r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_2}\,{}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{24_1}\left({}^{4}x_1^0\right) r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_4^0\right)\right),$$

$$^{1}x_3^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_3^0 r^{\text{п}}_{12_1}(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_5^0\right))r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_3}\ {}^{212}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_6^0\right)\right),$$

$$^{1}x_4^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_4^0 r^{\text{п}}_{12_1}(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_7^0\right))r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_3}\ {}^{212}x_2^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_8^0\right)\right),$$

$$^{1}x_5^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_4^0 r^{\text{п}}_{12_1}(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_2^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_9^0\right))r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_3}\ {}^{212}x_3^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_{10}^0\right)\right),$$

то в результате подстановки имеем

$$^{3}\hat{x}_1^1 = r^{\text{п}}_{33_1}\ {}^{3}x_1^0 r^{\text{п}}_{31_1}\left({}^{1}x_1^1\right)r^{\text{п}}_{31_2}\left({}^{1}x_2^1\right)r^{\text{п}}_{31_3}\left({}^{2}x_3^1\right),$$

$$^{3}\hat{x}_2^1 = r^{n}_{33_1}\ {}^{3}x_2^0 r^{n}_{31_1}\left({}^{1}x_4^1\right)r^{n}_{31_2}\left({}^{1}x_5^1\right),\ {}^{3}\hat{\pi}_O = {}^{3}\hat{x}_1^1 r^{n}_{33_2}\ {}^{3}\hat{x}_2^1\ .$$

Полученная О-ситуация формирует некоторую Р-ситуацию $^{1}\Pi_P =$ $=\left({}^{1}x_1^1 r^{n}_{11_2}\ {}^{1}x_2^1\right)\left({}^{1}x_3^1 r^{n}_{11_3}\ {}^{1}x_4^1\right)\left({}^{1}x_3^1 r^{n}_{11_4}\ {}^{1}x_5^1\right)$, что позволяет вычислить значение $^{5}x_\omega^0$ характеристики режим $^{212}x_\mu^n$.

Тогда когнитивный образ состояния ОУ есть

$$s(t) = {}^{3}\hat{\Pi}_O\ {}^{1}\Pi_P\left({}^{212}x_\mu^0 r^{n}_{25_1}\left({}^{5}x_\omega^0\right)\right) = {}^{3}\hat{\pi}_O\ {}^{1}\Pi_P =$$

$$= ({}^{3}\hat{x}_1^1 r^{n}_{33_2}\ ({}^{\hat{x}_2^1}_{3}\left({}^{1}x_1^1 r^{n}_{11_2}\ {}^{1}x_2^1\right)\left({}^{1}x_3^1 r^{n}_{11_3}\ {}^{1}x_4^1\right)\left({}^{1}x_3^1 r^{n}_{11_4}\ {}^{1}x_5^1\right)\left({}^{212}x_\mu^0 r^{n}_{25_1}\left({}^{5}x_\omega^0\right)\right).$$

Итак, высказывание о когнитивном образе состояния включает: $^{3}\hat{\Pi}_{\text{O}}$ — ПП «О-ситуацию» по отношениям действие-действие, $^{1}\Pi_{\text{P}}$ — ПП «Р-ситуацию» по отношениям ресурс-ресурс, $\left({}^{212}x_\mu^0 r^{\text{п}}_{25_1}\left({}^{5}x_\omega^0\right)\right)$ — характеристику режим $^{212}x_\mu^0$ с вычисленным значением $^{5}x_\omega^0$ по отношениям ресурс-свойство, для ресурсов Р-ситуации. Если учитывать, что $^{3}\pi_{\text{O}}$ рассматривается в контексте производственной структуры, то, зная $s(t_0)$, можно прогнозировать поведение ОУ в следующий t_1 момент времени, т. е. $s(t_0) \longrightarrow s(t_1)$, где $t_1 > t_0$.

4. Грамматика тождественных преобразований и функциональной деформации когнитивного образа состояния

П1. Если ПП в ^{i}X или $^{i}X^n$ имеет ДП вида $\left({}^{i}x_m^0 r^{\text{п}}_{ij_l}\ {}^{j}A\right)|\ i \neq j$, то его можно преобразовать к виду $r^{\text{п}}_{ij_l}\left({}^{j}A\right)$ и, наоборот, если ПП содержит ОП $r^{\text{п}}_{ij_l}\ {}^{i}x_m^0$ и ДП $r^{\text{п}}_{ij_k}\left({}^{j}A\right)$, то последний может быть изменен следующим образом $\left({}^{i}x_m^0 r^{\text{п}}_{ij_k}\ {}^{j}A\right)$. Например,

$$^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_1^0\,(\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_1^0\left({}^{213}x_1^0\left({}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_1^0\right)\right)\right)$$

$$(\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}(r^{\text{п}}_{22_2}\ {}^{211}x_1^0\left({}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{24_1}\ {}^{4}x_1^0\right)\left({}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_2^0\right)))$$

можно заменить на

$$^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}((\left(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_1^0\right)r^{\text{п}}_{12_1}\left(r^{\text{п}}_{22_2}\ {}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{24_1}\ {}^{4}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_2^0\right).$$

П2. Если ДП вида $r^{\text{п}}_{ij_l}\left({}^{j}A\right)$ содержат одно и то же отношение, то его можно вынести за скобку (справедливо и обратное):

$$^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left(\left(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_1^0\right)\left(r^{\text{п}}_{22_2}\ {}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{24_1}\ {}^{4}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_2^0\right)\right).$$

П3. Если в ПП ${}^{i}x_m^n$ есть цепочка определяющих понятий (^{j}D) и $i \neq j$, то можно ввести ${}^{j}x_k = \left({}^{j}D\right)$ и заменить $\left({}^{j}D\right)$ на ${}^{j}x_k$. Справедливо и обратное.

Например, пусть $^{2}x_1^1 = \left(r^{\text{п}}_{22_1}\ {}^{213}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_1^0\right)$. Если введем

$$^{2}x_2^1 = \left(r^{\text{п}}_{22_2}\ {}^{211}x_1^0 r^{\text{п}}_{24_1}\ {}^{4}x_1^0 r^{\text{п}}_{25_1}\ {}^{5}x_2^0\right),\ \text{то}\ {}^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_1^1\ {}^{2}x_2^1\right).$$

П4. Если в ${}^{i}x_m^n$ есть вспомогательный признак $r^{\text{п}}_{ij_l}\left({}^{j}A\right)$, где $r^{\text{п}}_{ij_l} \in {}^{5}R^{\text{п}}_{ij}$, а в ${}^{j}A$ — цепочка определяющих понятий ${}^{j}D$, то можно ввести ${}^{j}x_k = {}^{j}D$ и заменить ${}^{j}D$ на ${}^{j}x_k$, а ${}^{j}x_m^n$ на ${}^{j}x_m^{n+1}$. Справедливо и обратное.

Например, пусть

$$^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_1^1\ {}^{2}x_2^1\ {}^{2}x_3^1\right)r^{\text{п}}_{11_2}\left(r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_2^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_3^1\ {}^{2}x_4^1\ {}^{2}x_5^1\right)r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_3^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_6^1\ {}^{2}x_7^1\right)\right),$$

тогда можно ввести

$$^{1}x_1^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_2^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_3^1\ {}^{2}x_4^1\ {}^{2}x_7^1\right),\ {}^{1}x_2^1 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_3^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_6^1\ {}^{2}x_7^1\right),$$

$$^{1}x_1^2 = r^{\text{п}}_{11_1}\ {}^{1}x_1^0 r^{\text{п}}_{12_1}\left({}^{2}x_1^1\ {}^{2}x_2^1\ {}^{2}x_3^1\right)r^{\text{п}}_{11_2}\left({}^{1}x_1^1\ {}^{1}x_2^1\right).$$

П5. Если $r^{\text{п}}_{ij_l}$ симметрично, т.е. $r^{\text{п}}_{ij_l} = 1/r^{\text{п}}_{ij_l}$, то $({}^{1}D_k\ r^{\text{п}}_{ij_l}\ ({}^{j}D_m)) \in {}^{i}\Pi$ можно заменить на $({}^{1}D_m\ r^{\text{п}}_{ij_l}\ ({}^{j}D_k))$. Если $r^{\text{п}}_{ij_l}$ ассимметрично, т.е. из двух соотношений $({}^{1}D_k\ r^{\text{п}}_{ij_l}\ {}^{j}D_m)$, $({}^{1}D_m\ r^{\text{п}}_{ij_l}\ {}^{j}D_k)$ по меньшей мере одно не выполнено, а $\overline{r}^{\text{п}}_{ij_l} = 1/r^{\text{п}}_{ij_l}$, то $({}^{1}D_m\ \overline{r}^{\text{п}}_{ij_l}\ ({}^{j}D_k)) \in {}^{i}\Pi$. Например, если имеем $\left({}^{1}x_1^1 r^{\text{п}}_{11_5}\ ({}^{1}x_2^1)\right)\left({}^{1}x_3^1 r^{\text{п}}_{11_6}\ ({}^{1}x_4^1\right) \in {}^{1}\Pi$ и $r^{\text{п}}_{11_5}$ — симметрично, а $r^{\text{п}}_{11_6}$ — асимметрично, то $\left({}^{1}x_2^1 r^{\text{п}}_{11_5}\ ({}^{1}x_1^1)\right)\left({}^{1}x_4^1 \overline{r}^{\text{п}}_{11_6}\ ({}^{1}x_3^1\right) \in {}^{1}\Pi$.

П6. Если $({}^{i}D_n \; r^{\text{п}}_{ij_l}({}^{i}D_m)),\ ({}^{i}D_n \; r^{\text{п}}_{ij_l}({}^{i}D_f)) \in {}^{i}\Pi,$ то вместо них можно записать $({}^{i}D_n \; r^{\text{п}}_{ij_l}({}^{i}D_m \; {}^{i}D_f)) \in {}^{i}\Pi.$ Справедливо и обратное. Например,

$$\left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5}({}^{1}x^{1}_{2})\right)\left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5}({}^{1}x^{1}_{3})\right)\left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5}({}^{1}x^{1}_{4})\right)$$

преобразуется к виду

$$\left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5}({}^{1}x^{1}_{2} \; {}^{1}x^{1}_{3} \; {}^{1}x^{1}_{4})\right).$$

П7. Если левые полюса ПП в ${}^{i}\Pi$ одинаковы, то их можно вынести за скобку. Справедливо и обратное. Например, $\left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5}({}^{1}x^{1}_{2})\right)\left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_6}({}^{1}x^{1}_{3})\right)$ преобразуется к виду $\left({}^{1}x^{1}_{1}(r^{\text{п}}_{11_5}({}^{1}x^{1}_{2}) r^{\text{п}}_{11_6}({}^{1}x^{1}_{3}))\right).$

Вынесение правых полюсов сводится к П5,7.

Следующая группа правил используется для функциональной деформации семантики энтропийного, когнитивного образа состояния ОУ в регуляритивную, прагматическую информацию лаконичного и локализованного в пространстве оперативного образа. Момент отображения человеку-оператору оперативного образа вычисляется по отношениям ресурс-свойство, исходя из устанавливания «порога» срабатывания. Если пороговое значение достигнуто, то когнитивный образ деформируется в знак оперативного образа. Поскольку по отношениям свойство-ресурс известны те ресурсы из ${}^{1}\Pi_{\text{Р}}$, свойства которых вышли за допустимые интервалы (назовем такие ресурсы аварийными и предположим, что он единственный), то прежде всего редуцируются ${}^{1}x^{n}_{k} = {}^{j}D_k$ удалением из ${}^{j}D_k$ не актуальных признаков ДП (по правилу П8). Затем редуцируется пространственная структура ${}^{1}\Pi_{\text{С}}$ объекта управления до фрагмента, содержащего информацию только о местоположении аварийного ресурса в его естественном ближайшем окружении. Кроме этого, поскольку аварийный ресурс исполняет определенную роль по отношениям ресурс-действие в некотором действии из О-ситуации ${}^{3}\Pi_{\text{О}}$ и поэтому связан по отношениям ресурс-ресурс с другими ресурсами из ${}^{1}\Pi_{\text{Р}}$, то редуцируется и знак ${}^{1}\Pi_{\text{Р}}$ (по правилу П9).

П 8. Если для операции ${}^{3}x^{n}_{f}$ привлекаются ресурсы ${}^{1}\tilde{x}^{n}_{1}, {}^{1}\tilde{x}^{n}_{2}, \ldots, {}^{1}\tilde{x}^{n}_{m}$, то из ${}^{1}\Pi_{\text{с}}$ можно вырезать фрагмент ${}^{1}\tilde{\Pi}_{\text{с}}$, содержащий связи только ${}^{1}\tilde{x}^{n}_{1}, {}^{1}\tilde{x}^{n}_{2}, \ldots, {}^{1}\tilde{x}^{n}_{m}$, между собой. Все остальные связи ${}^{1}\Pi_{\text{с}}$ несущественны. Например, если ${}^{1}\tilde{\Pi}_{\text{с}} = \left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5} \; {}^{1}x^{1}_{2}\right)\left({}^{1}x^{1}_{3} r^{\text{п}}_{11_5} \; {}^{1}x^{1}_{4}\right)$, то с учетом предыдущего примера для ${}^{3}x^{1}_{1}$ получим ${}^{1}\tilde{\Pi}_{\text{с}} = \left({}^{1}x^{1}_{1} r^{\text{п}}_{11_5} \; {}^{1}x^{1}_{2}\right)$. Поскольку ресурсы ${}^{1}x^{n}_{1}, {}^{1}x^{n}_{2}, \ldots, {}^{1}x^{n}_{m}$ формируют Р-ситуацию ${}^{1}\Pi_{\text{р}}$, то очевидно, что именно она определяет вырезанный фрагмент ${}^{1}\tilde{\Pi}_{\text{с}}$.

П9. Всякое ПП когнитивного образа $s(t) = {}^{3}\hat{\Pi}_{O}\,{}^{1}\Pi_{P}\left({}^{212}x_{\mu}^{0} r_{25_1}^{\text{п}}\left({}^{5}x_{\omega}^{0}\right)\right)$ может быть деформировано в ПП оперативного образа ${}^{3}\tilde{\hat{\Pi}}_{O}\,{}^{1}\tilde{\Pi}_{P}\left({}^{212}x_{\mu}^{0} r_{25_1}^{\text{п}}\left({}^{5}x_{\omega}^{0}\right)\right)$, если $\{{}^{1}D_{\text{р}}\}$ фрагментировано по П8.

Заключение

Исследования относятся к области «интеллектуальные системы управления», где важно «узнать», «понять», «запомнить», «оценить ситуацию», «найти решение», «проверить исполнение» и объединяющая методы решения интеллектуальных задач, самостоятельно «в принципе» не решаемых человеком-оператором. Для компьютерной имитации когнитивных образований и усиления человеческого интеллекта в оперативной работе путем дополнения естественных способностей оператора к работе с оперативно-технологической информацией, программно-аппаратными средствами, расширяющими мыслительные процессы человека, предложены когнитивные гибридные интеллектуальные системы. Применительно к ним разработан язык описания отношений и связей для предикативного кодирования словесно-вербальных знаний о ресурсах, свойствах, действиях, структурах, состояниях и режимах, грамматика тождественных преобразований и функциональной деформации семантики энтропийного, когнитивного образа состояния объекта управления в регуляритивную, прагматическую информацию лаконичного и локализованного оперативного образа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00208 и при частичной поддержке проекта №19-07-00250А.

Список литературы

1. *Поспелов Д.А., Пушкин В.Н.* Мышление и автоматы. М. : Советское радио, 1972.

2. *Колесников А.В., Пономарев В.Ф.* Классификация понятий модели статических отношений. Вопросы кибернетики. М. : Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, 1974. Вып. 13. С. 154—159.

3. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. СПб. : СПбГТУ, 2001.

4. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В., Румовская С.Б. и др.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М. : ИПИ РАН, 2011.

5. *Ошанин Д.А.* Предметное действие и оперативный образ: Избранные психологические труды. М. : Московский психолого-социальный институтит ; Воронеж : МОДЭК, 1999.

6. *Ришар Ж. Ф.* Ментальная активность. Понимание, рассуждение, нахождение решений / пер. с фр. Т. А. Ребеко. М. : Институт психологии РАН, 1998.

7. *Микешина Л. А.* Философия науки: Современная эпистемология. Научное знание в динамике культуры. Методология научного исследования : учеб. пособие. М. : Прогресс-Традиция : МПСИ : Флинта, 2005.

8. *Осипов Г. С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами. Основы теории и технологии. М. : Наука. Физматлит, 1997.

9. *Колычев П. М.* Категория соотношения. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2006.

А. В. Колесников[1], С. Б. Румовская[2], Э. В. Ясинский[3]

[1,2,3]БФУ им. И. Канта, [1]Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН, [2]КФ ФИЦ ИУ РАН, Россия

e-mail: [1]avkolesnikov@yandex.ru, [2]sophiyabr@gmail.com, [3]ejasinski96@gmail.com

ПРЕДМЕТНО-ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ В ТЕХНИЧЕСКОЙ СЕМИОТИКЕ И ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ: ИЗОГРАФЫ

Гоббс утверждал, что жизнь и разум могут быть объяснены в терминах механики. Свет приводит в движение наш мозг и нервную систему — вот что значит «видеть». Движение может длиться, как след корабля на воде или как вибрация задетой струны, — и вот что значит «представлять». «Количества» могут складываться и вычитаться в мозгу — и вот что значит «думать».

Стивен Пинкер. Чистый лист. Природа человека. Кто и почему отказывается признавать ее сегодня

Введение

С 1971 г. Калининградская школа искусственного интеллекта, ситуационного управления и семиотического моделирования сложных технических систем Д. А. Поспелова, многомодельных семиотических систем Я. А. Гельфандбейна, А. В. Колесникова и И. Д. Рудинского считает прочным фундаментом своих исследований триадическое, знаковое представление модели мира «вещь-свойство-отношение» А. И. Уемова для задач принятия решений, «запоминания нечто» и выбора «принципа структурирования информации — так, чтобы и запомнить было легко, и вспомнить потом безошибочно» [1]. Актуальность подобных работ применительно к задачам, аппелирующих к функциям сознания, разработкой и применением новых структур данных — «знаковых», подчеркнута в [1].

В [30] предпринята попытка разработки содержательной аксиоматической теории знаков-схем ролевых концептуальных моделей языка профессиональ-

© Колесников А. В., Румовская С. Б., Ясинский Э. В., 2020

ной деятельности (ЯПД). Схемы РКМ используются с разными целями: 1) для структурного анализа ЯПД и построения в памяти компьютера модели выражений ЯПД, при создании баз данных и знаний как обычных, используемых автономными методами, так и интегрированных, применяемых с многомодельных, гибридных и гибридных адаптивных системах управления; 2) для синтеза семиотических знаков для обозначения фактов о ресурсах, свойствах и действиях, иерархиях, структурах, процессах, событиях, ситуациях и состояниях, поведении в объекте управления, в виде знаков-описаний реалий и законов функционирования предметной области; 3) для описания деятельности по принятию решений субъекта управления: задач, проблем, планов, операций, решений; 4) для схематизированного описания модельной деятельности субъекта проектирования функциональных гибридных интеллектуальных систем: метод, интегрированный метод, интегрированная модель, гетерогенное модельное поле, элемент ФГиИС, функциональная гибридная интеллектуальная система и поведение ФГиИС.

Аксиоматически были введены, по сути, два варианта «синхронизированных» представлений семиотических знаков: линейно-предикативная, последовательно формируемая запись в нотации *rkx*-кодов [2], и графическая интерпретация концептуальными графами, вершины и дуги которых были именованы *xk*- и *rk*-кодами соответственно. В итоге графическую форму приобрели три базисных схемных конструкта: точка, отрезок линии и треугольник, из которых по правилам склеивания треугольников вершиной, добавления обратного отношения и склеивания треугольников стороной строились сложные составные схемы знаков, обозначающих ресурсы и их отношения в объекте управления, ментальные сущности субъекта управления и ментальные сущности субъекта модельной деятельности в ходе гибридизации.

В [3; 4] для моделирования рассуждений на визуально-образных схематизированных изображениях была применена концепция семиотической системы Д.А. Поспелова и Г.С. Осипова, и визуально-образные представления рассматривались как многослойная иерархия семиотических систем. Метаязык визуализируется «слоеным пирогом» семиотических систем, в которых знаки-образы (ниже образы) отражают действительность на двух уровнях образного отражения из трех: уровень представлений (вторичных образов предметов) и вербально (символьно)-логического мышления. В основании «слоеного пирога» — словари понятий и отношений, концептуально-визуальный базис, над которым строится семейство упорядоченных по уровням языков описания. Предложена формальная модель концептуально-визуального метаязыка как многослойная структура — основа автоматизированного решения проблем на основе интеграции вербально-логических и визуально-образных рассуждений.

Эти начальные исследования — попытка описания правосторонних механизмов профессиональной оперативной деятельности в системах с высокой динамикой, в частности в электроэнергетических сетях и установках, лево-

сторонними, логико-языковыми средствами используя аппарат концептуальных графов и семиотической модели по Д. А. Поспелову. Результаты в определенной степени помогли улучшить понимание скрытых от наблюдений правосторонних механизмов введением моделей носителя языка (экспертов, элементов, агентов), множества систем модальностей, связанных с действием, визуальных измерений графического примитива «точка»: ее координат на плоскости и цвета, и определения через них других графических объектов: отрезка прямой, окружности, заливки и пиктограммы.

В настоящей работе эти результаты развиваются в рамках концепции экологической оптики и объемлющего оптического строя Дж. Гибсона, ретинальной (визуальной) переменной Ж. Бертена и моделирования поведения отношениями инцидентности на гиперграфах А. А. Зыкова и искусства рисования геометрическими фигурами.

1. Техническая семиотика. Знак и символ. Техника и инженерная деятельность

В [5] семиотический взгляд на технику назван «техносемиотика», «семиотика техники», «семиотика в технике», а в [6] сформулирован как своего рода «язык», реализующий сумму прагматических, синтаксических и семантических правил в конкретных материальных субстратах. Через технику, репрезентуемую знаками, человек осознает себя, развивается, социализируется, включается в пространство культуры. Семиотика техники — это 1) мировоззренческая позиция, выраженная ясным языком и пониманием того, чем она занимается; 2) онтологический плюрализм: восприятие (физический мир), рассудок (мир мышления), разум (мир фантазий и рефлексии) и представление о человеке, осуществляющем посредством семиозиса взаимодействие между мирами, понимая, что и сами эти миры обладают семиотической природой.

Здравый смысл соотносит «существование» («нечто существует», «есть», «имеет место», «наличествует», «быть реальным») с данными органов чувств, а «значение» — с языковым способом означивания этих данных. Рациональные критерии существования формулируются в отношении наблюдаемого или фиксируемого объекта и в отношении субъекта — наблюдателя посредством объективных структур. Нечто существует, если оно 1) наблюдаемо (по Д. Беркли), 2) есть значение переменной (по У. Куайну), 3) учитывается посредством интерпретанты (по Ч. С. Пирсу и Ч. У. Моррису). Некто существует, если он 1) фиксирует в наблюдении объекты (по Д. Беркли), 2) способен к отрицанию (по Р. Декарту), 3) способен различать интерепретанты (по Ч. С. Пирсу и Ч. У. Моррису).

Существовать — значит быть воспринимаемым, значением переменной. Наблюдаемый объект, с одной стороны, правило (математические или логические объекты), с другой — и фантазия (образ в сознании оператора, диспетчера, конструктора), с третьей — существуют различными способами.

В XX в. общепризнанным становится утверждение о том, что «значение» в семантическом плане — это объект, обозначаемый знаком, в синтаксическом плане — это место знака в системе знаков, смысл или значимость знака, в прагматическом — употребление или применение знака для обозначения чего-либо.

Знак не несет в себе никакого намека на выражаемое им содержание, знаки равнодушны к выражаемому ими содержанию, а закрепленное за знаками значения конвенционально, условно. Поэтому все значения, даже закрепленные в словарях, всегда имеют большую или меньшую неопределенность при понимании и использовании.

Символ по своей природе, в своей знаковой форме несет намек на содержание. Из символа бьют смыслы. Если образ опирается на предметный мир, то символ, упрощая форму и редуцируя содержания образа, переносит точку опоры в мир смыслов. Символы подобны знакам в одном, решающем отношении: и символы, и знаки указывают на нечто, лежащее вне их самих, но есть и фундаментальное различие: 1) знаки не участвуют в реальности и силе того, на что они указывают; символы, хотя и отличны от того, что символизируют, участвуют в его смысле и силе; 2) одни символы нельзя заменять другими, так как они имеют особую функцию; знаки всегда можно заменять на другие; 3) символы рождаются и умирают, а знаки люди сознательно вводят в обиход и отменяют; 4) «буквальное» не больше, а меньше «символического»; 5) символ раскрывает уровень реальности, для которого несимволический язык не подходит. В [7] подчеркнуто: «Случилось нечто опасное для попыток создать центр, в котором собираются понятия символов и знаков: математики назвали термином «символ» математический знак. Путаница стала непреодолимой и пришлось выделять разные группы знаков: знаки, называемые символами (математические знаки), и подлинные символы».

Общая гипотеза, в рамках которой осуществляется выражение онтологических терминов знаками, символами и другими средствами семиотики, заключается в том, что понятия «существовать» и «быть знаком» тождественны. Чувственное восприятие превращает нечто, лежащее за пределами сознания, в факт сознания, позволяя обнаружить некоторый объект. Слова «мир», «чувственное восприятие», «опыт» в этом смысле можно охарактеризовать как имеющие один и тот же денотат. «Мир» впервые создается для человека структурами чувственного восприятия в том смысле, что мир приобретает форму, представимую перцептивным аппаратом человека. «Предмет», формальная логика в ее традиционном изложении обозначает как «понятие», понимание самого себя. Интерпретация или процедура декодирования знака — переход от знака к его значению, реконструкция обозначаемого знаком объекта, семиотическая деятельность субъекта, в которой он использует в отношении некоторого знака синтаксические, семантические и прагматические правила.

Техника — проективный способ работы сознания со знаками, рецепция, приводящая к формированию новых «значений» при реализации семантических, синтаксических и прагматических правил на каждой из ступеней познания, будь то чувственное восприятие, рассудок или разум. Техника для действующего и воспринимающего человека — «общая территория», объединяющая и переплетающая навыки восприятия и деятельностного отношения к реальности, упорядочивающая отношения своих элементов, определяющая механизмы развития и деградации, соединяющая натуралистические, волевые и рациональные основания. Техника — исполнение, выходящее за пределы сугубо фантазии или рассудка, интерпретация, создающая новые формы в субстрате физической действительности.

Инженерная деятельность, создание «технических объектов» или «действующих технических систем» — материально выраженная рефлексия. Технические объекты подразделяются на объекты, воплощенные человеком в субстрате восприятия (техника в рамках естественной природы), в субстрате рассудка (техника в рамках второй природы) и в субстрате разума (техника как третья природа). Техническое сознание — носитель «технического мировоззрения»: понимать — значит изготовлять.

2. Когнитивно-ориентированная двухзвенная модель мыслительной деятельности человека-оператора в технической семиотике

Говоря о представлении знаний в искусственном интеллекте, в [1] отмечено, что отсутствие в модели мира субъекта деятельности существенно ограничивает возможности как самих моделей, так и основанных на них интеллектуальных систем. Используя концепцию психического отражения субъектом окружающего мира по Дж. Гибсону на уровнях сенсорно-перцептивном, представлений и вербально-логического мышления по Б. В. Ломову и результаты экспериментов Н. И. Жинкина, которые доказали, что механизм человеческого мышления реализуется двумя противостоящими динамическими звеньями, когнитивная наука уже много лет эксплуатирует надежную и вычислительную знаково-предикативную семиотическую, языковую парадигму.

В рамках этой парадигмы одно словесно-вербальное (СВ) звено-механизм мышления человека-оператора территориально распределено между левым (ЛП) и правым (ПП) полушариями мозга и отвечает за процедурный, операциональный аспект его мыследеятельности, за правильность и последовательность мыслительных операций. Это формально-логический, синтаксический, предикативный механизм комбинирования и перекомбинирования в линейные последовательности (предложения) редуцированных (вырожденных) языковых знаков вне зависимости их отношений к внешнему миру [8]. При этом языковый знак ЛП: активен; слово осознается как сущность, отдельная, независимо существующая от денотата, как конвенциальный, искус-

ственно сотворенный объект; в слове на первый план выступают потенциальные, синтагматические и парадигматические связи с другими словами; актуален синтаксический семиозис — отношения между знаками и предельно ослаблен семантический аспект семиозиса. Правое полушарие человека-оператора также «обслуживает» языковое сознание — следит за «добротностью» материала, которым оперирует мысль — устанавливает соответствие содержания мысли и реальности. Оно плохо приспособлено к поддержке логического развития мысли, его знаки редуцированы и утратили способность взаимодействовать [8]. Языковый знак ПП: инертен, не агрегируется с другими знаками; классифицируя языковые знаков, ПП руководствуется законами вещного мира, сочетаемостью денотатов; ПП не осознает произвольности, конвенциальности языкового знака; предположительно, что для ПП слово неотторжимо от предмета, является его частью, таким же признаком, как форма, цвет, запах; слово отождествляется с денотатом; слово — естественная часть, признак вещи; слово существет вне синтагматических и парадигматических связей с другими словами; актуален семантический аспект семиозиса — отношение знаков к денотатам; предельно ослаблен синтаксический аспект семиозиса; обеспечивает денотативную семантику, поступаясь синтактикой — свободой комбинирования знаков; в вещном мире существуют жесткие ограничения на комбинации.

Другое звено-механизм мышления человека-оператора — несловесный, иконический, предметно-изобразительный (ПИ) код (универсальный предметный код по Н.И. Жинкину), наглядные образы, формирующиеся в сознании человека-оператора в процессе восприятия им окружающей действительности. Это образная схема, смысловое содержание которой сопровождается наглядным образом. Это сжатая, контурно представленная схема, по которой осуществляется интериоризация, семиотическое перерождение предмета [9]. Единицы предметно-изобразительного кода — нейрофизиологические единицы, кодирующие и хранящие знания в биоэлектрической форме мозгового субстрата. Это образы, схемы, картины, чувственные представления, эмоциональные состояния, кодирующие элементы знаний человека, объединяя и дифференцируя их в памяти по различным основаниям. Объединяясь в более крупные комплексы, они создают комплексные, сложные картины, активизация отдельных элементов которых — выделение в структуре комплексной картины ситуации некого признака — представляет собой предикацию.

В современной лингвистике и когнитивной лингвистике есть термины похожие на ПИ-код: образный код, смешанный код, предметно-схемный код, внутренний субъективный код, предметно-изобразительный код, вторичный код, язык мозга, автономный код, индивидуальный код и др. Свойства ПИ-кодов: 1) непроизносимы, без материальных признаков слов; здесь есть изображения, которые могут образовать группировку; 2) обозначаемое других языков в этом коде одновременно и знак; 3) предметный: когда говорят:

«теплоэлектростанция», то за буквами или звуками языка разумеется сама вещь — «теплоэлектростанция»; независимо от букв или звуков в виду имеется вещь как предмет, порождающий множество; 4) изобразительные компоненты этого кода схематичны; 5) предметы, сведенные к схеме, составляют единство, элементы которого непроизносимы, но по нему можно восстановить произносимые слова любого языка; 6) универсальность и переводимость на все другие языки; 7) свободен от избыточности естественных языков (ЕЯ).

Когнитивная сущность ПИ-кода состоит в том, что в речемыслительном процессе денотативная структура как обобщенное отражение предмета преобразуется в семантическую структуру знака, а при восприятии языкового знака, наоборот, семантическая структура как означаемое знака переводится в денотативную структуру номинируемого объекта. Это исходный протосемантический конструкт, непосредственно переводящий довербальную информацию в смысловое содержание слова посредством так называемого предметного остова по Г. Г. Шпету. Если ПИ-код — посредник между познаваемым объектом и языковым знаком, то предметный остов — элемент словесной, смысловой структуры языкового знака, амодальный образ, уже осуществившегося или будущего предметного действия. Психологи утверждают, что предметный остов языкового знака не дан, а задан. Он может быть реализован в языковом знаке, в котором ему сообщается некий смысл, включающий в себя образ действия, моторную программу и т. п. Такой образ может приобрести то или иное словесное выражение. В итоге можно вспомнить суждение А. А. Потебни: *«Внутренняя форма* слова есть отношение содержания мысли к сознанию; она показывает, как представляется человеку его собственная мысль».

Механизм мышления человека-оператора реализуется двумя противостоящими динамическими звеньями: ПИ-кодом внутренней речи и СВ-кодом экспрессивной речи. В первом звене мысль рождается и задается, во втором она сообщается, передается другим субъектам оперативной деятельности и снова задается их ответным сообщением для первого звена человека-оператора. Такая двухзвенность мышления резко отличает его от искусственных устройств, применяющих формально-логические средства переработки информации.

Таким образом, без ПИ-кода невозможен никакой ЕЯ, но и без ЕЯ мыслительная деятельность во внутренней речи бессмысленна. Для человека — оператора решить мыслительную задачу — значит контролировать выход из ситуации в определенном отношении. Зарождаясь в ПИ-коде, мысль отображается в СВ-код переосмыслением лексических значений. СВ-код — символическая знаковая система только на уровне поверхностной структуры. Путь от глубинной структуры языка к поверхностной — это путь превращения мысли «для себя» в мысль «для других», это путь языковых преобразований мысли. Но одновременно путь преобразования и самой мысли — ее расчленения, углубления, уточнения, формирования. Это путь от конкретного обра-

за предметной ситуации, ПИ-кода к теоретическому постижению мира, путь от конкретного к абстрактному. На этом пути чувственный образ, вобравший в себя все цвета, формы и звуки окружающего мира, превращается в бестелесную мысль, а глобальное слово — в расчлененное предложение. Неосознанное превращается в осознанное, человек познает себя, его мысль постепенно высвечивается для него самого и становится доступной для других. По образным словам Л.С. Выготского, в мозговом субстрате разыгрывается «драма слова и мысли»: она начинается в правом и заканчивается в левой полушарии.

Компьютерная модель сотрудничества противостоящих динамических звеньев допускает такую имитацию, когда мысли возможно воспарить сколь угодно высоко, но, подчиняясь земному притяжению и ощущая грань между реальным и фиктивным [8].

3. Предметно-изобразительное кодирование образов. Схематизация

Образ, согласно словарю В. Даля, — вид, внешность, фигура, очертание, подобие предмета, изображение его. Здесь точно схвачены и точно переданы весьма существенные свойства образа, в том числе графического, и он практически синонимичен «изображению» (англ. и фр. — image).

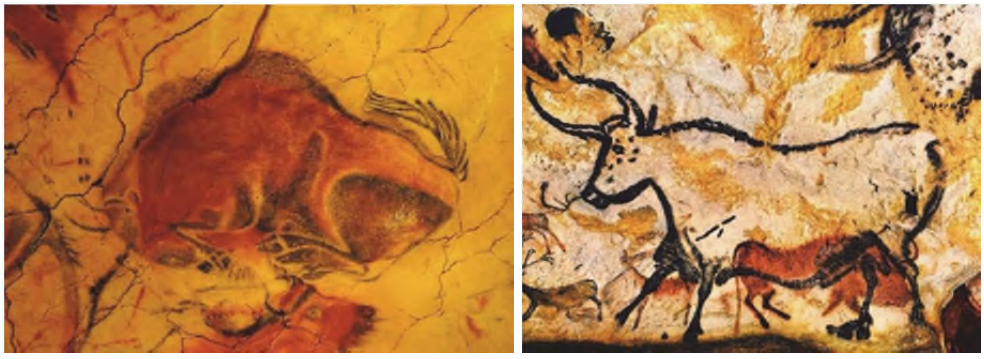
Ранний вид «предметного письма» — сообщение скифов царю Дарию, переданное с посланцем [10] и «записанное» зооморфным (зоологическим кодом): птица, мышь, лягушка и пять стрел (рис. 1).

Рис. 1. Изображение послания скифов царю Дарию (посланец доставил не текст письма, а трех животных и пять стрел для лука)

Для создания такого письма использовался простейший вид условной связи между предметом и понятием (лягушка — «прыгать», птица — «летать» и т.д.). Однако правильно прочитать подобное послание без подсказок и дополнительных сведений невозможно: необходимо иметь представление о культуре и мышлении авторов послания, учитывать конкретные сопутствующие события.

Следующий шаг к начертательному письму — пиктография, или письмо рисунками, наносившимися на предметы домашнего обихода, на стены пещер и поверхность скал. Пиктография (лат. *pictus* — «нарисованный», «украшенный» и греч. *grapho* — «пишу») — это рисуночное, картинное письмо, схематичный рисунок, обозначающий предметы, сочетания которых передают смысл сообщения. Пиктографическое письмо сохраняло связь с наскальной живописью (рис. 2). Пиктограммы могут прочесть люди, говорящие на разных языках. Вот почему они широко используются в современном

мире как емкий способ общения наряду с другими графическими знаками и буквенным письмом. Однако пиктограммы не всегда однозначно понятны и требуют истолкования; возникают трудности и при передаче сложных и отвлеченных идей. Пиктография, как разновидность графического письма, постепенно перешла в идеографическое письмо, а позже возникла и фонография.



а *б*

Рис. 2. Наскальная живопись:
а — стенная роспись времен палеолита в испанской пещере Альтамиры — удивительное археологическое открытие прошлого века, поражающее точностью наблюдений и умением средствами искусства передать непосредственное впечатление; сверкающий розоватой, словно тающей в лучах поднимающегося солнца, шерстью бизон стремительно мчится в предельном напряжении сил; ноги поджаты к туловищу, рогатая голова круто наклонена к груди;
б — схематизированное изображение быков в эпоху неолита, будто художник растратил приобретенное мастерство живой наблюдательности и отдал приоритет условностям

Наиболее яркий пример идеографического письма — семантография К. Блисса [11]. Семантография (греч. *semanticos* — «существенное значение», и *graphein* — «писать») — наука о семантическом графическом языке К. Блисса, простом в освоении международном вспомогательном языке для обеспечения общения между различными языковыми сообществами, вдохновленного китайскими иероглифами (рис. 3).

Рис. 3. Пример семантографического письма К. Блисса:
блиссимволы, комбинируясь с другими символами, составляют слова и высказывания (внизу, под словами и высказываниями, дан перевод на русский язык)

Блисс-метод широко распространен и используется в 37 странах мира как вспомогательное средство общения людей, которые по разным причинам не могут говорить или их речь остается непонятной для окружающих [12]. Блисс-семантическая языковая система способна заместить любой естественный язык. В семантографии К. Блисса нет существительных, местоимений, прилагательных, глаголов и наречий. Это не фонетический язык, в нем нет частей речи, однако есть части идей и идеограмм.

Если сравнивать блисс-изображения и пиктографические выражения, то пиктограраммы не существуют как законченная система с заранее определенным набором значков и постулируемым синтаксисом. Оба подхода направлены на то, чтобы заменить слова естественного языка изображениями различного уровня абстрактности. Символика К. Блисса исключает возможность «вычислить» смысл используемых знаков и их комбинаций по их виду. Пиктограмма может быть «расшифрована» в силу иконичности пиктограммой. Следует иметь в виду, что отношения, равно как и многие свойства, можно изобразить только символически (означающее символ не мотивировано тем, к чему символ отсылает), но не иконически.

К началу XXI в. все большее распространение получают языки, построенные не на словах, а на схемах [13].

Схематизированное изображение — интеллектуальное средство, инструмент сделать «невидимое» «видимым». Это справедливо и для «неслышимого», «неосязаемого» и т. п. То что стало «видимым», «слышимым», «осязаемым», может превратиться в смысл, тему, решение задачи, выход из проблемной ситуации, предмет проектирования и стать культурным содержанием.

В [14] на материалах трансцендентальной философии И. Канта, концепции «генетической эпистемологии» Ж. Пиарже, теории когнитивной науки, а также взглядах Г. П. Щедровицкого понятие «схема» осмыслено и сформулированы принципы «схематизированного мышления»: онтологичности, предметности и историчности, нормативности, рефлексивности, соответствия метода объекту и традиционности.

В [13] даны следующие определения.

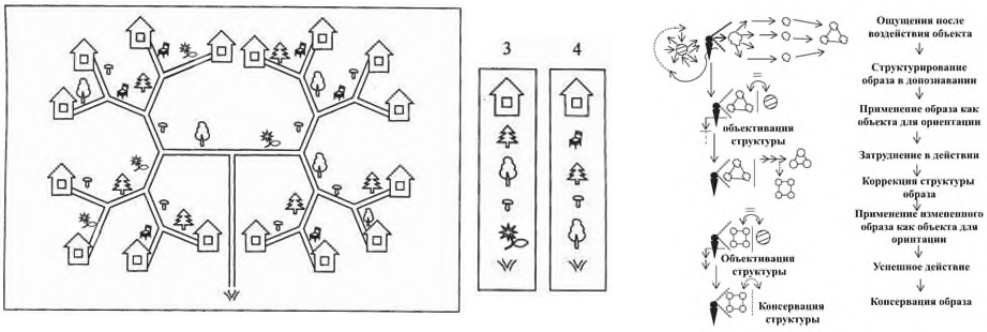
Изображение — результат воспроизведения характеристик наблюдаемого объекта (формы, цвета, структуры, свойств и др.) на ином для объекта материале.

Схематическое изображение — результат рисования по наитию, по внезапной догадке, инстинктивно; похоже на «интуитивное рисование», «правополушарное рисование», экстериоризирует, выносит во вне результат умственных действий, выражает во внешне замечаемой форме содержание представлений внутреннего мира эксперта.

Схематизация — сглаживание различий предметов и выделение черт сходства между ними, механизм воображения наряду с агглютинацией («склеивание» несовместимых в повседневной жизни образов (в том числе и абстрактных) предметов или их частей в новые сочетания), акцентированием (подчеркивание каких-либо отдельных признаков (свойств) предмета или его

частей в итоговом абстрактном образе)), гиперболизацией (увеличение или уменьшение предмета или его частей в абстрактном образе) и типизацией (выделение существенного, повторяющегося).

Схематизированные изображения — результат схематизации с использованием специальных языков и правил (рис. 4).



а *б* *в*

Рис. 4. Карточка детской задачи на использование условно-схематических изображений для ориентировки в пространстве [16]:
а — полянка с разветвленными дорожками и домиками на их концах; каждая дорожка обозначена «значком-ориентиром» (елочка, березка, стульчик, грибок, цветок); начало маршрута обозначено значком «трава»; *б* — два «письма» — № 3 и 4, с условно указанным путем к одному из домиков; читать письмо следует снизу вверх; *в* — схема 007 — «Первичное познание» на языке схематизированных изображений профессиональной деятельности в психологии О.С. Анисимова [13], «письмо» схемами деятельностного мировоззрения

Схема — схематизированное изображение, графическое высказывание, элемент языка. Она онтологизирует мир, отображая его устройство. В то время как мысль, образ в сознании оператора, например района электрической сети, существует целостно, структурно и одномоментно (симультантно), сразу весь, то текст телефонного сообщения существует для него процессуально (сукцессивно), возникает в сознании «по кусочкам», и сознание еще только вынуждено строить из него целостный образ. Схема же существует симультантно, поэтому она адекватнее мысли, чем текст. Преимущество схемотехнических языков в наглядности, легком контроле адекватности передаваемого содержания и управлении вниманием. Но они тяжеловесны, замедляют быстроту мышления, хотя и делают его более надежным. Изменяя схему, эксперт изменяет в своем сознании представление об объекте.

Следует различать схему от технического рисунка как наглядного графического изображения объекта, выполненного от руки в глазомерном масштабе, в котором ясно раскрыта техническая идея объекта, правильно передана его конструктивная форма и верно найдены пропорциональные отношения [17; 18].

На рисунке 5 приведены примеры изображений электроподстанции Северная 330 кВ, расположенной на северной окраине Калининграда.

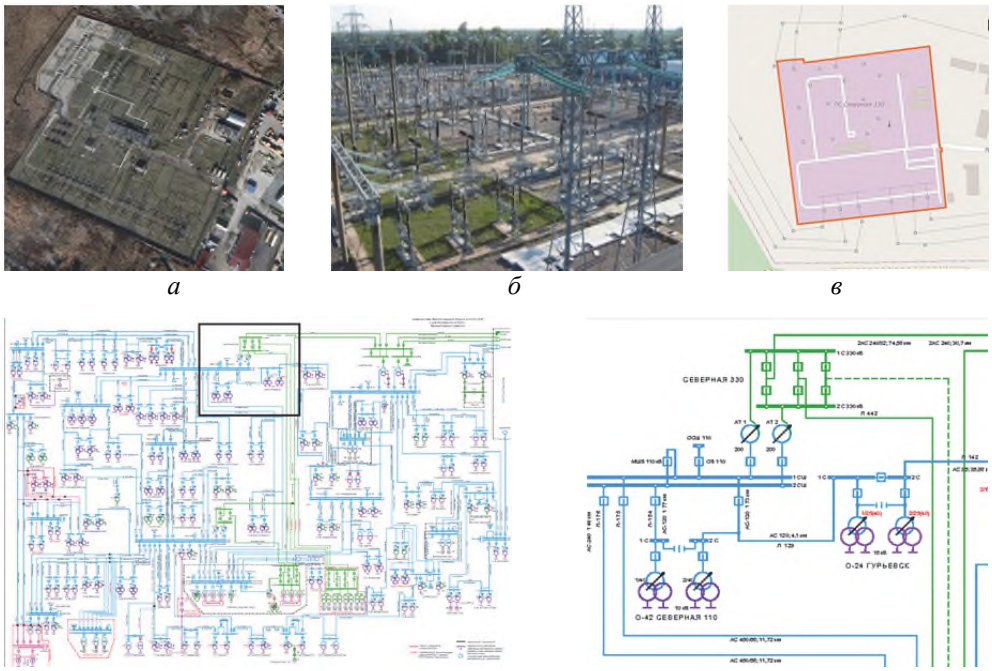


Рис. 5. Изображение подстанции ПС 330 кВ Северная 330:
а — воспроизведенное программой Google Earth Pro 7.3.37699 (64-bit), дата выпуска 7 мая 2020 г.; *б* — фотографическое изображение фрагмента из Интернета; *в* — в проекте OpenStreetMap; *г* — нормальная схема электрических соединений сетей 60-110-330 кВ энергосистемы Калининградской области на 01.01.2018 с учетом развития до 2023 г.; *д* — фрагмент нормальной схемы с подстанцией Северная 330 кВ

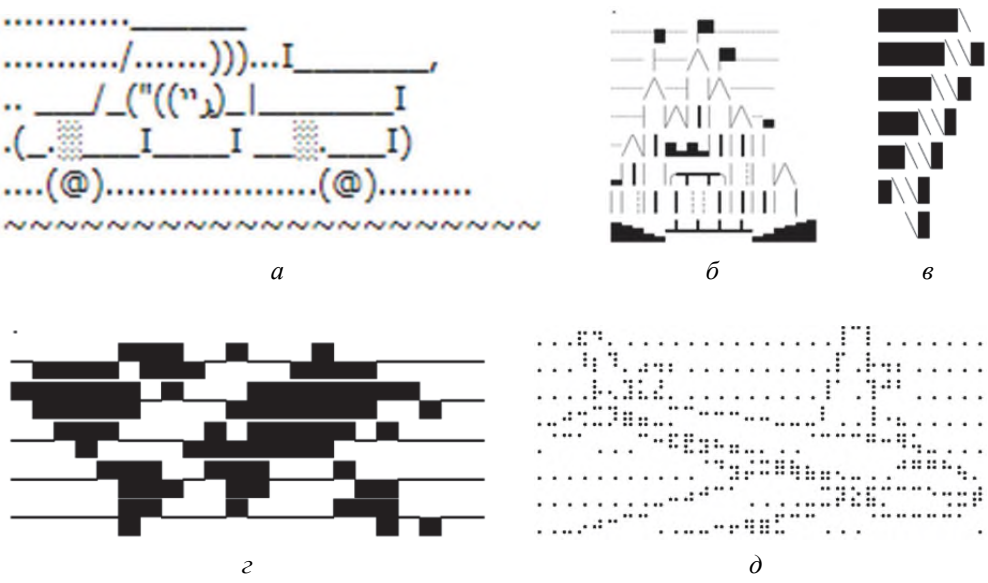
4. Искусство и наука рисования и схематизации символами, точками и линиями на плоскости

Я испытываю некоторую неловкость, когда вижу, что Локк, как и Стюарт Милль, считает необходимым использование слов каждый раз, когда речь заходит о сложных идеях. Я, как и большинство ученых, думаю, что чем труднее и сложнее вопрос, тем меньше мы можем доверять словам, тем яснее понимаем, что должны контролировать этого опасного союзника и его подчас предательскую точность

Жак Адамар, французский математик и механик, член Французской академии наук

Рисунки и анимация символами. В 1865 г. Л. Кэрролл в книге «Приключения Алисы в стране чудес» записал текст третьей главы в виде мышиного

хвоста, изменив тем самым форму графической поэзии. В начале XX в. появились фигурные стихотворения Г. Аполлинера — каллиграммы, что помогало раскрыть тему и эмоции поэта, развивало воображение и ассоциативное мышление. В 90-е гг. XIX в. начали проводиться соревнования секретарей-машинисток на скорость печати и лучший рисунок из печатных символов. Это были первые художники ASCII art. ASCII-графика, иногда называемая искусством текстовых картинок (от англ. ASCII artwork) — форма изобразительного искусства, использующая около 100 символов ASCII (аббревиатура от англ. American Standard Code for Information Interchange) (рис. 6).



а *б* *в* *г* *д*

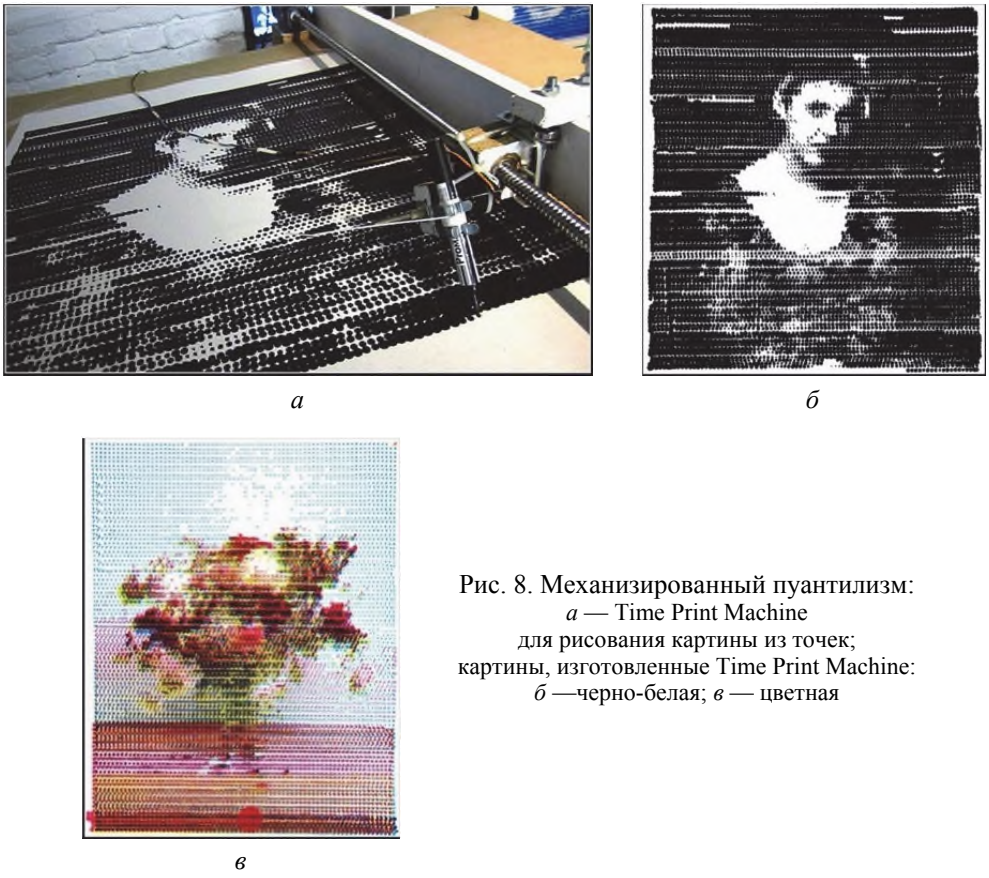
Рис. 6. Искусство текстовых картинок — ASCII-графика:
а — автомобиль; *б* — замок; *в* — лестница; *г* — карта мира; *д* — самолет

Рисование картин из точек в технике пуантилизма. Пуантилизм (фр. *pointillisme* — «точечность», от фр. *point* — «точка»), или дивизионизм, — стилистическое направление в живописи неоимпрессионизма, возникшее во Франции около 1885 г., манера письма раздельными, неизолированными мазками правильной, точечной или прямоугольной формы. Плененный техникой пуантилизма, Дж. Брошу в качестве «базисного материала» выбрал разноцветную нонпарель, а прототипом послужила интернет-фотография (рис. 7). Ювелирными пинцетами он тщательно размещал на поверхности холста с двухсторонним скотчем сахарные точки и покрывал выполненную часть работы слоем клея. Готовое изображение состоит более чем из 221 тыс. сахарных шариков.

а *б* *в*

Рис. 7. Современный пуантилизм: «Купание бигля» — точечная картина канадского студента Университета изящных искусств в Онтарио Дж. Брошу (Joel Brochu): *а* — портрет бигля из 221 тысячи сахарных шариков; *б* — увеличенный фрагмент картины «Купание бигля»; *в* — увеличенный фрагмент картины «Купание бигля», на котором виден «базисный материал» — нонпарель, сахарная посыпка для кексов в виде крошечных шариков шести разных цветов и диаметром не больше 1,5 мм

Механизированный пуантилизм представлен, например, Time Print Machine от дизайнера П. Феррагута (Paul Ferragut), способной рисовать картины из точек (рис. 8).



а *б* *в*

Рис. 8. Механизированный пуантилизм: *а* — Time Print Machine для рисования картины из точек; картины, изготовленные Time Print Machine: *б* —черно-белая; *в* — цветная

Устройство напоминает ткацкий станок. Вместо иголки с ниткой используется фломастер, а вместо ткани — лист плотной, но рыхлой, впитывающей чернила бумаги, превращающей точку в расплывшееся пятнышко нужного размера, от чего зависит качество и четкость рисунка. Предварительно в компьютер загружается исходный рисунок, затем Time Print Machine калибруют, определяя необходимый размер точек и расстояние между ними, далее машина формирует алгоритм нанесения пятнышек, а художник периодически меняет цветные маркеры.

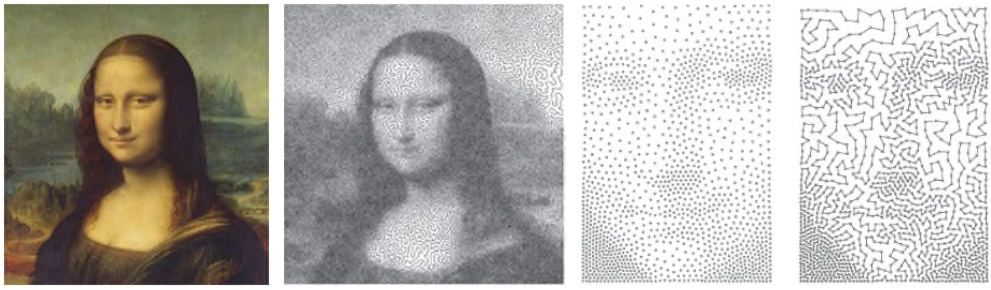
Техническое изображение тональных (светотеневых) отношений (англ. TSP Art, Traveling Salesman Problem Art). Тон — вместе с насыщенностью и светлотой одна из трех характеристик цвета. В колористике тон — это направление вектора цветности на диаграмме цветности с началом в точке белого и концом в данной цветности. Прикладная теория цвета для художников называется цветоведением. В живописи тональные отношения, включающие насыщенность цвета, его яркость и светлоту, создаваемые живописцем добавлением белил или черной краски, отличают от светотеневых отношений: валёров. В натуралистическом, нехудожественном, техническом изображении понятия тональных и светотеневых отношений отождествляют. Основной тон, аналогично музыке, придает цельность всему изображению Разница между светом и тенью привносит в изображение контраст.

Тональное качество изображения в «TSP Art» воспроизводится программно-техническими средствами одной ломаной линией — геометрического аналога оптимального гамильтонова маршрута на обыкновенном, связном, реберно-взвешенном, неориентированном графе. Программно-технический комплекс «TSP Art» впервые разработали Р. Бош и К. С. Каплан. Позже в [19] рассмотрены новые методы моделирования тональных отношений черно-белых изображений.

Изображение фрагмента знаменитой картины «Портрет госпожи Лизы дель Джокондо» — рис. 9, *а*) в градациях серого преобразовано в 100 тыс. точек, и сформулирована TSP-задача нахождения оптимального гамильтонова маршрута для 100 тыс. точек-городов. Иными словами, задача нарисовать самую короткую непрерывную линию, проходящую через каждую точку изображения. Изображенная техническими средствами (на экране монитора, принтером, плоттером) линия-маршрут коммивояжера (рис. 9, *б*) напоминает исходный образ Моны Лизы.

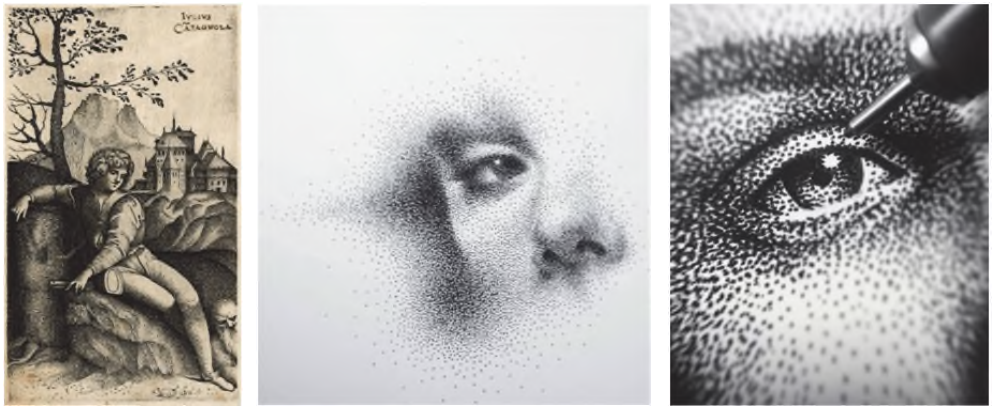
Стиппли́нг (англ. *stippling* — «зернистость») — создание узора, имитирующего различные степени твердости или затенения с помощью небольших точек, эффект, подсмотренный художниками у природы: на чертеже или картине точки делаются пигментом одного цвета, наносимого пером или кистью (рис. 10). Чем плотнее точки, тем темнее кажущийся оттенок — или светлее, если пигмент светлее поверхности. Это похоже на пуантелизм. В гравюре эта техника была изобретена Дж. Кампаньола около 1510 г. Стиппли́нг вручную используется в гравюре, скульптуре для изменения текстуры объекта, либо для получения внешнего вида изменением светлого или темного затенения в

зависимости от отражательных свойств поверхности. Эта техника популярна у иллюстраторов, так как такие рисунки легко воспроизводятся простыми черными чернилами. Другой распространенный метод — штриховка линиями вместо точек. Стипплинг традиционно предпочтителен штриховке в биологических и медицинских иллюстрациях, поскольку линии, используемые в штриховке, могут быть ошибочно приняты за фактические контуры. Кроме этого стипплинг позволяет художнику более тонко изменять плотность затенения для изображения изогнутых или нерегулярных поверхностей.



а *б* *в* *г*

Рис. 9. Отображение тональных свето-теневых отношений
на фрагменте картины Л. да Винчи «Портрет госпожи Лизы дель Джокондо»
программно-техническим комплексом «TSP Art»:
а — цветное изображение фрагмента; *б* — образ, изготовленный «TSP Art»
одной ломаной линией; *в* — фрагмент лица Моны Лизы,
изображенный 1395 точками-городами; *г* — фрагмент лица Моны Лизы,
изображенный как оптимальный маршрут коммивояжера по обходу 1395 городов



а *б* *в*

Рис. 10. Техника ручного стипплинга:
а — «Молодой пастух», гравюра Дж. Кампаньолы; *б*, *в* — создание контурных отношений
(формы) изменением только плотности точек на плоскости

В [19] рассмотрен инструмент генерация точечных рисунков по исходному изображению (отсканированный набросок карандашом, фотография, 3D-графики, кадры анимации и др.) с минимальным участием человека. Главное в предлагаемом подходе — применение центроидных диаграмм Вороного для расчета распределения точек при различных константах тональных значений (рис. 11).

а *б* *в*

Рис. 11. Компьютерный стипплинг:
а — исходное изображение, представленное разбиением (мозаикой) Вороного из вычислительной геометрии; исходное изображение (*б*) и крупный план больших листьев растения Пеперомия туполистная (Peperomia obtusifolia) с 20 тыс. пятнами радиуса 2×10^{-3} мм, изготовленный Адрианом Секордом (Adrian Secord) (*в*)

Рисование геометрическими фигурами сравнимо с изучением алфавита иностранного языка. Геометрические формы — первая стадия изображения объекта любой сложности. Геометрические фигуры — общепринятые эталоны, меры измерения формы предметов [20]. Рисование геометрическими фигурами важно в познании окружающего мира, крайне необходимо для развития логического мышления, пространственных представлений, совершенствования математических способностей. Очень давно люди, наблюдая за природой, научились рисовать и чертить геометрические фигуры. Сегодня геометрическими фигурами изображают природные объекты и представления о них (рис. 12).

а *б* *в* *г*

Рис. 12. Рисование геометрическими фигурами:
а — портрет Н. Тесла, выполненный треугольными формами и текстурой; *б* — карта мира, изображенная треугольниками черного цвета; *в* — композиция «Букет из пятиугольников», изготовленная треугольными формами, цветом и контрастом; *г* — композиция «Цветок из квадратов», исполненная прямоугольными формами разного размера, цвета и текстуры

Искусство анаморфоз. Анаморфоз (греч. αναμόρφωση; от μορφή — «образ, форма») — деформированное изображение, при первом взгляде недоступное для восприятия, складывающееся в узнаваемый образ только под определенным углом либо отражаясь в зеркальной поверхности (всевозможные кривые зеркала, а также стальные цилиндры и конусы). Некоторые анаморфозы не требуют дополнительных конструкций и читаются на картинной плоскости под узким углом и с определенной точки.

Для чтения необходимо понимать законы формы и принципы распределения отражения в соответствии с линейной перспективой (рис. 13, *а*). В случае с цилиндрическим зеркалом рисунок необходимо развернуть по кругу основания зеркала (рис. 13, *б*). При этом следует понимать, что чем дальше от поверхности зеркала, тем крупнее должны быть фрагменты рисунка. Также можно использовать принцип анаморфоз в оформлении интерьера (так называемый 3D-эффект, рис. 13, *в*). Здесь можно избежать лишних сложностей построения искаженной сетки применением мультимедийного проектора для направления изображения на поверхности в пространстве, где должен быть рисунок. Линии исказятся, лягут на поверхности правильно и останется их обвести и раскрасить. Современные художники используют анаморфозы в своих работах мелом на асфальте (рис. 13, *г*).

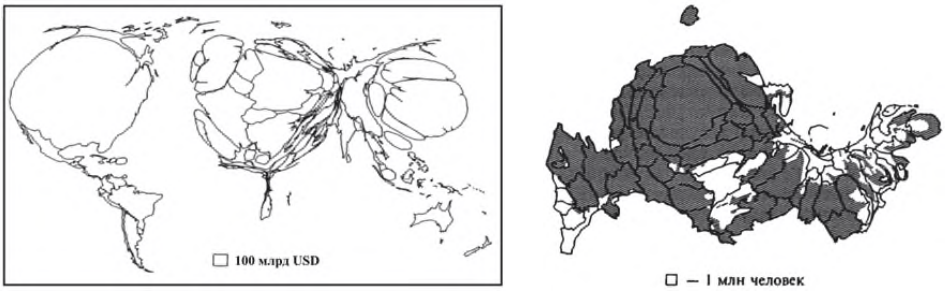
а *б* *в* *г*

Рис. 13. Анаморфозы в искусстве:
а — законы формы и принципы распределения отражения в линейной перспективе;
б — в случае с цилиндрическим зеркалом рисунок разворачивается по кругу,
в соответствии с диаметром основания зеркала; *в* — оформление интерьера в 3D-стиле;
г — «стрит-арт»

Изображения геоинформатики в неевклидовой метрике [21]. Применяются в географии, экологии и информатике. Среди них выделяются картоиды, «мысленные» изображения и анаморфозы. В геоинформатике анаморфозы (англ. *transformed maps*, *pseudocartograms*, *topological cartograms*) — графические изображения, производные от традиционных карт, масштаб которых трансформируется и варьирует в зависимости от величины характеристики явлений на исходной карте (рис. 14).

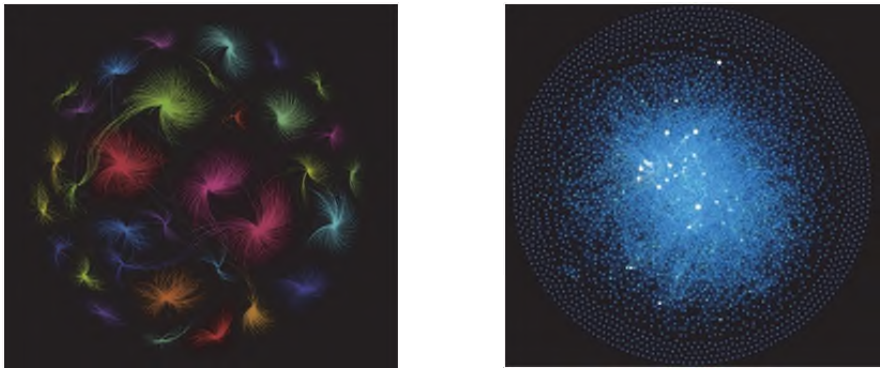
Визуализация точками и линиями «больших данных» (англ. *big data visualization*, *large data visualization*) — области научной и информационной визуализации. В первом случае «большие данные» — результат сложного

компьютерного моделирования объектов и процессов [22—24]. Во втором — имеет место визуальное описание и представление абстрактной информации как результата сбора и обработки многокатегориальных данных, для анализа которого применяется нескольких количественных и качественных оценок. Интересные визуализации больших данных приведены на рисунке 15.



а *б*

Рис. 14. Площадные анаморфозы:
а — анаморфоза стран мира по их валовому национальному продукта в 1998 г.;
б — анаморфоза России по численности населения с характеристикой области преимущественного компактного заселения русского населения



а *б*

Рис. 15. Визуализация больших данных :
а — образ «финансовые фонтаны» отражает перемещение денег между компаниями; большие «цветки» привлекают к сотрудничеству; маленькие «цветки» привлекут внимание фондов поддержки; разноцветные вершины графа обозначают компании, а того же цвета ребра — денежные транзакции; для построения графа обработано более 60 млн записей о 670 тыс. компаний; у графа 3883 вершин и 3943 ребер;
б — образ «звездные врата» разработан, чтобы идентифицировать и остановить APT-атаки в адрес оператора мобильной связи; вершины графа — веб-страницы, открытые пользователем; ребра — пути по направлению к другим страницам; ширина линии — промежуток времени пребывания на сайте; более крупные узлы — сайты с высокой степенью риска, приводящей к вредоносному поведению и на которых нужно сконцентрировать политику безопасности; для построения графа обработаны данные о 2300 сотрудниках за один год

Схематизированные изображения О.С. Анисимова [13] ориентированы на деятельностное (внутренний мир объектов-мыслей и их отношений, предмет психологии) мировоззрение и отчасти напоминают семантическую символику К. Блисса [11].

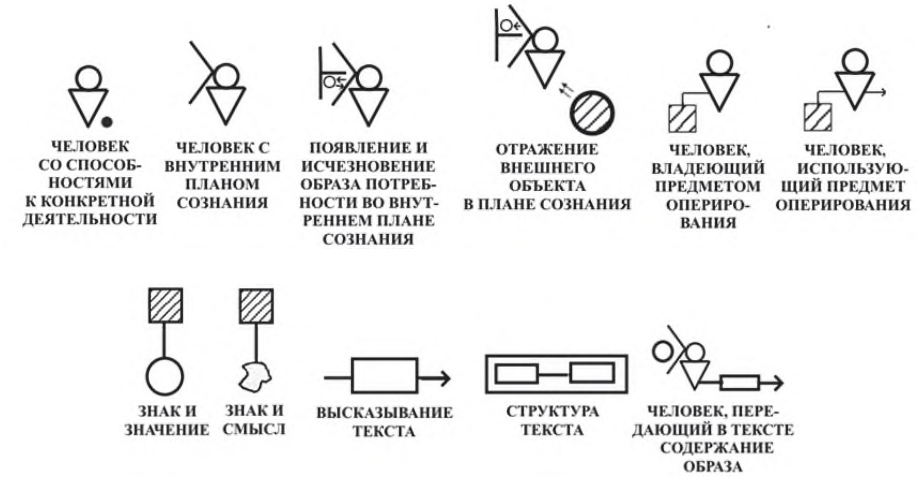


Рис. 16. Фрагмент словаря языка схематизированных изображений О.С. Анисимова (под фигурой дано ее значение)

Отдельные элементы языка схематизированных изображений соединяются друг с другом в схему, что синтезирует графические изображения и значения каждого символа (см. рис. 4, *в* на с. 165). Разработаны правила соединения геометрических фигур и стрелочек посредством типовых точек подсоединения. Таких равноправных точек на границах фигуры и стрелке несколько. Точки внутри фигур равноправны. Отношения между геометрическими фигурами реализуются только через линии. Геометрическая фигура не может непосредственно примыкать к другой геометрической фигуре, что считается формальным, не имеющим онтологической интерпретации соединением.

Ситуационные образы обобщенного представления состояния электросети и электросетевого оборудования Л.С. Штейнбока [25]. Для удобства наглядного восприятия функциональных схем объектов, контролируемых либо управляемых, применяют мнемосхемы — графические изображения схем этих объектов. Мнемосхема может отображать, например, цех станков с ЧПУ, технологический процесс или электроэнергетическую сеть. Мнемосхема — информационная условная модель системы или процесса в виде символов, обозначающих части системы, а также их связи. Мнемосхема отражает графически структуру всей системы и облегчает работу оператора, легче запоминающего структуру системы, взаимосвязи параметров, назначение тех или иных органов управления, приборов, станков и т.д.

Для устранения недостатков мнемосхем Л. С. Штейнбок в разработанной им технологии SitVision предложил новшества, в частности обобщенное иерархическое представление информации о схеме сети и обобщенное представление информации о коммутационном состоянии сети и оборудования (рис. 17).

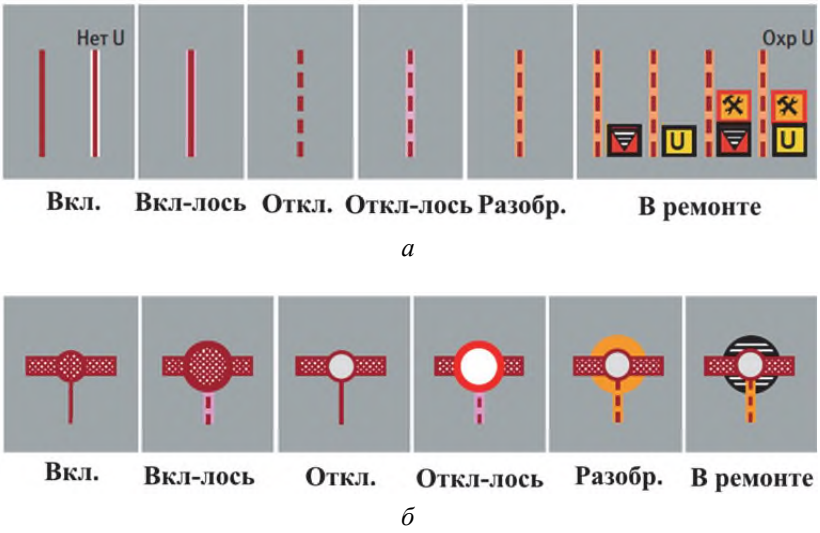


Рис. 17. Пример изображений на мнемосхеме:
а — состояния линии электропередачи (ЛЭП);
б — состояния эквивалентного коммутационного аппарата

Обобщенные коммутационные состояния сети и оборудования (рис. 18) интегрально учитывают состояние отдельных коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей, заземляющих ножей), а также наличие или отсутствие напряжения.

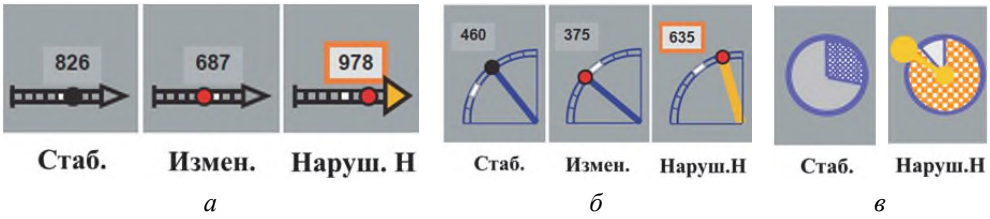


Рис. 18. Изображение на мнемосхеме состояний параметра режима при качественной индикации:
а — переток активной мощности по ЛЭП с совмещением качественной и количественной индикации на линейной шкале; *б* — для активной мощности электростанции, с совмещением качественной и количественной индикации на круговой шкале; *в* — для мощности генератора, с качественной индикацией уровня его загрузки

В основе набора обобщенных коммутационных состояний сети и оборудования лежат реальные диспетчерские понятия: включено («Вкл.»); для ЛЭП и системных шин также отображается состояние «Включено, но обесточено» («Вкл. — Нет U»); на приведенных рисунках показано состояние после квитирования; включилось («Вкл-лось») — с миганием подложки и/или символа; отключено («Откл.»); на приведенных рисунках показано состояние после квитирования; отключилось («Откл-лось») — с миганием подложки и/или символа; разобрано («Разобр».); в ремонте («В ремонте»); при этом для ЛЭП отображаются также варианты связанных технологических состояний: Заземлено, Заземлено с учетом наведенного напряжения, Заземлено и допущены бригады, Заземлено с учетом наведенного напряжения и допущены бригады, Охранное напряжение (Охр.U).

5. Визуальная семиотика У. Эко и визуальные переменные Ж. Бертена для передачи образности в предметно-изобразительных, схематизированных технических представлениях

Визуальная семиотика У. Эко [56; 57]. Ряд сторонников лингвистического подхода в семиологии отрицают знаковый характер визуальных сообщений, считая, что знаковая природа коммуникации присуща исключительно естественному языку, поскольку основная его характеристика — наличие двойного членения (последовательное деление языка на элементы: первый уровень — смыслоразличительные единицы, второй — единицы с дифференциальным значением) — обнаруживается не во всех визуальных семиотических системах. Однако У. Эко полагает, что имеющие проблемы не препятствуют описанию визуальных феноменов в рамках терминологии лингвистики и в основной работе по визуальной семиотике «Отсутствующая структура» обосновывает семиотический подход к визуальным феноменам. Для этого У. Эко применяет триадическую классификацию знака Ч. Пирса к визуальным феноменам, считая, что для визуальной семиологии интересны отношения иконического знака и означаемого им объекта. Главные вопросы семиотики согласно У. Эко: 1) в чем состоит сходство иконического знака и отображаемого им предмета? 2) где граница мотивированности визуальных знаков или же степени произвольности связи означающего и означаемого иконического знака? Отвечая на эти вопросы, У. Эко вводит понятие иконического кода, позволяющего опознать объект по отличительным чертам и устанавливающего соответствие между графическим знаком и отличительным признаком. Таким образом, визуальные образы узнаются и строятся по иконическому коду.

Всякое изображение строится по изобразительным конвенциям представлений или знании об отношениях изображаемых объектов. Графических способов отобразить объект много больше, чем в естественном языке. Однако визуальные коды, по У. Эко, подвижнее, слабее и нуждаются в подкреплении языковым сообщением, сильным кодом. У. Эко составил иерархию кодов:

1) код восприятия, определяющий необходимые условия восприятия; 2) код узнавания, посредством которого в совокупности условий восприятия выделяется совокупность означаемых; 3) код передачи, обеспечивающий первоначальные условия ощущения, на которых обеспечивается функционирование тональных, стилистических кодов, а также кодов вкуса и бессознательного, к примеру, определяя степень зернистости изображения или количество кадров в секунду; 4) тональные коды — коннотативные характеристики знака, включенные в системы коннотации, ставшие стилем, например характеристика знака как «экспрессивного»; посредством тональных кодов строится дополняющее иконический знак сообщение; 5) иконические коды, образующие фигуры, знаки и семы, подвижные и изменчивые в рамках одного изображения; 6) фигуры — это графические знаки кода, составляющие условия восприятия; У. Эко указывает, что континуум фигур не всегда предполагает различение дискретных единиц, которых может быть неограниченное число, потому, возможно, не сводим к строго определенному коду; например, в западной традиции такие единицы представляют элементы евклидовой геометрии — сочетания точек, линий, углов, окружностей, порождающие фигуры; знаки — означающие семы узнавания, понятийной схемы предмета; поскольку знаки лишены устойчивых признаков, для их опознания зачастую необходимо обратиться к семе — «иконической фразе», представляющей образ в целом, идеолекту, индивидуальному коду; 7) иконографические коды, выстраивающие сложные конвенциональные семы, узнаваемые по определенным устойчивым признакам и элементам; означаемыми иконографического кода выступают означающие иконического кода; например, сюжет благовещения в живописи, изображающий в одном плане ангела, женщины и голубя/луча света; 8) коды вкуса и сенсорные коды — культурные конвенции, устанавливающие подвижные коннотации на основе вышеперечисленных уровней; 9) риторические коды — изобразительные решения, принятые в качестве нормативных; 10) стилистические коды — решения, санкционированные риторикой (например, академический рисунок) или же воплощающие авторский почерк, стилистические находки, вызывающий определенный комплекс ассоциаций; 11) коды бессознательного — конфигурации, вызывающие некоторые представления и реакции, в связи с чем используются в риторических целях; они основывающиеся на иконическом, иконологическом, риторическом и/или стилистическом коде.

Семиология визуальной коммуникации исследует иконические и иконографические коды, посредством которых последовательно кодируется визуальное сообщение и прочитывается его смысл.

Графическая семиология Ж. Бертена [27]. В этом разделе рассмотрена модель искусственной графической памяти французского семиотика и картографа Ж. Бертена. Она была опубликована на французском языке в 1967 г., на английском — первый раз в 1983 г. и переиздана в 2011 г., ссылки на эти книги можно найти, например, в [28; 29], однако до настоящего времени не переведена на русский язык. Результаты, изложенные в этой книге, в частно-

сти, касающиеся понятия «графическая переменная», пополнили представления авторов об одном из источников неоднородности задач обработки информации и управления — «Многообразие методов и переменных в науке» [30], который теперь выглядит так в части переменных: детерминированные, стохастические, лингвистические четкие, лингвистические нечеткие, генетические и графические. Поскольку понятие графической переменной использовано в изографах, остановимся на нем подробнее.

Свой подход Ж. Бертен ограничил вневременным рисунком на плоскости, и не распространил его на такие типы зрительного восприятия, как: реальное движение и кинематографию. Он рассматривает то, что можно представить в отраженном свете или напечатать на листе белой бумаги стандартного формата, видимого с одного взгляда [31] на расстоянии, принятом для чтения и во всеобъемлющем световом потоке и экологической теории оптики Дж. Дж. Гибсона [32]. Исключены: 1) вариации расстояния и освещенности; толщины, анаглифы, стереоскопия; фактическое движение, мерцание изображения, анимированные рисунки и пленка.

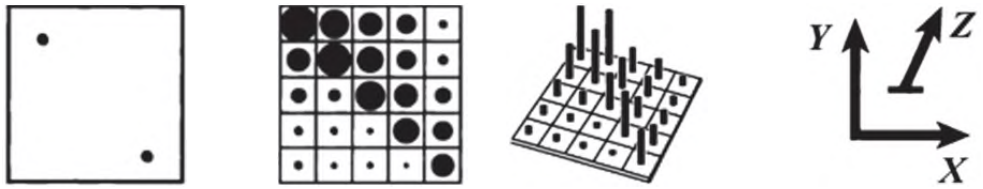
Изначально биологически глаза устроены так, чтобы воспринимать отраженный свет. Световые лучи, отражаясь от предмета, улавливаются нашими глазами. От длины волны этого излучения зависит цвет, который воспринимает глаз. Но ключевое слово здесь — отражение. Любой экран (электронно-лучевая трубка или жидкокристаллическая поверхность) в любом случае не отражает свет, а излучает его прямо в глаза оператору, к чему они биологически не приспособлены, а потому рано или поздно устают.

Зрительная система человека приспособлена для восприятия объектов в отраженном свете (картин природы, рисунков, печатных текстов и т. п.), а не для работы с дисплеем. Изображение на дисплее принципиально отличается от привычных глазу объектов наблюдения — оно светится; состоит из дискретных точек; оно мерцает, т. е. эти точки с определенной частотой зажигаются и гаснут; цветное компьютерное изображение не соответствует естественным цветам (спектры излучения люминофоров отличаются от спектров поглощения зрительных пигментов в колбочках сетчатки глаза, которые ответственны за наше цветовое зрение).

Модель искусственной графической памяти, по Ж. Бертену, — это графическая конструкция $< x\,y\,z >$, или «переупорядочиваемая матрица», отвечающая на многие вопросы рыцарских поединков графики и математики анализа данных, признавая взаимодополнение (сотрудничество) этих двух языков, особенно на этапе интерпретации. Человеческая логика основывается на визуальных свойствах только $< x\,y\,z >$-конструкций, то есть на естественном и немедленном восприятии отношений в трех «измерениях». Однако есть и четвертое измерение, время, доступное только человеческой памяти. Выразительная сила и универсальности $< x\,y\,z >$-конструкции приводит к «матричной теории графики», где картографическая графика определяется как семиотическая, знаковая система, любую задачу или проблему представляющая

двумерным массивом (таблицей). Но это определение не касается пиктографии и пиктографического письма, используемого в схематизации, цель которой — определение множества (области на плоскости, фигуры в топологическом пространстве).

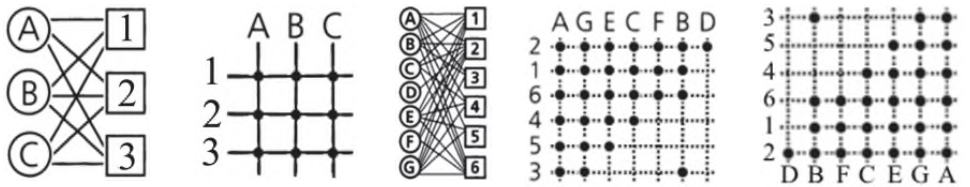
Ж. Бертен выделяет естественные (природные) свойства графических изображений. На плоскости изображение может быть выше или ниже, левее или правее. Глаза воспринимают два независимых измерения по X и Y в ортогональной системе координат. Изменения световой энергии дают третье измерения Z , независимое от X и Y (рис. 19).



а *б* *в*

Рис. 19. Три измерения образа, воспринимаемого с одного взгляда («мгновенного образа» по Ж. Бертену):
а — точка на плоскости — одна выше, другая ниже; *б* — изменение световой энергии квадратных областей на плоскости; больше площадь круга — больше световой энергии; *в* — глаз воспринимает два независимых измерения по X и по Y в ортогональной системе координат, а изменение светового потока можно рассматривать как третье изменение по Z, независимое от X и Y

Понятие «величина» — это взаимосвязь двух элементов (рис. 20).



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 20. Понятие «величина» как взаимосвязь двух элементов — точек и линий:
а — сетевое представление; *б* — отображение элементов линиями (горизонтальные линии отображают элементы 1, 2, 3, вертикальные линии — элементы A, B, C; точки пересечений линий отображают связи элементов группы A, B, C с элементами группы 1, 2, 3; обратите внимание на то, что связи элементов внутри группы и самих с собой не отражены); *в* — сеть с плохо различимыми зависимостями на множестве элементов; *г* — матричное представление сети; *д* — матричное представление с преобразованной матрицей и контрастными зависимостями на множестве элементов

Например, специфику сети на плоскости (рис. 20, *а*) составляют точки (точки обозначены именованными окружностями и квадратами) и линии (линии не именованы). Первые отображают элементы, а линии — связи. Размеры

фигуры-сети по координатным осям X и Y смысла не имеют. Можно отображать элементы линиями, а отношения — точками (рис. 20, *б*), что представлено ячеистой структурой, похожей на матрицу, где размеры по X и Y уже могут быть осмыслены. Сеть подходит для представления изображений порядка географических и геометрических элементов на плоскости, однако неконтрастно отображает зависимости запутанных отношений (рис. 20, *в*). Путаницу преодолевает матрица с тремя независимыми переменными: первая переменная меняет свои значения на множестве элементов $\{A, G, E, C, F, B, D\}$ по оси X, именующих столбцы, вторая переменная изменяет свои значения на множестве элементов $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ по оси Y, именующих строки, третья переменная меняет свои значения на множестве измерений светового потока по псевдооси Z, именуемая элементом-значением матрицы (рис. 20, *г*). Термин «псевдоось» использован, чтобы указать отличия от традиционного понимания третьего измерения в трехмерном пространстве.

Пусть булева матрица отражает факт наличия электростанций A, B, C, D, E на территориях районов 1, 2, 3, 4, 5 (рис. 21, *а*). В графической форме (рис. 21, *б*) она не удобна для анализа, поэтому выполним элементарные преобразования булевой матрицы, сохраняющие эквивалентность матриц: перестановку местами любых двух строк матрицы; перестановка местами любых двух столбцов матрицы. А именно строку 2 поместим на место строки 5 (рис. 21, *г*). Используем для этого графический редактор для показа матрицы с «вырезанной строкой 2, которая размещена справа от строки 5». Далее «поднимем» вверх фрагмент матрицы со строками 3, 4, 5 и «сдвинем» влево, на новое место строку 2. Показаны похожие действия с перестановкой столбца D на место столбца A. На сблокированной булевой (матрица на рис. 21, *в*) ясно различимы три группы похожих элементов, к которым удалось редуцировать 25 элементов исходных данных.

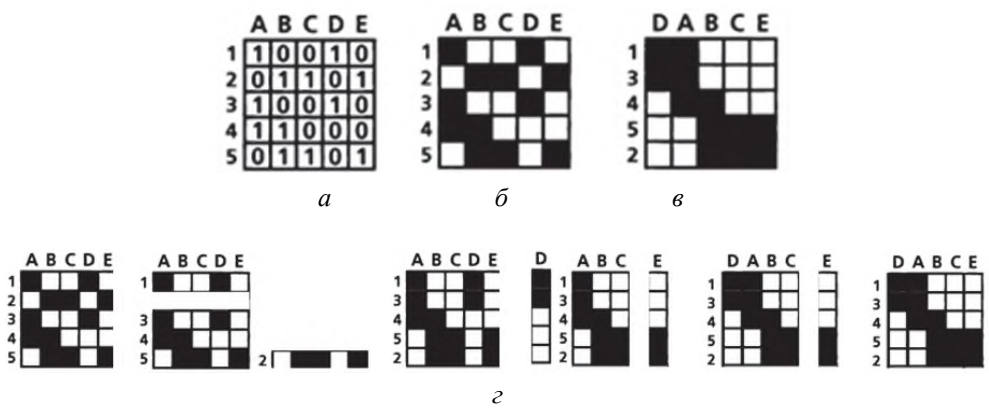


Рис. 21. Матричное представление данных
о размещении электростанций A, B, C, D, E по территориям районов 1, 2, 3, 4, 5
на плоскости (*а*)

Такое внутреннее (внутримашинное) преобразование определяет в терминологии Ж. Бертена «перезаписываемую матрицу» (ближе всего к этому понятию в современной терминологии машинной графики термин «матрица преобразования», «матрица двумерных и пространственных преобразований»).

В оригинале Ж. Бертен использует термин *visible peut* (фр. видимое малое), в переводе на английский — *visible mark* (англ. видимый отпечаток, отметка, метка, след). Ниже будем использовать термин «отпечаток», более соответствующий графической семиотике Ж. Бертена середины XX в.

Видимый отпечаток может изменять положение на листе бумаги (рис. 22 в центре). Черный прямоугольник расположен внутри квадрата с черным контуром и белой внутренней областью. Это положение может быть отображено двумя группами двумерных координат по X и Y. Экспериментальная психология определяет глубину восприятия [33] как результат действия нескольких факторов: бинокулярностью зрения, ограниченного несколькими метрами; видимое движение объектов при движении наблюдателя; изменение размера известного объекта; изменение значений известного контраста; изменение известной текстуры объекта; изменение насыщенности цветов известных объектов; деформации ориентации и формы. Отсюда глаз чувствителен к изменению энергии светового потока по измерению Z к значениям шести независимых визуальных (ретинальных) переменных (фр. variables visuelles, англ. visual variables), которые могут быть наложены на плоские фигуры (рис. 22): размер (англ. size) отпечатков, их контраст (value), текстура (texture), цвет (color), ориентация (orientation), и форма (shape). Они могут отображать отношения различия, подобия, близости, инцидентности, количественного и качественного порядка, выражать семантику групп, иерархий и систем.

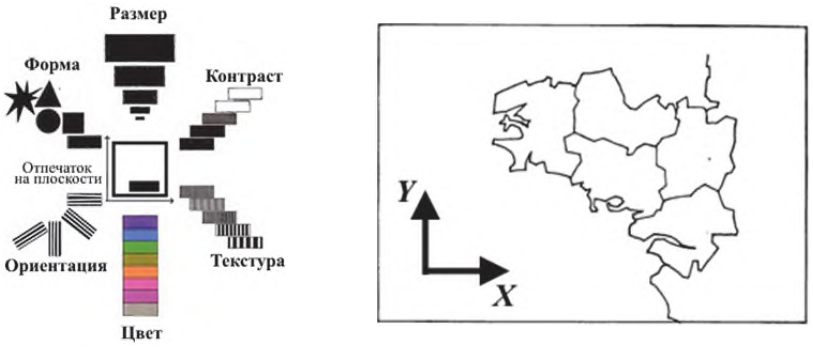


Рис. 22. Визуальные переменные по Ж. Бертену:
размер (изменение длины, площади или повторение); контраст (изменение насыщенности цвета от светлого к темному); текстура (изменение видимого узора, передающего информацию о внутренней структуре предмета его материале); цвет (изменение цвета в палитре цветов); ориентация (изменение угла штриховки внутренней области формы фигуры); форма (изменение геометрической формы фигуры)

Визуальная переменная и градации размера (рис. 23, *а*): высота столбца, площадь, покрытая квадратиками, пропорциональное количество знаков-точек. В точечном или линейном представлении любая фигура может отличаться по размеру без изменения положения, значения, текстуры, цвета, ориентации или формы. В избирательном восприятии диапазон изменения размера ограничен. Для среднего рисунка — это не более четырех-пяти выборочных ступеней, таких, что можно выделить и точно определить форму всех точек заданного размера. Изменение размера диссоциативно (разрушение интеграции) и невозможно игнорировать это визуально. Любая другая визуальная переменная в сочетании с изменением размера будет им доминироваться. Для очень маленьких точек цвет, например, становится практически незаметным. Поскольку контраст также диссоциативен, изменение размера станет заметным только для знаков, имеющих темный контраст. Черные или белые знаки могут даже быть нечувствительными к изменению размера.

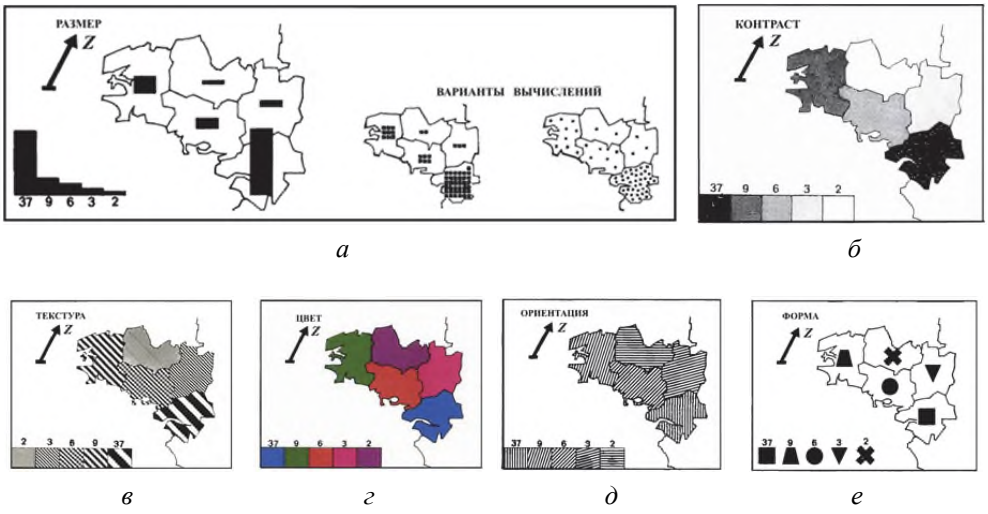


Рис. 23. Визуальные переменные и их градации:
а — размер; *б* —контраст; *в* — текстура; *г* — цвет; *д* — ориентация; *е* — форма

Визуальная переменная и градации контраста (рис. 23, *б*) — это непрерывная прогрессия, которую глаз воспринимает в ряде оттенков серого от черного до белого. На белой бумаге самый больший контраст дает черный. Эта прогрессия не зависит от цвета (оттенка); можно перейти от черного к белому серым, синим или красным. Контраст — соотношение между общим количеством черного и белого, воспринимаемого на заданной поверхности. Контраст цветной поверхности, обозначаемый серым, эквивалентен контрасту поверхности. Если контраст области — 10% серого, это означает 10% черного и 90% белого. Среднее значение данного цвета или черного цвета получается тремя способами: смешением, «затенением» или «точкова-

нием». Для избирательного восприятия желательно не превышать шесть или семь ступеней контраста черного и белого. Кроме того, ясно, что контраст между серым и белым становится больше по мере того, как отпечатки становятся меньше. Изменение контраста диссоциативно. Любая другая переменная в сочетании с изменением контраста станет преобладать на ним, и его длина будет уменьшаться соответственно. С очень бледными контрастами идентифицируемое количество размеров, цветов, форм, ориентаций и текстур уменьшается и исчезает до нуля.

Визуальная переменная и градации текстуры (рис. 23, *в*) — это ощущение, полученное в результате серии фотографической редукции структур отпечатков. Для данной области с регулярным структурным рисунком эти сокращения увеличивают количество отпечатков, без изменения значения площади. Текстура дана горизонтально, контраст и форма (шаблон) — по вертикали.

Текстура — количество знаков, содержащееся в некоторой области. Если значение текстур близко к нулю, то элементов много и они маленькие по размеру и не могут различаться невооруженным глазом. «Грубые» текстуры — предельное значение, за границами которого появляется двусмысленность относительно использования знака (шаблон, который слишком грубый, а понятие области угрожающе исчезает). Тонкость текстуры прямо пропорциональна количеству отпечатков; фотогравюра на экране с разрешением 50 точек на дюйм образует грубую текстуру; экран из 300 точек на дюйм соответствует в настоящее время лучшей текстуре). Для сравнения — сейчас мониторы достигли разрешения 150 — 200 dpi. Любой контраст может поддерживать изменение текстуры (кроме, конечно, для двух крайних значений — черного и белого). Ступени среднего значения, основанные на текстуре, очень заметны и могут производить «вибрационный эффект» — результат сочетания физиологического эффекта — создания определенного резонанса на сетчатке — и психологического эффекта — колебания между «фигурой и фоном».

Визуальная переменная и градации цвета (оттенка) используют палитру цветных ощущений. Применение в изображении цвета не может быть понято, если термин «цвет» (оттенок) строго определять из контраста. Это два разных ощущения, которые по своей природе перекрываются. Изменение цвета — это чувственно ощутимая разница, воспринимаемая между однородными областями, имеющими один и тот же контраст.

Для построения цветоряда значений необходимо манипулировать насыщенностью: независимо от того, какой цвет выбран, добавить немного белого для получения светлых значений или немного черного, чтобы получить темные оттенки. Для каждого цвета есть среднее значение, которое не требует добавления белого или черного. Это «чистый тон» в живописи, печати и колориметрии. Это «насыщенный тон» в экспериментальной психологии. Насыщенный тон меняется в зависимости от цвета. Именно этот факт приводит ко многим основным проблемам при использовании цвета в графическом

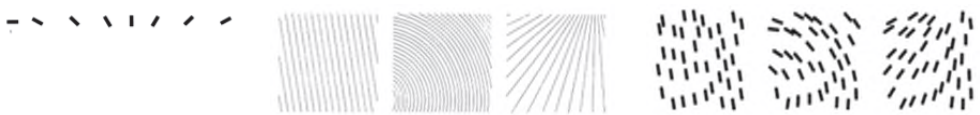
представлении. В чистых тонах, а они самые яркие, одновременно строится изменение цвета и контраста. Контрастное восприятие доминирует над цветовым.

Чтобы получить ощутимую разницу в цвете и преодолеть цветовое «слияние», область должна быть покрыта однородным цветом и контрастировать с другой областью, покрытой другим однородным цветом. Чем меньше отпечаток, тем менее различимы цвета, поэтому он должен быть *min* 1,5 мм в диаметре. Легче увидеть разницу между любыми двумя цветами, когда они применяются на большой площади фигуры.

В линейном (или точечном) представлении светлых цветов следует избегать и заменять их на черный. Понимание достигается сочетанием цвета с другими визуальными переменными (форма, текстура и ориентация). Монохромная легенда эффективна практически, как и цвет. Цвет захватывает и держит внимание, увеличивает объем сообщения. Часто встречающиеся аномалии хроматического восприятия (дальтонизм) человек-дальтоник устраняет бессознательно, используя альтернативные сигналы для восстановления значения сообщения.

Визуальная переменная и градации ориентации (рис. 23, *д*) — это изменение ориентации линий или линейного рисунка, от вертикали до горизонта в определенном направлении.

В точечном представлении отметка может предполагать бесконечное количество различных ориентаций без изменения положения ее центра. Однако человек чувствителен к такой вариации только при линейном характере отметки (рис. 24).



а *б* *в*

Рис. 24. Человек чувствителен к линейному характеру ориентации линий с соотношением высота/основание 4/1

Чтобы ориентация была различима, число градаций следует ограничить. Параллелизм между отметками в осмысленной ориентации имеет фундаментальное значение. Системы параллельных круговых ориентаций (рис. 24, *б*) и их прямолинейные аналоги (рис. 24, *в*) создают четко различимые поля в области представления, а также в представлении точки (обратите внимание, что центры соответствующих знаков одинаковы на рис. 24, *б* и 24, *в*). Желательно ограничиться четырьмя ориентациями и построением наклонных линий под углом 30 и 60 градусов, а не 45 градусов. Селективность пяти ориентаций уменьшится. Линейные отметки могут различаться по форме. В линейном представлении ограничиваются двумя ориентациями: осевыми линиями и перпендикуляром к ним.

Визуальная переменная и градации формы (см. рис. 23, *е* на с. 182). Отметка постоянной площади может принимать бесконечное число разных форм. Изменение формы — ассоциативно и может использоваться, когда изображение плотности отметок «все формы вместе» значимо.

В точечном представлении, когда формы аморфны, две одинаковые отметки трудно идентифицировать. Если они геометрические, мы можем легко перерисовать их и построить знакомые идентифицируемые отметки (числа, буквы). Они также могут быть мимическими (люди, животные, объекты) и имеют тенденцию вызывать один и тот же понятийный образ для большинства пользователей. В линейном представлении линия изменяется по форме и представляет разные понятия посредством разницы в угловатости. На больших площадях с крупными отпечатками избирательность может быть получена тщательным контрастированием точек и линий. Оптимальную селективность создают другие более естественные переменные — размер, контраст и текстура.

Значение формы никогда не бывает очевидным. Чтобы понять символику формы на плоскости, например, что представляет собой треугольник или квадрат, пользователь должен прибегнуть к поясняющему тексту. Миметическая (похожая внешне) форма обычно этого не требует и вполне решает проблему внешней идентификации. Не существует универсальной формы для обозначения: значение символа становится знакомым только по опыту и привычке, повторением аналогичных ситуаций. Форма становится символом только в ограниченной области, строго определенной и ранее знакомой наблюдателю. Таким образом, создание эффективного кода условных знаков в меньшей степени проблема обнаружения эффективных форм, чем проблема определения предметной области, в которой они будут использоваться и в которой их значение будет постоянным и достаточно много раз повторяться, чтобы стать общепринятыми (стандартными). В таком коде эффективность отметок зависит от визуального понимания фигур, во избежание двусмысленности и путаницы.

6. Математический подход к пониманию графического образа. Расширения теории обыкновенных графов. Гиперграфы

> Математика — это искусство называть разные вещи одним и тем же именем
>
> *Ж. А. Пуанкаре*

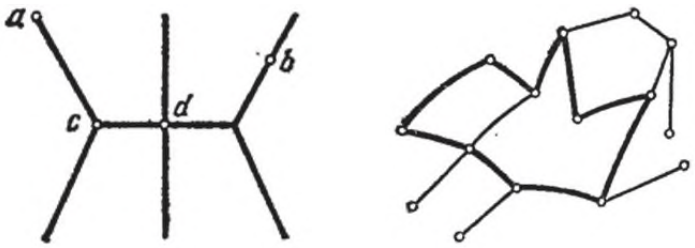
Математический подход дает ключ к пониманию графического образа как некоторого характерного рисунка, схемы, конфигурации, структуры, запечатлевшей реально существующие природные или социально-экономические объекты [26].

Теория графов широко применяется при исследовании технических систем, в технической семиотике [35]. Это обусловлено двумя особенностями графа: 1) граф — математическое понятие, которое можно использовать при разработке математической модели технической системы; 2) геометрический образ графа (геометрический граф) облегчает понимание соответствующей алгебраической модели технического средства, лаконично описывает элементы технической системы и отношения-действия между ними.

Пусть A — фигура, составленная из конечного числа дуг, и x — ее точка [34]. Число дуг фигуры A, сходящихся в точке x, называется индексом точки x в фигуре A. Например, в фигуре буквы Ж (рис. 25, *а*) точка *a* имеет индекс один, точка *b* — индекс два, точка *c* — индекс три, а точка *d* — индекс четыре.

Число точек индекса один, содержащихся в фигуре A, число точек индекса три, индекса четыре и т. д.— топологические инварианты фигуры A.

Фигуры, состоящие из конечного числа дуг, называются в топологии конечными графами. Они имеют конечное число вершин-точек с индексом один и некоторые из этих точек соединяются непересекающимися дугами-ребрами графа. При этом две вершины можно соединять несколькими ребрами. Допускаются замкнутые ребра («петли»), начинающиеся и заканчивающиеся в одной и той же вершине. Уникурсальные графы «рисуются одним росчерком», т. е. «проходятся» непрерывным движением, не обращаясь к одному и тому же ребру дважды. Уникурсальность также топологический инвариант. Всякий граф можно «строить» постепенно, добавляя одно ребро за другим. Контур в графе (рис. 25, *б*) — это замкнутая цепочка ребер, объединение которых представляет собой линию, гомеоморфную окружности.



а *б*

Рис. 25. К понятию графа — фигуры топологии:
а — топологические инварианты графа; *б* —контур на графе

Обыкновенные графы изучаются в высшей школе, обычно в дискретной математике [35]. Аппарат теории обыкновенных графов достаточно развит [36]: определены операции на графах, сформулированы теоремы, леммы и т. д., разработано много алгоритмов решения различных задач структурного синтеза. Гиперграфы исследованы мало и еще в меньшей степени исследова-

ны ультраграфы. Гипер- и ультраграфы применяются для моделирования схем, в задачах позиционирования, коммутационных задачах, задачах декомпозиции структур, установления идентичности структур, задачах выделения подмножеств особых компонентов [36]. Для разработки схематизированных представлений в [36] используются 14 операций над гиперграфами: добавления и удаления вершин, добавления и удаления ребер, стягивания ребер, подразбиения ребра, формирование части подграфа, свертка множества вершин, дефакторизация вершины, добавление части до графа, объединения и пересечения графов и др.

Эшграфы для моделирования и изучения технических систем [37] — расширение понятия «граф», порождающее расширение теории графов, упрощающее моделирование технических систем, постановку задач исследования технической системы и их решение.

Метаграфы для моделирования отношений группировки и вложенности [38] позволяют качественно по-новому взглянуть на задачу и ее решение. Здесь помогает рассмотрение взаимосвязанных множеств элементов и взаимодействия между группами элементов, т. е. отношений группировки. Например, группировать переменные в моделях систем поддержки принятия решений, логические переменные в правилах баз знаний, документы в системах автоматизированного документооборота.

Архиграфы и протографы для моделирования отношений смежности и инцидентности [39] — попытка создать контуры обобщения графов для разработки и исследования моделей сложных иерархических систем: телекоммуникационных сетей, нейросетей и социально-политических систем.

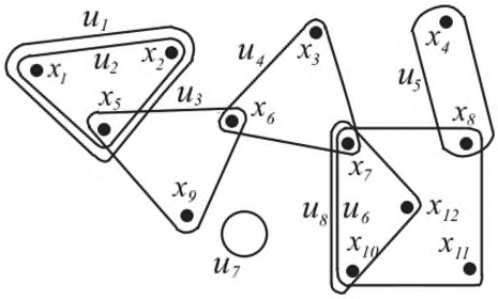
Гиперграфом $H=(X,U;R)$ в [40] называется пара множеств $X=\{x_i \,|\, i\in I\}$, $U=\{u_j \,|\, j\in J\}$ вместе с двуместным предикатом $R \doteq R(x,u)$, где $\doteq$ — равнозначно (эквивалентно) по определению, определенным при всех $x\in X$ и $u\in U$. Элементы $x\in X$ называются вершинами, элементы $u\in U$ — ребрами, а предикат R — инцидентором гиперграфа H. Вершина x и ребро u инцидентны или не инцидентны в H, в зависимости от истинности или ложности для них высказывания $R(x,u)$.

Каждой вершине $x\in X$ гиперграфа H отнесено множество $U(x)\doteq \doteq U_H(x)\doteq\{u\in U \,|\, R(x,u)\}$ всех инцидентных ей ребер, а каждому ребру $u\in U$ — множество $X(u)\doteq X_H(u)\doteq\{x\in X \,|\, R(x,u)\}$ всех инцидентных ему вершин. Количества $|U(x)|$ и $|X(u)|$ элементов этих множеств называются соответственно степенью вершины x и степенью ребра u в гиперграфе H. Элемент гиперграфа (вершина или ребро), не инцидентный никакому другому (т. е. вершина x с $U(x)=\varnothing$ или ребро u с $X(u)=\varnothing$), называется голым. Элемент, инцидентный ровно одному ребру, т. е. $|U(x)|=1$ или $|X(u)|=1$, называется висячим.

Обыкновенный граф — частный случай гиперграфа $(X,U;R)$, когда $X \neq \varnothing, \forall u \in U(\left|X(u)\right| = 2)$ и $\forall u,v \in U[u \neq v \Rightarrow [X(u) \neq X(v)]]$. В случае, когда оба множества конечны, гиперграф $H = (X,U;R)$ называется конечным. Если эти множества непусты и линейно упорядочены: $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$, $U = \{u_1, u_2, ..., u_m\}$, т. е. $I = \{1,2,...,n\}$, $n \doteq n(H) \doteq \left|X\right| \geq 1$ и $J = \{1,2,...,m\}$, $m = m(H) \doteq \left|U\right| \geq 1$, то такой гиперграф задается однозначно (с точностью до «материальной» природы элементов) своей матрицей инциденций $A(H) \doteq \left\|a_{ij}\right\|$, где

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{если } R(x_i, u_j) = \textit{истина}, \\ 0, \textit{если } R(x_i, u_j) = \textit{ложь}, \end{cases}$$

где $(i = 1,2,...,n;\ j = 1,2,...,m)$. На рисунке 26 изображен гиперграф $H = (X,U;R)$, где $X = \{x_1, x_2, ..., x_{11}\}$, $U = \{u_1, u_2, ..., u_7\}$, $\{R(x_1,u_1), R(x_2,u_1), R(x_5,u_1), R(x_1,u_2), R(x_1,u_2), R(x_2,u_2), R(x_5,u_2), R(x_5,u_3), R(x_1,u_1), R(x_6,u_3), R(x_9,u_3), R(x_3,u_4), R(x_7,u_4), R(x_6,u_4), R(x_4,u_5), R(x_8,u_5), R(x_7,u_6), R(x_8,u_6), R(x_{10},u_6), R(x_{11},u_6), R(x_{12},u_8), R(x_7,u_8), R(x_{10},u_8)\}$, причем все предикаты множества ρ имеют значения *истина*, остальные $12 \times 8 - 23 = 73$ — значения *ложь*.



	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
u_1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
u_2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
u_3	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
u_4	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
u_5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
u_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
u_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1

Рис. 26. Пример гиперграфа *H* и его матрицы инциденций

Матрица инциденций графа *H* показана на рисунке 26 справа. Заметим, что ребра третьей степени изображены фигурами, напоминающими по форме треугольник, а ребра четвертой степени — фигурами, похожими на квадрат. Изображение пустого ребра совпадает с окружностью. Кроме этого на рисунке 26 треугольные формы ребер u_1 и u_2 показаны вложенными друг в друга, а формы u_6 — «квадрат» и u_8 — «треугольник», помимо того, что «треугольник» расположен *внутри* квадрата, они еще имеют и одну общую «границу», если представить, что две «стороны» — левая квадрата и основание треугольника примкнут друг к другу и сольются в одно целое.

7. Геометрические фигуры. Основные понятия, математические модели планиметрии, аналитической и вычислительной геометрии, топологии и алгоритмы интерактивной машинной графики технической семиотики

> За душу каждого математика борются ангел топологии и дьявол абстрактной алгебры.
>
> *Анре Вейль*

Понятия «геометрическая фигура» и «геометрическое пространство» — базовые понятия евклидовой геометрии — теории геометрических фигур в геометрическом пространстве [41]. Понятие «геометрическое пространство», тождественное понятию «пространство геометрических фигур» — исходная категория математической теории «евклидова геометрия», обосновывает процессы абстрагирования и идеализации в создании и исследовании геометрических фигур.

Геометрическая фигура — математическая модель объектов реального физического пространства, спроектированная в системе условных геометрических построений в процессе обобщения и абстрагирования, подчиненных целям геометрической деятельности и пространственного мышления, оперирующего образами, содержание которой — воспроизведение и преобразование пространственных свойств и отношений объектов: их формы, величины, взаимного положения частей. Главные характеристики геометрической фигуры: 1) модель пространственных свойств объектов реального физического мира; 2) обладает системой пространственных, метрических, конструктивных свойств евклидова пространства; 3) реализует задачи создания геометрических образов на интуитивном, логико-символическом, знаковом уровнях и оперирования образами во внутреннем плане субъекта.

Геометрическое пространство в евклидовой геометрии — категория геометрической деятельности, отражающая закономерности формы, меры, ориентации, взаимного расположения объектов реального физического пространства,

Метрическим пространством называется пара (X,ρ) где X — множество, а ρ — метрика на X, т.е. такая функция $\rho: X \otimes X \to \mathbb{R}_+$, где $\mathbb{R}_+$ — множество всех неотрицательных вещественных чисел, при выполнении следующих условий: $\rho(x,y)=0 \Leftrightarrow x=y$ — аксиома тождества; $\forall x,y \in X \ \ \rho(x,y)=\rho(y,x)$ — аксиома симметрии; $\forall x,y,z \in X \ \ \rho(x,z) \le \rho(x,y)+\rho(y,z)$ — аксиома треугольника.

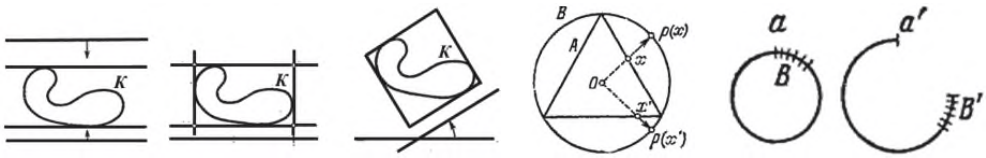
В эвклидовых пространствах E^n, n = 1, 2, 3 (прямая, плоскость, пространство) a priory (лат.) определено расстояние между точками x и y как длина отрезка, соединяющего эти точки. После введения прямоугольных координат, пространства E^n превращаются в арифметические n-мерные пространства $\mathbb{R}^n$, в которых расстояние между точками $x=(x_1,x_2,...,x_n)$ и $y=(y_1,y_2,...,y_n)$ вычисляется по формуле $\rho(x,y)=\sqrt{\sum\{(x_i-y_i)^2 \,|\, i=1,...,n}$.

Пусть (X,ρ) — метрическое пространство, $x \in X$ и $\varepsilon > 0$. Множество $O_\varepsilon(x) = \{x' \in X \,|\, \rho(x,x') < \varepsilon\}$ называется ε-окрестностью точки x в метрическом пространстве X. Пусть (X,ρ_1) и (X,ρ_2) — метрические пространства. Отображение $f: X \to Y$ называется непрерывным в точке $x_0 \in X$, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta > 0$, что $\forall x \in X$ из $\rho_1(x,x_0) < \delta \Rightarrow$ $\Rightarrow \rho_2(f(x), f(x_0)) < \varepsilon$, или, иными словами, $f(O_\delta(x_0)) \subset O_\varepsilon(f(x_0))$.

Топологическое пространство — любое множество точек, где определено отношение прикосновения одной точки ко множеству точек и соответственно отношение прикосновения двух множеств (фигур) друг к другу [42]. Топология связывает геометрию с алгеброй [43].

Вокруг всякой замкнутой кривой линии *K* можно описать квадрат (рис. 27). Множество само по себе лишено структуры.

Структура топологического пространства, вводимая на произвольном множестве X, снабжает элементы множества X свойством «притяжения» или «близости» при создании других математических объектов. Два множества *прилегают друг к другу*, если хотя бы одно из них содержит точки прикосновения другого, например окружность прилегает к внутренности круга. Граница (край, контур) множества *M* (фигуры) в топологическом пространстве — множество всех точек, прилегающих как к самому *M*, так и к его дополнению. Геометрическая фигура *в топологическом пространстве* — множество *M* точек топологического пространства.



а *б* *в*

Рис. 27. Последовательность действий визуального пространственного мышления по «аппроксимации» замкнутой линии квадратом (*а*);
к понятию непрерывности и гомеоморфности отображения (*б*, *в*)

В топологии задать функцию — значит каждой точке *x* некоторого множества *A* (например, контура равностороннего треугольника) поставить в соответствие определенную точку $f(x)$ некоторого другого множества *B* (например, описанной вокруг *A* окружности) (рис. 27, *б*). Тогда центральное проектирование точек множества *A* на окружность есть отображение $f: A \to B$. Функция $f: A \to B$ называется *непрерывной в точке* $x_0 \in A$, если для x, «мало» отличающихся от x_0, значения $f(x)$ и $f(x_0)$ тоже мало отличаются друг от друга. Наглядно непрерывность отображения можно представить, сказав, что «близкие» точки множества *A* переходят в «близкие» точки множества *B*.

Отображение называется *гомеоморфным*, если оно взаимно однозначно и взаимно непрерывно, например контур любого многоугольника гомеоморфен окружности. Те свойства фигур, которые не изменяются при гомеоморфных отображениях, например число связных компонент, называются *топологическими свойствами фигур*, или *топологическими инвариантами*. Если две фигуры гомеоморфны, они состоят из одинакового числа компонент. Замкнутая линия, гомеоморфная окружности, называется *простой замкнутой линией* (окружность, контур выпуклого многоугольника и т. п.). Теорема Жордана говорит о том, что всякая простая замкнутая линия, расположенная на плоскости, разбивает эту плоскость на две области (*внутреннюю* и *внешнюю*). Объединение простой замкнутой линии и ее внутренней области гомеоморфно *кругу*.

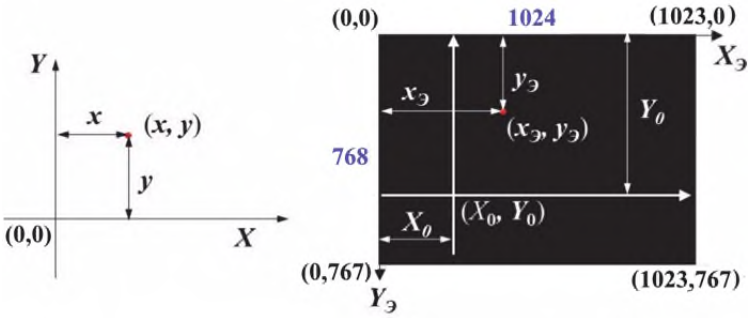
Линия по Эвклиду имеет одно измерение (наглядно — линия есть след движущейся точки), точка не имеет ни одного измерения. Фигура нульмерна, если в ней не существует никакой связной фигуры, содержащей более одной точки. Любой обыкновенный граф — одномерная фигура, т. е. линия.

На прямой как одномерной фигуре точку вместе с близкими к ней точками можно от остальных точек прямой отделить фигурой, состоящей из двух точек, т. е. с помощью нульмерной фигуры. Множество A, расположенное в фигуре X, *отделяет точку* a от точки b, если не существует в фигуре X, связного множества, которое содержит точки a и b и не пересекается с A.

Связное множество (математическое) — точечное множество, состоящее как бы из одного куска, т. е. такое, что при любом его разбиении на два непересекающихся непустых подмножества одно из них содержит точку, предельную для другого. На прямой единственные связные множества — *интервалы*. Примеры связных множеств на плоскости и в пространстве — *окружность, сфера, всякое выпуклое множество* (*квадрат, прямоугольник, стрелка, треугольник* и т. д.) В евклидовом пространстве открытое множество связно тогда и только тогда, когда любые две его точки можно соединить целиком лежащей в нем ломаной.

Математические модели связных множеств в топологии как нуль- и одномерных фигур в аналитической геометрии [44]. Реалистичность восприятия человеком-оператором компьютерного изображения определяется умением разработчика математической модели изображаемого объекта или процесса достоверно повторить на экране его развитие в пространстве и времени. Модель включает в себя систему уравнений и алгоритмов их реализации. Математическая основа построения модели — уравнения, описывающие форму и движение объектов. Всё многообразие геометрических объектов — комбинация примитивов — простейших фигур, которые в свою очередь состоят из графических элементов — точек линий и поверхностей. В векторной графике, наиболее удобной в технической семиотике, базовый элемент — линия. Любой объект состоит из набора линий, соединенных узлами. В векторной графике точке соответствует узел, на экране монитора представляющийся экранными координатами.

Математическая модель преобразования мировой системы координат в экранные координаты (m_1). При отображении пространственных объектов на экране компьютерного монитора применяется координатное описание. При этом используются две различные системы координат. Первая — мировая система координат (иногда называемая «математическая»), описывающая реальное положение объекта в пространстве (рис. 28, *а*). Вторая, экранная, система координат применяется в машинной графике (рис. 28, *б*). Она связана с устройствами вывода — экраном монитора, принтером и т. д. Разрешением экрана монитора называют размеры получаемого на экране изображения в пикселях (англ. pixel, «пиксель» — физический элемент матрицы дисплея, состоящий из трех светящихся элементов, наименьшая цветовая точкой изображения): 800×600, 1024×768, 1280×1024, подразумевая разрешение относительно физических размеров экрана, а не эталонной единицы измерения длины в один дюйм. Для получения разрешения в единицах ppi (англ. pixels per inch) данное количество пикселей необходимо поделить на физические размеры экрана, выраженные в дюймах. В графическом режиме используются экранные координаты, экран разделяется прямоугольной сеткой, каждый элемент которой имеет свои координаты. Левый верхний угол экрана имеет координаты (0, 0). Значение координаты $x_Э \in X_Э$ увеличивается в горизонтальном направлении слева направо. Значение координаты $y_Э \in Y_Э$ увеличивается в вертикальном направлении сверху вниз.



а *б*

Рис. 28. Координатное описание объекта:
а — мировая система координат и положение красной точки с координатами (x, y);
б — экранная система координат и положение красной точки с экранными координатами $(x_Э, y_Э)$; разрешение монитора 1024×768 пикселей;
X_0, Y_0 — экранные координаты точки $(0,0)$ мировой системы координат

В силу различий двух систем координат — мировой и экранной — при воспроизведении изображений выполняется преобразование: $x_э = X_0 + k \cdot x$, $y_э = Y_0 - k \cdot y$, где X_0, Y_0 — экранные координаты точки $(0,0)$; k — масштаб (во сколько раз растягивается единичный отрезок).

В графическом, как и в текстовом режимах монитора, используется понятие текущего указателя, в любой момент времени находящегося в любой точке экрана с координатами $(x_Э, y_Э)$. Его местонахождение отображается в пределах полотна курсором-перекрестьем. Все исходные данные (инструмент, форма, текстура, цвет, заливка, размеры и стиль линий, шрифты и др.) для рисования геометрическими фигурами в графическом режиме выбираются указателем мыши, а размеры фигуры и ее положение на полотне — манипулированием положением курсора-перекрестья посредством перемещения мыши, нажатием и удерживанием ее левой кнопки. При этом фигура «выращивается» в направлении «по ее диагонали», если это прямоугольная форма, в направлении «увеличения радиуса», если это окружность или другим способом визуальной спецификации исходных данных математических моделей $m_2 - m_6$ из точки экранных координат указанных пользователем как начало построения геометрической фигуры и освобождением левой кнопки в точке экрана как конца построения.

Математическая модель точки (обозначение — m_2). Точка представляется на плоскости двумя своими координатами, которые определяются как элементы матрицы-строки [*x y*] и часто называемую координатным вектором. Положением точки можно управлять, манипулируя ее координатным вектором. Линии, соединяющие точки, формируют отрезки, кривые и геометрические фигуры.

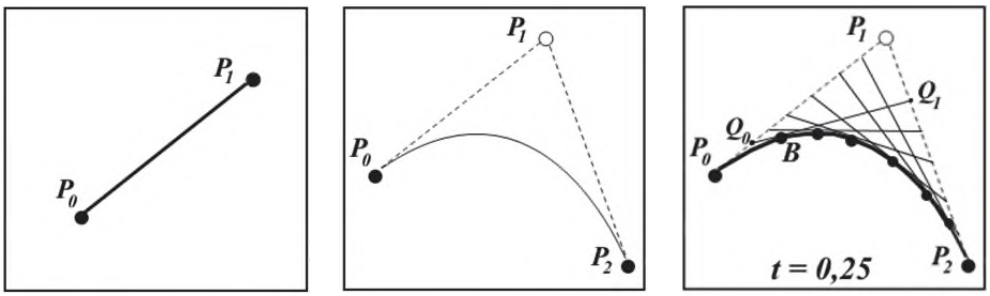
Математическая модель прямой линии (m_3). Координаты любой точки на прямой линии удовлетворяют уравнению $y = kx + b$, где b — ордината точки пересечения прямой с осью *OY*; k — угловой коэффициент прямой, $k = tg\,\alpha$; α — угол, составляемый прямой с осью *OX*. Прямая и только прямая имеет уравнение первой степени относительно текущих координат. Уравнение линии между двумя точками $M_1(x_1, y_1)$ и $M_2(x_2, y_2)$ имеет вид $y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1)$ или $\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$. И в матричном виде $\begin{bmatrix} y - y_1 & x - x_1 \\ y_2 - y_1 & x_2 - x_1 \end{bmatrix}$.

Математическая модель линии второго порядка — эллипса (m_4). Для любой точки $M(x, y)$ лежащей на эллипсе ($a > b$), справедливо уравнение $\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1$, где $O(x_0, y_0)$ — центр эллипса; *a* — длина большой полуоси эллипса; *b* — длина малой полуоси. Частный случай эллипса — окружность.

Математическая модель линии второго порядка — окружности (m_5). В самом общем виде каноническое уравнение окружности с центром в точке и радиусом R $(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$, которое справедливо для любой точки

$M(x, y)$, лежащей на окружности. После раскрытия скобок принимает вид $x^2 + y^2 - 2ax - 2by + a^2 + b^2 - R^2 = 0$ уравнения второй степени относительно текущих координат. Широко используется для визуализации «точек» в технической семиотике, где точка, чтобы быть различимой человеческому глазу, выбирается как окружность с *min* радиусом, заливкой цветом и текстурой.

Математическая модель параметрической кривой линии (m_6). Кривая П. Безье — частный случай многочленов С. Н. Бернштейна, представляет собой параметрическую кривую и задается выражением $B(t) = \sum_{i=0}^{n} P_i\, b_{i,n}(t) \big| 0 \leqslant t \leqslant 1$, где n — количество опорных точек; i — номер опорной точки; t — шаг (например, в построении по 100 точкам равен 0,01); P — координата опорной точки; $b_{i,n}(t)$ — вес опорной точки для $b(t)$ — базисной функции кривой П. Безье: $b_{i,n} = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$, $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ — число сочетаний из n по i. Координаты кривой описываются в зависимости от параметра $t \in [0,1]$. При $n = 1$ кривая представляет собой отрезок прямой линии, опорные точки P_0 и P_1 определяют его начало и конец. Кривая задается уравнением: $B(t) = (1-t)P_0 + tP_1$, $t \in [0,1]$.



а *б* *в*

Рис. 29. Кривая Безье:
а — представляет собой отрезок прямой линии; *б* — представляет собой линейную кривую (отрезок линии); *в* — представляет собой квадратичную кривую

Для построения линейной кривой (отрезка линии, рис. 29, *а*) параметр t в функции, описывающей линейный случай кривой П. Безье, определяет, где именно на расстоянии от P_0 до P_1 находится $B(t)$. Например, при $t = 0{,}25$ значение функции $B(t)$ соответствует четверти расстояния между точками P_0 и P_1. Параметр t изменяется от 0 до 1, а $B(t)$ описывает отрезок прямой между точками P_0 и P_1.

Для построения квадратичных кривых П. Безье (рис. 29, *б*, *в*) требуется выделение двух промежуточных точек Q_0 и Q_1 из условия, чтобы параметр *t* изменялся от 0 до 1. Точка Q_0 изменяется от P_0 до P_1 и описывает линейную кривую. Точка Q_1 изменяется от от P_1 до P_2 и также описывает линейную кривую. Точка *B* изменяется от Q_0 до Q_1 и описывает квадратичную кривую.

Для построения сложных по форме линий отдельные кривые П. Безье могут быть последовательно соединены друг с другом в сплайн. Формат компьютерных шрифтов TrueType создан для хранения информации о контуре символа как векторном изображении методом кривых П. Безье.

Математические модели прилегания геометрических фигур друг к другу в топологическом простанстве [45].

Прилегание (совпадение) двух прямых (m_{10}). Пусть на плоскости есть две прямые $A_0x + B_0y + C_0 = 0$ и $A_1x_1 + B_1y_1 + C_1 = 0$. Поскольку направляющие вектора этих прямых имеют соответственно координаты $B_0, -A_0$ и $B_1, -A_1$, а векторы коллинеарны тогда и только тогда, когда пропорциональны их координаты, то эти прямые параллельны тогда и только тогда, когда $\frac{A_0}{A_1} = \frac{B_0}{B_1}$.

Если прямые имеют общую точку $M_0(x_0, y_0)$, то ее координаты равны $x_0 = \frac{B_0C_1 - C_0B_1}{A_0B_1 - B_0A_1}$, $y_0 = \frac{C_0A_1 - A_0C_1}{A_0B_1 - B_0A_1}$.

Принадлежность точки области (m_{11}) [46]. Оптимальный по производительности и памяти — метод детализации триангуляции, элементарная процедура которого — триангуляция с ограничениями, которой подвергается прямоугольник со сторонами, параллельными координатным осям, охватывающий все N точек множества V. Триангуляция множества V — соединение его точек непересекающимися отрезками так, что каждый регион внутри выпуклой оболочки V — треугольник. Пусть задан плоский прямолинейных граф $G = (V, E)$. Триангуляцией с ограничениями $T(G)$ называется такая триангуляция множества точек V, что все ребра множества E также ребра триангуляции $T(G)$. Будем строить последовательность триангуляций $S_1, S_2, ..., S_{h(N)}$, где $S_1 = G$, а S_i получается из S_{i-1} по следующим правилам: 1) удалить некоторое множество внутренних несмежных вершин S_{i-1} и инцидентные им ребра; 2) вновь триангулировать многоугольники, образовавшиеся в результате удаления вершин и ребер. В результате $S_{h(N)}$ не имеет внутренних вершин и состоит из единственного треугольника. Начальный шаг состоит в локализации пробной точки в триангуляции S. Далее, если достигнут некоторый узел в структуре T (т. е. точка локализована $S_{h(N)}$ в соответствующем узлу треугольнике), то проверяется принадлежность пробной

точки всем потомкам этого узла. Так как точка принадлежит только одному из потомков, то данный шаг выполняется с новым узлом, и т. д., пока не будет достигнут узел, не имеющий потомков (т. е. точка локализована в одном из треугольников триангуляции S_1).

Касание окружности и линии (m_{12}) [*47*]. Если расстояние от центра до прямой больше радиуса, прямая не пересекает окружность (рис. 30, *а*). Если это расстояние меньше радиуса, прямая пересекает окружность в двух точках (рис. 30, *б*). Если расстояние равно радиусу, прямая имет с окружностью одну общую точку (рис. 30, *в*). В последнем случае прямая называется касательной к окружности.

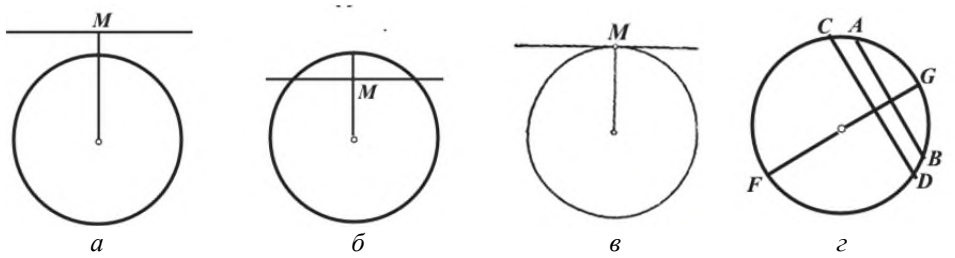


Рис. 30. Касание окружности и линии:
а — расстояние от центра до прямой больше радиуса; *б* — расстояние от центра до прямой меньше радиуса; *в* — расстояние от центра до прямой равно радиусу; *г* — диаметр и хорда окружности

Через точку, взятую на окружности, можно провести к ней *касательную* и только одну, причем эта касательная перпендикулярна к радиусу, проведенному в эту точку.

Касание окружности и окружности (m_{13}) [47]. Две окружности касаются друг друга (рис. 31), если они имеют только одну общую точку, потому что общая точка, через которую проходит общая касательная к окружностям, необходимо является точкой линии центров, и наоборот.

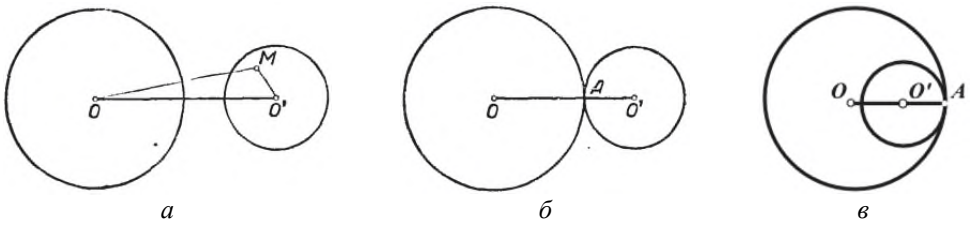
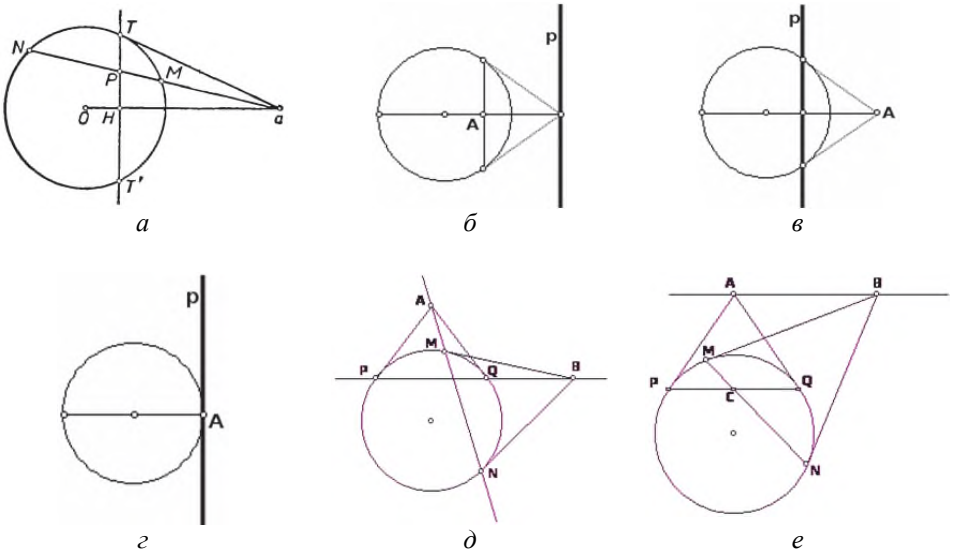


Рис. 31. Касание окружностей:
а — случай, когда две окружности расположены одна вне другой; *б* — случай, когда окружности касаются друг друга внешним образом; *в* — случай, когда окружности касаются друг друга внутренним образом

Пусть O, O' — центры двух окружностей, радиусы которых R, R': предположим для определенности, что $R' \le R$. Интересны три случая из пяти возможных: 1) $OO' > R + R'$; всякая точка, взятая внутри или на второй окружности — внешняя по отношению к первой, а всякая точка внутри или на первой окружности — внешняя по отношеннию ко второй; говорят, что две окружности, расположены одна вне другой (рис. 31, *а*); 2) $OO' = R + R'$; точка A общая; ко всякой другой точке можно применить предыдущие рассуждения; окружности касаются друг друга внешним образом (рис. 31, *б*); 3) $OO' = R - R'$; точка A их линий центров общая, так что окружности касаются; пусть M — точка, лежащая на окружности O' или внутри нее; будем иметь $OM \le OO' + O'M \le OO' + R'$, т. е. $OM \le R$; круг O' целиком, за исключением только точки A, находится внутри круга O; окружности касаются друг друга внутренним образом; говорят, что две окружности, касающиеся друг друга, имеют две общие точки, слившиеся между собой (рис. 31, *в*).

Полюса и поляры относительно окружности (m_{14}) [47]. Если через точку a, взятую в плоскости круга, провести секущую, пересекающую окружность в точках M и N, то геометрическое место точек P, гармонически сопряженных с точкой a относительно точек M и N, есть прямая линия. Прямая TT' называется полярой точки a относительно окружности, а точка a — полюсом этой прямой (рис. 32, *а*).



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 32. Полюса и поляры относительно окружности:
а — к определению поляры и полюса; *б* — случай, когда поляра расположена вне окружности; *в* — случай, когда поляра — касательная к окружности; *г*, *д*, *е* — случай, когда поляра — хорда окружности

Поляра точки a перепендикулярна к прямой, соединяющей эту точку с центром O окружности, и пересекает эту прямую в некоторой точке H, которая лежит по ту же сторону от центра, как и точка a, и определяется равенством $Oa \cdot OH = R^2$, где R — радиус окружности. Поляра пересекает окружность или нет, смотря по тому, лежит ли полюс вне или внутри окружности. Если точка a вне окружности, то полярой этой точки служит хорда, соединяющая точки прикосновения касательных, проходящих через эту точку (рис. 32, *б*).

Если точка a лежит на окружности, то определение поляры как геометрического места точек, теряет смысл. В этом случае точка H совпадает с точкой a и полярой является касательная в этой точке (рис. 32, *в*). Можно найти полюс если известна поляра. Если точка a лежит на поляре точки b, то, наоборот, последняя лежит на поляре точки a. Тогда точки a и b в этом случае называются сопряженными относительно окружности. Их поляры, т. е. две прямые, каждая из которых проходит через полюс другой, точно также называются сопряженными. Теорема позволяет переходить от свойств некторой фигуры F к свойствам другой фигуры F', взаимно-полярной (коррелятивной) данной.

Поскольку точки, симметричные относительно окружности, можно построить, проводя касательные, то касательные и поляры оказываются тесно связаны (рис. 32 *д*, *е*). В частности, если полюс лежит вне окружности, то для построения поляры достаточно провести пару касательных из полюса. Полярой будет прямая, проходящая через точки касания. Пусть *A* и *B* — две точки вне окружности. *AP, AQ, BM, BN* — касательные. Если прямая *PQ* проходит через точку *B*, то прямая *MN* — через точку *A*. Если прямая *AB* параллельна *PQ*, то прямая *MN* делит отрезок *PQ* пополам. Легко видеть, что в одном случае прямые *PQ* и *MN* являются полярами точек *A* и *B*, а в другом случае прямые *AB* и *MN* — поляры точек *C* и *B*.

8. Алгоритмы воспроизведения, распознавания и проверок интерактивной машинной графики

Машинная графика — создание, хранение и обработка моделей и их изображений с помощью цифрового процессора [48].

Интерактивная машинная графика — раздел машинной графики, занимающийся синтезом изображений, когда пользователь (зритель, оператор терминала) имеет возможность динамически управлять содержанием изображения, его формой, размерами и цветом на поверхности дисплея с помощью интерактивных устройств взаимодействия, например клавиатуры, мыши, трекбола и т. п. Интерактивная машинная графика наиболее естественное средство диалога «человек — ЭВМ».

Интерактивная машинная графика существенно расширяет «полосу пропускания» при общении человека с ЭВМ за счет разумного сочетания текста, статических и динамических изображений. Расширение «полосы пропускания» существенно влияет на наши возможности понимания оператором данных, выявления тенденций и визуализации существующих или воображаемых объектов. Графика обеспечивает рост производительности труда, повышение качества и точности результатов и снижение затрат на расчет и проектирование.

Алгоритм воспроизведения прямых и кривых линий и поверхностей второго порядка (a_1). Алгоритм Д. Е. Брезенхема для рисования фигур точками на плоскости широко применяется в машинной графике для рисования линий и окружностей на экране. Алгоритм определяет, какие точки двумерного растра необходимо закрасить, чтобы получить близкое приближение прямой линии между двумя заданными точками. Первоначально был разработан для цифровых графопостроителей. Алгоритм выбирает оптимальные растровые координаты для представления отрезка [49]. Алгоритм Брезенхема считается одним из наиболее быстродействующих, и он аппартно реализован практически во всех видеокартах [50].

Алгоритм заполнения контура (a_2) [51]. Определение внутренней части области, контур которой задан сторонами прямоугольника — одна из самых распространенных задач машинной графики и анализа изображений (например, алгоритм штриховки решает эту задачу), решаемая на основе анализа уравнений линий. В случае кривых второго порядка используется метод отображения заполняемого контура на дискретную плоскость и определения положения внутренней части области на основе значений яркости пикселов.

Ниже перечислены еще несколько алгоритмов машинной графики [51], используемые в исполнителе изографов:

разрезание произвольного многоугольника произвольной прямой — a_3,

пересечение двух многоугольников — a_4,

построение кривых по точкам с помощью B-сплайнов — a_5,

прореживание (воспроизведение «тонкости») на дискретной сетке — a_6,

распознавание формы объекта исходя из общей его структуры — a_7,

распознавание формы по контуру силуэта (углы, выступы и др.) — a_8,

сегментация и выделение однородных участков изхображения — a_9,

вычисление точки относительно прямой — a_{10},

проверка наличия пересечения двух отрезков прямых — a_{11},

координаты точки, определяемой пересечением двух прямых — a_{12},

вычисление отношения прилегания — $a_{15} - a_{19}$.

9. Алгоритмы афинных преобразований интерактивной машинной графики

Афинные (лат. *affinis* — соприкасающийся, близкий, смежный) преобразования на плоскости [52]. Афинная координатная система — репер, тройка некомпланарных векторов e_1, e_2, e_3, данных в определенном порядке и приложенных к точке O — началу репера [53]. Афинное отображение плоскости π на плоскость π' — состоит в том, что каждой точке M плоскости π ставится в соответствие точка M' плоскости π', которая относительно репера $O'e_1'e_2'$ имеет те же самые координаты, которые точка M имела относительно репера Oe_1e_2. Наиболее известны следующие алгоритмы перехода от одной афинной системы координат к другой с изменением начала координат:

преобразование точек — a_{20},

преобразование прямых линий — a_{21},

преобразование средней точки прямой линии — a_{22},

преобразование пересекающихся прямых — a_{23},

преобразование параллельных прямых — a_{24},

поворот фигуры — a_{25},

отражение фигуры — a_{26},

масштабирование фигуры — a_{27},

перемещение фигур — a_{28};

и следующие алгоритмы поддержки динамических эффектов в интерактивной машинной графике техники электроэнергетики [56]:

раскраска контура фигуры — a_{40},

изменение цвета внутренней области фигуры — a_{41},

мигание фигуры — a_{42},

появление фигуры — a_{43},

исчезновение фигуры — a_{44},

появлением символа события — a_{45},

увеличение толщины окантовки символа события — a_{46},

изменение цвета окантовки символа события на ярко-красный — a_{47},

мигание окантовки символа события — a_{48},

изменение заливки символа события — a_{49},

изменением фона области энергообъекта, где произошло событие — a_{50},

мигание окантовки области энергообъекта, на котором возникло событие — a_{51}.

Программная поддержка изографов для приложений технической семиотики реализуется на платформах MS Visual Studio и MS .NET Framework. Языки программирования C++ и Python, кросплатформенная библиотека виджетов для создания графического интерфейса GTK с версии 2.8 отрисовывающая все свои элементы интерфейса с помощью мощной библиотеки векторной графики Cairo, векторный движок Unreal Engine.

10. Изографы предметно-изобразительного кодирования знаний в технической семиотике

Изограф — это расширение плоского гиперграфа, по А. А. Зыкову, на естественное и немедленное восприятие субъектом отношений в двух независимых измерениях по X и Y в ортогональной системе координат и третьем (независимом от X и Y) измерении по Z энергии светового потока, по Ж. Бертену, и на метрическое пространство экранных координат интерактивной машинной графики и специфицирующие в топологии связные множества.

Онтологически предлагаемый ниже формализм изографов ограничен схематизацией ресурсов, их свойств и оперативных действий с ними в технических системах с высокой технологической динамикой, в частности электроэнергетические системы, сети и электроустановки.

Аналогично спецификации плоского гиперграфа [40] мы хотим дать разумное определение изографа, означающее следующее: 1) изограф допускает на топологической плоскости изображение, при котором каждая вершина представлена точкой, а каждое ребро — множеством, гомеоморфным кругу и содержащем все инцидентные (и только такие) вершины, причем налегание ребер разрешается лишь в непосредственной близости от общей инцидентной вершины; 2) не в ущерб естественности будем считать ребра представления замкнутыми (т. е. гомеоморфными кругу с границей); 3) ограничимся тремя основными онтологически осмысленными геометрическими формами представлений ребер: квадратная — схематизирует ресурс, треугольная — схематизирует свойство, пятиугольная стрелка — схематизирует действие, круг — схематизирует абстрактную, ментальную сущность; 4) изображение изографа на топологической плоскости характеризуется шестью визуальными переменными энергии светового потока по Ж. Бертену: формой, размером, текстурой, цветом, ориентацией и контрастом; 5) изограф допускает воспроизведение (исполнение) изображения на метрической плоскости в экранных координатах мониторов средств вычислительной техники.

Будем называть изографом следующий объект:

$$H = (X, U, V, W, M, Э; \mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \mathrm{P}_3),$$

где $X = \{x_i \,|\, i \in \overline{1, N_X}\}$ — множество точек-вершин; $U = \{u_{ij} \,|\, i, j \in \overline{1, N_U}\}$ — множество линий-ребер; $V = \{v_k \,|\, k \in \overline{1,6}\}$ — множество визуальных переменных по Ж. Бертену; $W = \{W_k \,|\, k \in \overline{1,6}\}$ — семейство множеств значений-градаций

визуальных переменных; $W_k = \{w_l \,|\, l \in \overline{1, N_{WK}}\}$ — множество значений-градаций v_k визуальной переменной; $M = \{M_1, M_2\}$ — семейство множеств математических моделей планиметрии, аналитической и вычислительной геометрии, топологии; $M_1 = \{m_1, m_2, ..., m_6\}$ — множество математических моделей нуль- и одномерных фигур в аналитической геометрии (разд. 7); $M_2 = \{m_{10}, m_{12}, m_{13}, m_{14}\}$ — множество математических моделей прилегания геометрических фигур друг к другу (раздел 7); $Э = \{A_Э, D_Э, X_Э, Y_Э\}$ — семейство множеств экранной системы координат метрического эвклидова пространства; $A_Э = \{A_{Э1}, A_{Э2}, A_{Э3}\}$ — семейство множеств алгоритмов интерактивной машинной графики; $A_{Э1} = \{a_1, a_2, ..., a_{12}\}$ — множество алгоритмов воспроизведения, распознавания и проверок интерактивной машинной графики (раздел 8); $A_{Э2} = \{a_{15}, a_{16}, ..., a_{19}\}$ — множество алгоритмов прилегания геометрических фигур друг к другу; $A_{Э3} = \{a_{20}, a_{21}, ..., a_{28}\}$ — множество алгоритмов афинных преобразований (раздел 9); $A_{Э4} = \{a_{40}, a_{41}, ..., a_{51}\}$ — множество алгоритмов поддержки динамических эффектов интерактивной машинной графики (раздел 9); $D_Э = \{{}^{V_1}D_Э, {}^{V_2}D_Э, ..., {}^{V_6}D_Э\}$ — семейство множеств исходных данных по каждой визуальной переменной для алгоритмов $a \in A_Э$; $X_Э = \{0,1,...,1023\}$, $Y_Э = \{0,1,...,767\}$ — множества экранных координат (натуральных чисел) по горизонтали и вертикали, соответственно, монитора с некоторым разрешением; P_1 — семейство множеств предикатов — инцидентор; P_2 — семейство множеств предикатов — визуализатор и P_3 — семейство множеств предикатов — исполнитель.

Множество вершин X изографа неоднородно и включает три подмножества вершин-точек планарной плоскости $X = \{{}^{Ф}X, {}^{K}X, {}^{B}X\}$, где ${}^{Ф}X = \{{}^{\bullet}X, {}^{-}X, {}^{\square}X, {}^{\triangle}X, {}^{\circ}X, {}^{\triangleright}X, {}^{T}X\}$ — множество формообразующих вершин, где ${}^{\bullet}X = \{{}^{\bullet}x\}$ — множество формоообразующих вершин области фигуры «точка», ${}^{-}X = \{{}^{-}x_1, {}^{-}x_2\}$ — фигуры «линия», ${}^{\square}X = \{{}^{\square}x_1, {}^{\square}x_2, {}^{\square}x_3, {}^{\square}x_4\}$ — фигуры «квадрат», ${}^{\triangle}X = \{{}^{\triangle}x_1, {}^{\triangle}x_2, {}^{\triangle}x_3\}$ — фигуры «треугольник», ${}^{\circ}X = \{{}^{\circ}x_1, {}^{\circ}x_2\}$ — фигуры «окружность», ${}^{\triangleright}X = \{{}^{\triangleright}x_1, {}^{\triangleright}x_2, {}^{\triangleright}x_3, {}^{\triangleright}x_4, {}^{\triangleright}x_5\}$ — фигуры «пятиугольная стрелка», ${}^{T}X = \{{}^{T}x_1, {}^{T}x_2, {}^{T}x_3, {}^{T}x_4\}$ — фигуры «текст»; ${}^{K}X = \{{}^{K}x_1, {}^{K}x_2, ..., {}^{K}x_{NK}\}$ — множество вершин контура ребра-фигуры, ${}^{B}X = \{{}^{B}x_1, {}^{B}x_2, ..., {}^{B}x_{NB}\}$ — множество вершин внутренней области ребра-фигуры.

Инцидентор $\mathrm{P}_1 = \{{}^{Ф}\mathrm{P}_1, {}^{K}\mathrm{P}_1, {}^{B}\mathrm{P}_1\}$ — семейство множеств предикатов, где

${}^{Ф}\mathrm{P}_1 = \{{}^{\bullet}\mathrm{P}_1, {}^{-}\mathrm{P}_1, {}^{\square}\mathrm{P}_1, {}^{\triangle}\mathrm{P}_1, {}^{\circ}\mathrm{P}_1, {}^{\triangleright}\mathrm{P}_1, {}^{T}\mathrm{P}_1\}$,

${}^{\bullet}\mathrm{P}_1 = \{{}^{\bullet}\rho_1(u_i, {}^{\bullet}x) \,|\, u_i \in U, {}^{\bullet}x \in {}^{\bullet}X\}$,

$$^{-}\mathrm{P}_1 = \{{}^{-}\rho_1(u_i, {}^{-}x_e) \big| u_i \in U,\ {}^{-}x_e \in {}^{-}X,\ e \in \{1,2\}\},$$

$$^{\square}\mathrm{P}_1 = \{{}^{\square}\rho_1(u_i, {}^{\square}x_e) \big| u_i \in U,\ {}^{\square}x_e \in {}^{\square}X,\ e \in \{1,...,4\}\},$$

$$^{\triangle}\mathrm{P}_1 = \{{}^{\triangle}\rho_1(u_i, {}^{\triangle}x_e) \big| u_i \in U,\ {}^{\triangle}x_e \in {}^{\triangle}X,\ e \in \{1,...,3\}\},$$

$$^{\circ}\mathrm{P}_1 = \{{}^{\circ}\rho_1(u_i, {}^{\circ}x_e) \big| u_i \in U,\ {}^{\circ}x_e \in {}^{\circ}X,\ e \in \{1,2\}\},$$

$$^{\triangleright}\mathrm{P}_1 = \{{}^{\triangleright}\rho_1(u_i, {}^{\triangleright}x_e) \big| u_i \in U,\ {}^{\triangleright}x_e \in {}^{\triangleright}X,\ e \in \{1,...,5\}\},$$

$$^{T}\mathrm{P}_1 = \{{}^{T}\rho_1(u_i, {}^{T}x_e) \big| u_i \in U,\ {}^{T}x_e \in {}^{T}X,\ e \in \{1,...,4\}\},$$

— множества предикатов инцидентора формы фигуры, $^{K}\mathrm{P}_1 = \{{}^{K}\rho_{1g}(u_i, {}^{K}x_c) \big| u_i \in U,\ {}^{K}x_c \in {}^{K}X, c \in \overline{1, NK}, g \in \overline{1, N_U}\}$ $^{K}\mathrm{P}_1 = \{{}^{K}\rho_{1g}(u_i, {}^{K}x_c) \big| u_i \in U,\ {}^{K}x_c \in {}^{K}X, c \in \overline{1, NK}, g \in \overline{1, N_U}\}$ — множество предикатов инцидентора контура формы фигуры, $^{B}\mathrm{P}_1 = \{{}^{B}\rho_{1t}(u_i, {}^{B}x_b) \big| u_i \in U,\ {}^{B}x_b \in {}^{B}X, b \in \overline{1, NB}, t \in \overline{1, N_U}\}$ — множество предикатов инцидентора внутренней области формы фигуры.

Каждой вершине $x_i \in X$ изографа H отнесем множество $U(x) \doteq U_H(x) \doteq \doteq \{u \in U \big| \mathrm{P}_1(x,u)\}$ всех инцидентных ей ребер, а каждому ребру $u \in U$ — множество $X(u) \doteq X_H(u) \doteq \{x \in X \big| \mathrm{P}_1(x,u)\}$ всех инцидентных ему вершин. Ниже приведены три матрицы $A_1^1(H) \doteq \left\| a_{1ij}^1 \right\|$, $A_1^2(H) \doteq \left\| a_{1ij}^2 \right\|$, $A_1^3(H) \doteq \left\| a_{1ij}^3 \right\|$, задающие инцидентор (рис. 33).

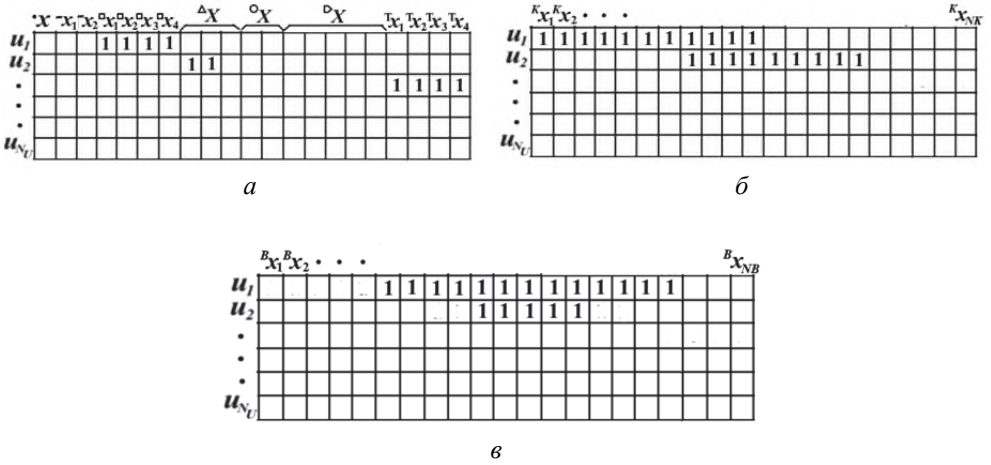


Рис. 33. Три булевы матрицы инцидентора изографа (нулевые элементы опушены):
а — матрица размера $N_U \times 21$ инцидентора формы фигуры;
б — матрица размера $N_U \times NK$ инцидентора контура формы фигуры;
в — матрица размера $N_U \times N_B$ инцидентора внутренней области формы фигуры

Значения элементов a^1_{1ij} булевой матрицы инцидентора формы фигуры $A^1_1(H) \doteq \left\| a^1_{1ij} \right\|$ вычисляются в зависимости от выполнения следующего условия:

$$^{\Phi}\rho_1(u_i, {}^{\Phi}x_j) = ({}^{\bullet}\rho_1(u_i, {}^{\bullet}x_j) = И) \vee ({}^{-}\rho_1(u_i, {}^{-}x_j) = И) \vee ({}^{\square}\rho_1(u_i, {}^{\square}x_j) = И) \vee$$

$$\vee {}^{\triangle}\rho_1(u_i, {}^{\triangle}x_j) = И) \vee ({}^{\circ}\rho_1(u_i, {}^{\circ}x_j) = И) \vee ({}^{\triangleright}\rho_1(u_i, {}^{\triangleright}x_j) = И) \vee ({}^{T}\rho_1(u_i, {}^{T}x_j) = И),$$

$$a^1_{1ij} = \begin{cases} 1, {}^{\Phi}\rho_1(u_i, {}^{\Phi}x_j) = истина, \\ 0, {}^{\Phi}\rho_1(u_i, {}^{\Phi}x_j) = ложь. \end{cases}.$$

Значения элементов a^2_{1ij}, a^3_{1ij} булевых матриц инцидентора $A^2_1(H) \doteq \left\| a^2_{1ij} \right\|$, $A^2_1(H) \doteq \left\| a^3_{1ij} \right\|$ контура фигуры и ее внутренней области, соответственно вычисляются в зависимости от выполнения следующих условий:

$$a^2_{1ij} = \begin{cases} 1, {}^{K}\rho_1(u_i, {}^{K}x_j) = истина, \\ 0, {}^{K}\rho_1(u_i, {}^{K}x_j) = ложь, \end{cases} \qquad a^3_{1ij} = \begin{cases} 1, {}^{B}\rho_1(u_i, {}^{B}x_j) = истина, \\ 0, {}^{B}\rho_1(u_i, {}^{B}x_q) = ложь. \end{cases}$$

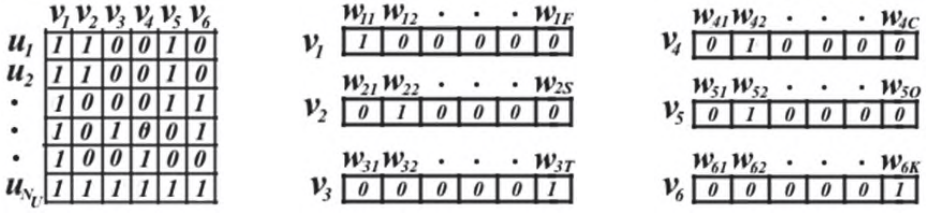
Матрицы $A^1_1(H) \doteq \left\| a^1_{1ij} \right\|$, $A^2_1(H) \doteq \left\| a^2_{1ij} \right\|$, $A^3_1(H) \doteq \left\| a^3_{1ij} \right\|$ специфицируют форму ребра в топологическом пространстве и обладают интересными свойствами. Количество единиц по строкам матрицы $A^1_1(H) \doteq \left\| a^1_{1ij} \right\|$ равно мощностям соответствующих множеств ${}^{\Phi}X, {}^{K}X, {}^{B}X$. Если фигуры примкнули контурами, то должны совпадать несколько точек из множества ${}^{K}X$. Если примкнули две фигуры, то в матрице $A^2_1(H) \doteq \left\| a^2_{1ij} \right\|$ сумма элементов по соответствующим точкам-столбцам должна быть равна двум. Если фигуры примкнули так, что одна находится внутри другой, то по матрице $A^3_1(H) \doteq \left\| a^3_{1ij} \right\|$ видно, внутренняя область какой фигуры находится внутри внутренней области другой фигуры. Если сумма единиц по столбцам не более единицы, то это означает, что изограф отображает единственную фигуру или что фигуры примыкают внешним образом.

Визуализатор P_2 — семейство трех множеств предикатов $\mathrm{P}_2 = \{{}^{\Phi}\mathrm{P}_2, {}^{K}\mathrm{P}_2, {}^{B}\mathrm{P}_2\}$, где ${}^{\Phi}\mathrm{P}_2 = \{{}^{\Phi}\rho_{2t}(u_i, v_j, w_{jm}) | u_i \in U, v_j \in V, w_{jm} \in W_j, \quad i = \{1,2,...,N_U\}, j = \{1,2,...,6\}, m \in \overline{1, N_{Wj}}, t \in \overline{1,7})\}$ — множество из семи предикатов визуализатора формы фигуры, ${}^{K}\mathrm{P}_2 = \{{}^{K}\rho_{2t}(u_i, v_j, w_{jm})\}$ — множество из семи предикатов визуализатора контура формы фигуры, ${}^{B}\mathrm{P}_2 = = \{{}^{B}\rho_{2t}(u_i, v_j, w_{jm})\}$ — множество из семи предикатов визуализатора внутренней области формы фигуры, где $V = \{v_1, v_2, ..., v_6\}$ — множество визуальных переменных по Ж. Бертену, v_1 — форма, v_2 — размер, v_3 — текстура, v_4 — цвет, v_5 — ориентация,

v_6 — контраст. Визуальная переменная $v_j \in V \left| j \in \overline{1,6} \right.$ принимает значение w_{jm} на соответствующих множествах $V_1 = \{V_1^0, V_1^n\}$, $V_2 = \{w_{21}, w_{22}, ..., w_{2S}\}$, $V_3 = \{w_{31}, w_{32}, ..., w_{3T}\}$, $V_4 = \{w_{41}, w_{42}, ..., w_{4C}\}$, $V_5 = \{w_{51}, w_{52}, ..., w_{5O}\}$, $V_6 = \{w_{61}, w_{62}, ..., w_{6K}\}$.

Рассмотрим подробнее $V_1 = \{V_1^0, V_1^n\}$. Оно включает два множества, где $V_1^0 = \{{}^{\bullet}w_{11}^0, {}^{-}w_{12}^0, {}^{\square}w_{13}^0, {}^{\triangle}w_{14}^0, {}^{\circ}w_{15}^0, {}^{\triangleright}w_{16}^0, {}^{T}w_{17}^0\}$ — множество базовых символов форм, что обозначено нулем в качестве правого верхнего индекса. В качестве левого верхнего индекса использован соответствующий символ, где ${}^{\bullet}w_{11}^0$ — форма *точка*, ${}^{-}w_{12}^0$ — форма *линия*, ${}^{\triangle}w_{13}^0$ — форма *треугольник*, ${}^{\square}w_{14}^0$ — форма *квадрат* (*прямоугольник*), ${}^{\circ}w_{15}^0$ — форма *окружность* (*овал*), ${}^{\triangleright}w_{16}^0$ — форма *пятиточечная стрелка* (*стрелка*), ${}^{T}w_{17}^0$ — форма *текст*. Поскольку базовые формы могут комбинироваться друг с другом, например по правилам исполнения операций над изографами, то результирующая форма-комбинация будет отнесена в множество $V_1^n = \{{}^{\square}w_{11}^n, {}^{\square}w_{12}^n, ..., {}^{\square}w_{1A}^n, {}^{\triangle}w_{11}^n, {}^{\triangle}w_{12}^n, ..., {}^{\triangle}w_{1B}^n, {}^{\triangleright}w_{11}^n, {}^{\triangleright}w_{12}^n, ..., {}^{\triangleright}w_{1\Gamma}^n\}$ — производных (сложных) форм, где $n \in \{1, 2, ..., N\}$ N — уровень сложности формы (если сложная форма содержит только базовые формы, то $n = 1$, если она содержит хотя бы одну форму первого уровня, то $n = 2$ и т. д.) . Число элементов $V_2 - V_6$ ограничено, мощности этих множеств психологически обоснованы и рассмотрены, например, в [56].

Трехместный предикат $\rho_{2t}(u_i, v_j, w_{jm})$ как композиция двух предикатов $\rho_{2t}(u_i, v_j, w_{jm}) = \rho_{2t}(u_i, v_j) \circ \rho_{2t}(v_j, w_{jm})$ задается прямоугольной матрицей порядка $N_U \times 6$ и шестью матрицами-строками, соответствующим шести визуальным переменным и с числом столбцов, соответствующим мощности множества значений соответствующей визуальной переменной (рис. 34). Таким образом, в общей сложности визуализатор изографа задается тремя матрицами $A_2(H) \doteq \left\| a_{2ij} \right\|$ и девятью матрицами-строками $A_{2w}(H) \doteq \left\| a_{2wj} \right\|$.



а *б* *в*

Рис. 34. Матричное представление визуализатора изографа:
а — матрица $A_2(H) \doteq \left\| a_{2ij} \right\|$ спецификации отношения инцидентности ребер изографа и визуальных (изобразительных, ретривиальных) переменных по Ж. Бертену);
б — матрицы спецификации значений визуальных переменных $A_{2w}(H) \doteq \left\| a_{2wj} \right\|$

Элементы булевых матриц принимают значения в зависимости от следующих условий:

$$a_{2ij}=\begin{cases}1, & \rho_{2t}(u_i,v_j)=истина,\\ 0, & \rho_{2t}(u_i,v_j)=ложь,\end{cases}\qquad a_{2uj}=\begin{cases}1, & \rho_{2t}(v_j,w_{jm})=истина,\\ 0, & \rho_{2t}(v_j,w_{jm})=ложь.\end{cases}$$

Истинность предикатов $\rho_{2t}(u_i,v_j)$, $\rho_{2t}(v_j,w_{jm})$ интерпретируется «визуальная переменная v_j используется в образном представлении ребра u_i» и «визуальная переменная v_j приняла значение w_{jm}» соответственно.

Исполнитель P_3 — семейство трех множеств предикатов $\mathrm{P}_3=\{{}^{\Phi}\mathrm{P}_3,\ {}^{K}\mathrm{P}_3,\ {}^{B}\mathrm{P}_3\}$, где

$${}^{\Phi}\mathrm{P}_3=\{{}^{\Phi}\rho_3(u_i,m_j,a_{Эk},d_{Эl})\,|\,u_i\in U,\ m_j\in M_1,\ a_{Эk}\in A_{Э1},$$
$$d_{Эl}=({}^{V_1}d_{Эl},\ {}^{V_2}d_{Эl},...,\ {}^{V_6}d_{Эl})\in {}^{V_1}D_Э\otimes {}^{V_2}D_Э\otimes,...,\otimes\ {}^{V_6}D_Э,$$
$${}^{V}d_{Эl}=(x_{Э_l},y_{Э_l})\in X_Э\otimes Y_Э,\ i=\{1,2,...,N_U\},\ j=\{1,2,...,6\},\ Эk\in\overline{1,12}\},$$

$${}^{K}\mathrm{P}_3=\{{}^{K}\rho_3(u_i,m_j,a_{Эk},d_{Эl})\,|\,u_i\in U,\ m_j\in M_1,\ a_{Эk}\in A_{Э1}\cup A_{Э4},$$
$$d_{Эl}=({}^{V_1}d_{Эl},\ {}^{V_2}d_{Эl},...,\ {}^{V_6}d_{Эl})\in {}^{V_1}D_Э\otimes {}^{V_2}D_Э\otimes,...,\otimes\ {}^{V_6}D_Э,$$
$${}^{V}d_{Эl}=(x_{Э_l},y_{Э_l})\in X_Э\otimes Y_Э,\ i=\{1,2,...,N_U\},\ j=\{1,2,...,6\},\ Эk\in\{1,2,...,12,40,41,...,51\}\},$$

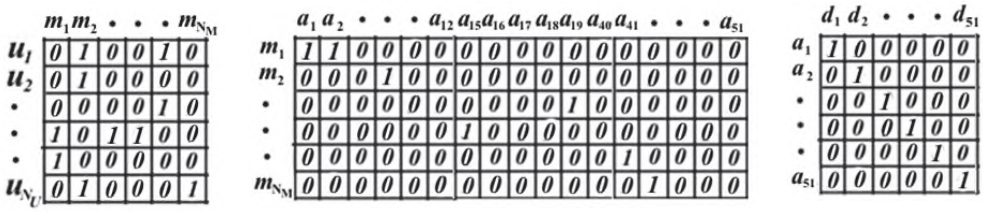
$${}^{B}\mathrm{P}_3=\{{}^{B}\rho_3(u_i,m_j,a_{Эk},d_{Эl})\,|\,u_i\in U,\ m_j\in M_1,\ a_{Эk}\in A_{Э1}\cup A_{Э4},$$
$$d_{Эl}=({}^{V_1}d_{Эl},\ {}^{V_2}d_{Эl},...,\ {}^{V_6}d_{Эl})\in {}^{V_1}D_Э\otimes {}^{V_2}D_Э\otimes,...,\otimes\ {}^{V_6}D_Э,$$
$${}^{V}d_{Эl}=(x_{Э_l},y_{Э_l})\in X_Э\otimes Y_Э,\ i=\{1,2,...,N_U\},\ j=\{1,2,...,6\},\ Эk\in\{1,2,...,12,40,41,...,51\}\},$$

где ${}^{V}d_{Эl}$ — экранные координаты точки (пикселя). Четырехместный предикат $\rho_3(u_i,m_j,a_{Эk},d_{Эl})=\rho_3(u_i,m_j)\circ\rho_3(m_j,a_{Эk})\circ\rho_3(a_k,d_{Эl})$ — композиция трех двухместных предикатов и задается тремя матрицами $A_3^1(H)\doteq\left\|a_{3ij}^1\right\|$, $A_3^2(H)\doteq\left\|a_{3ij}^2\right\|$, $A_3^3(H)\doteq\left\|a_{3ij}^3\right\|$ (рис. 35).

Элементы булевых матриц принимают значения в зависимости от выполнения следующих условий:

$$a_{3ij}^1=\begin{cases}1,\ \rho_3(u_i,m_j)=истина,\\ 0,\ \rho_3(u_i,m_j)=ложь,\end{cases}\qquad a_{3ij}^2=\begin{cases}1,\ \rho_3(m_j,a_{Эk})=истина,\\ 0,\ \rho_3(m_j,a_{Эk})=ложь,\end{cases}$$

$$a_{3ij}^3=\begin{cases}1,\ \rho_3(a_k,d_{Эl})=истина,\\ 0,\ \rho_3(a_k,d_{Эl})=ложь.\end{cases}$$



а *б* *в*

Рис. 35. Матричное представление исполнителя:
а — матрица спецификации отношения инцидентности ребер изографа и их математических моделей $A_3^1(H) \doteq \left\| a_{3ij}^1 \right\|$; *б* — матрица спецификации отношения инцидентности математических моделей ребер-фигур и алгоритмов машинной графики — $A_3^2(H) \doteq \left\| a_{3ij}^2 \right\|$; *в* — диагональная квадратная матрица алгоритмов машинной графики и кортежей исходных данных для них — $A_3^3(H) \doteq \left\| a_{3ij}^3 \right\|$

Истинность предиката $\rho_3(u_i, m_j)$ интерпретируется следующим образом: «ребру-фигуре соотнесена одна или несколько математических моделей». Истинность предиката $\rho_3(m_j, a_{Эk})$ интерпретируется следующим образом: «есть алгоритмы один или несколько, реализованные программно для воспроизведения на экране монитора ребра-фигуры». Истинность предиката $\rho_3(a_k, d_{Эl})$ интерпретируется следующим образом: «для алгоритмов заданы исходные данные, которые, будучи введены в компьютер и использованы соответствующими алгоритмам программами в вычислениях, воспроизведут на экране монитора ребро-фигуру».

11. Операции примыкания и свертки-развертки на изографах

Операции на изографах включают операции, присущие гиперграфам [36]. Для разработки схематизированных представлений в [36] используются 14 операций над гиперграфами: добавления и удаления вершин, добавления и удаления ребер, стягивания ребер, подразбиения ребра, формирование части подграфа, свертка множества вершин, дефакторизация вершины, добавление части до графа, объединения и пересечения графов и др. Однако в схематизированных представлениях изографами есть несколько специфических операций, две из которых: примыкание форм-ребер и свертка-развертка рассмотрены ниже.

Примыкание форм-ребер изографа устанавливает ролевые визуальные отношения [3], схематизирующие отношения (связи, взаимосвязи) ресурсов, свойств и действий между элементами множества $V_1^0 = \{ {}^{\bullet}w_{11}^0, {}^{-}w_{12}^0, {}^{\square}w_{13}^0, {}^{\triangle}w_{14}^0, {}^{\circ}w_{15}^0, {}^{\triangleright}w_{16}^0, {}^{T}w_{17}^0 \}$ базовых форм.

Пусть имеем два одноребериых изографа

$$H' = (X', U', V', W', M', A', D', X'_{\Im}, Y'_{\Im}; \mathrm{P}'_1, \mathrm{P}'_2, \mathrm{P}'_3) \Big| X' \supset {}^{\Phi}X' = \{{}^{\square}X\}$$

и $H'' = (X'', U'', V'', W'', M'', A'', D'', X''_{\Im}, Y''_{\Im}; \mathrm{P}''_1, \mathrm{P}''_2, \mathrm{P}''_3) \Big| X'' \supset {}^{\Phi}X'' = \{{}^{\triangle}X\}$.

Их изображение в топологии приведено на рисунке 36, *а*. На рисунке 36, *б* дан изограф ролевого визуального отношения «ресурс иметь свойство» как результат операции слияния двух форм (квадрата и треугольника) одной стороной, алгебраически означающей, что построен изограф $H = H' \prod H''$, где $\prod$ — знак операции примыкания, и в его множество V_1^n добавлен элемент ${}^{\square}w_{11}^1$, т. е. ${}^{\square}w_{11}^1 \in V_1^n$.

а) б) в) г) д)

Рис. 36. Операция примыкания двух одноребериых изографов H' и H'':
а — H' — изограф символизирующий «ресурс», H'' — изограф, символизирующий «свойство»; *б* — изограф ролевого визуального отношения «ресурс иметь свойство» как результат операции примыкания двух форм (квадрата и треугольника) одной стороной; *в* — вариант пятикратного исполнения операции примыкания изографов: «ресурс, имеющий пять свойств»; *г* — вариант изографа ролевого визуального отношения «ресурс иметь свойство»; *д* — вариант четырехкратного исполнения операции примыкания изографов: «ресурс имеющий четыре свойства»; при этом автоматически сформировалось еще четыре ролевых визуальных отношения «свойство-свойство», как результат операции примыкания форм треугольников двумя сторонами

Рассмотрим изограф H на рисунке 36, *б* содержательно. Для этого обратимся к воспроизведению (исполнению) его изображения на метрической плоскости в экранных координатах компьютерного монитора на рисунке 37. Оно имеет семь вершин-точек и два ребра-фигуры: квадрат и треугольник. При этом имеют место два факта: 1) множество точек внутренней области ребра-треугольника и множества точек двух сторон его контура — подмножество точек внутренней области ребра-квадрата; 2) множество точек линии x_5x_7 контура третьей стороны ребра-треугольника — подмножество точек линии x_4x_3 стороны квадрата. Можно также заметить еще несколько менее существенных фактов, например: положение линии x_5x_7 на линии x_4x_3 (или положение точек x_5, x_7 относительно друг друга и точек x_4, x_3), положе-

ние точки x_6 относительно множества точек внутренней области квадрата и др. Однако в условиях интерактивной машинной графики отдадим управление подобными композиционными фактами пользователю, как, например, показано на рис. 36, *в—д*.

Эти факты позволяют сформулировать правило вычисления ролевого визуального отношения «ресурс *иметь* свойство»:

$$\forall H', H''(x_i^{'} \in {}^{\square}X^{'} \,|\, i \in \overline{1,4} \wedge x_i^{''} \in {}^{\triangle}X^{'} \,|\, i \in \overline{5,7} \wedge {}^{K}X^{'}_{x_4,x_3} \subset {}^{K}X^{'} \wedge {}^{K}X^{''}_{x_5,x_7} \subset {}^{K}X^{''} \wedge$$

$$\wedge {}^{K}X^{'}_{x_4,x_3} \subset {}^{K}X^{''}_{x_5,x_7} \wedge x_6 \in {}^{B}X^{''} \to \alpha \cup \beta \in H \,|\, \alpha \in \{X', U', ..., Y_{\Э}^{'}\}, \beta \in$$

$$\in \{X'', U'', ..., Y_{\Э}^{''}\}, \alpha \neq \beta, {}^{\square}w_{11}^{1} \in V_1^n \,|\, V_1^n \in H,$$

где ${}^{K}X'_{x_4,x_3}$ — множество точек линии x_4x_3 стороны контура ребра-квадрата; ${}^{K}X''_{x_5,x_7}$ — множество точек линии x_5x_7 контура третьей стороны ребра-треугольника.

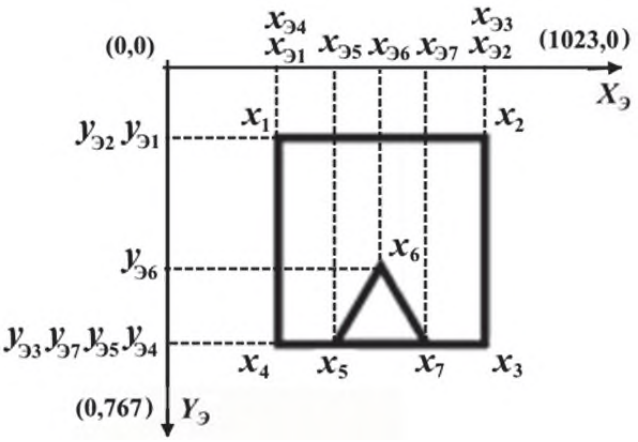


Рис. 37. Изображение изографом $H = H' \prod H''$ ролевого визуального отношения «ресурс *иметь* свойство» на метрической плоскости в экранных координатах компьютерного монитора

На рисунке 38 изображены: изографы одноребериых базовых форм, включая форму «ТЕКСТ», единственное ребро-форма, которая специфицируется пользователем на множестве точек ${}^{B}X$ остальных базовых форм без выполнения операции примыкания (рис. 38, *а*); изографы многореберных сложных форм (рис. 38, *б—г*); изограф многоролевого визуального отношения — схематизированное представление ресурса (рис. 38, *д*); изограф многоролевого визуального отношения — схематизированное представление свой-

ства (рис. 38, *е*); изограф многоролевого визуального отношения «действие *иметь местом* ресурс» (рис. 38, *ж*); изограф многоролевого визуального отношения — схематизированное представление действия (рис. 38, *з*).

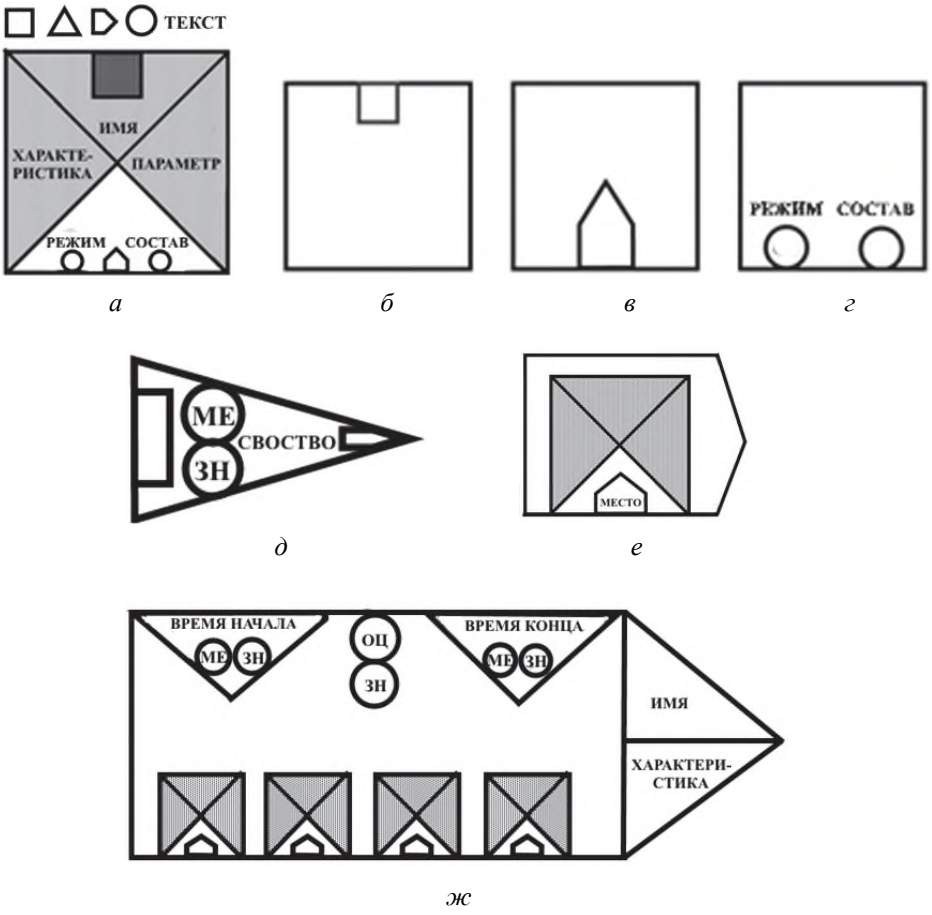


Рис. 38. Изографы:
а — изографы одногореберных базовых форм; *б* — изографы многогореберных сложных форм: изограф ролевого визуального отношения «ресурс *быть* ресурс»; *в* — изограф ролевого визуального отношения «ресурс *быть предназначенным для* действие»); *г* — изограф многоролевого визуального отношения «ресурс *иметь состояние* (*режим*) состояние ∧ ресурс *иметь в составе* ресурс»; *д* — изограф многоролевого визуального отношения «ресурс *быть* ресурс ∧ ресурс *иметь (свойство) имя* именное свойство ∧ ресурс *иметь (свойство) параметр* параметр ∧ ресурс *иметь (свойство) характеристику* характеристика ∧ ресурс *быть предназначенным для* действие ∧ ресурс *иметь (режим) состояние* состояние ∧ ресурс *иметь в составе* ресурс»; *е* — изограф свойства как многоролевого визуального отношения «свойство *быть свойством* ресурс ∧ свойство *быть свойством* действие ∧ свойство *иметь меру* мера ∧ свойство *иметь значение* значение ∧ значение *иметь меру* мера»; *ж* — изограф многоролевого визуального отношения «действие *иметь местом* ресурс»; *з* — изограф действия, многоролевого визуального отношения, где ОЦ — оценка, МЕ — мера, ЗН — значение

Операция свертки-развертки специфицирована на двухзвенной модели мыслительной деятельности человека-оператора (разд. 2). В [2] рассмотрено СВ-кодирование в языке описания отношений и связей, грамматики тождественных преобразований и функциональной деформации когнитивного образа состояния объекта управления. Знаки этого языка упорядочены в несколько уровней, из которых в настоящей работе обратимся к языку второго уровня $L_2\left(X^0, {}^1R_{ij}^{\text{п}}, (,), \mathcal{P}^2\right) = \left\{ {}^i x_k \right\}$ как множеству производных знаков $X = \left\{ {}^1x_1, {}^1x_2, \ldots, {}^1x_\eta, {}^2x_1, {}^2x_2, \ldots, {}^2x_\varphi, {}^3x_1, {}^3x_2 \ \ldots, {}^3x_\psi \right\}$, получаемых из $X^0, {}^1R_{ij}^{\text{п}}, (\ ,)$ по правилам $\mathcal{P}^2$ и обозначающих простые ресурсы ${}^1X = \left\{ {}^1x_1, {}^1x_2, \ldots, {}^1x_\eta \right\}$, свойства ${}^2X = \left\{ {}^2x_1, {}^2x_2, \ldots, {}^2x_\varphi \right\}$ и действия ${}^3X = \left\{ {}^3x_1, {}^3x_2, \ldots, {}^3x_\psi \right\}$, причем $X = \{{}^1X, {}^2X, {}^3X\}$, и языку третьего уровня $L_3\left(X^0, X\ , {}^5R_{ij}^{\text{п}}, (,), \mathcal{P}^3\right) = \left\{ {}^i x_k^n \right\}$ как множеству производных знаков $\{ {}^1x_1^n, {}^1x_2^n, \ldots, {}^1x_\eta^n, {}^2x_1^n, {}^2x_2^n, \ldots, {}^2x_\varphi^n, {}^3x_1^n, {}^3x_2^n, \ldots, {}^3x_\psi^n \} = X^n$, получаемых из $X^0, X\ , {}^5R_{ij}^{\text{п}}, (,)$ по правилу $p_1^3 \in \mathcal{P}^3$ и обозначающих сложные ресурсы, свойства и действия.

Для спецификации свертки-развертки изографов будем полагать, что установлены следующие соответствия:

$$ {}^{1\square}\Psi : {}^1X \to {}^{\square}H, \quad {}^{2\triangle}\Psi : {}^2X \to {}^{\triangle}H, \quad {}^{3\triangleright}\Psi : {}^3X \to {}^{\triangleright}H, $$

где ${}^{\square}H = \{{}^{\square}H_1, {}^{\square}H_2, ..., {}^{\square}H_\eta\}$, ${}^{\triangle}H = \{{}^{\triangle}H_1, {}^{\triangle}H_2, ..., {}^{\triangle}H_\varphi\}$, ${}^{\triangleright}H = \{{}^{\triangleright}H_1, {}^{\triangleright}H_2, ..., {}^{\triangleright}H_\psi\}$ — множества изографов (ПИ-кодов) простых ресурсов, свойств и действий, соответственно и соответствия

$$ {}^{1\square}\Psi^n : {}^1X^n \to {}^{\square}H^n, \quad {}^{2\triangle}\Psi^n : {}^2X^n \to {}^{\triangle}H^n, \quad {}^{3\triangleright}\Psi^n : {}^3X^n \to {}^{\triangleright}H^n, $$

где ${}^{\square}H^n = \{{}^{\square}H_1^n, {}^{\square}H_2^n, ..., {}^{\square}H_\eta^n\}$ ${}^{\triangle}H^n = \{{}^{\triangle}H_1^n, {}^{\triangle}H_2^n, ..., {}^{\triangle}H_\varphi^n\}$ ${}^{\triangleright}H^n = \{{}^{\triangleright}H_1^n, {}^{\triangleright}H_2^n, ..., {}^{\triangleright}H_\psi^n\}$ — множества изографов сложных ресурсов, свойств и действий соответственно. Рассмотрим их свойства: они всюду определены, сюръективны, функциональны, однако образу, т. е. изографу, схематизированному изображению (шаблону), ПИ-коду можно сопоставить подмножество прообразов, т. е. высказываний на языке СВ-кодов. В нашем случае это означает, что: 1) СВ-кодовые представления могут быть автоматически переведены на язык ПИ-кодов, но не наоборот; 2) первыми должны быть сформированы в памяти компьютера СВ-кодовые, прообразные представления; 3) далее формируются ПИ-кодовые, образные представления (или используются уже готовые); 4) вычисляются рассмотренные выше соответствия; 5) становятся возможными вычисления операции свертки-развертки на изографах.

Свертку-развертку изографов (см. рис. 39, на с. 213) рассмотрим на примере знака сложного ресурса «линия электропередачи» ${}^1x^n \in {}^1X^n$, СВ-кодовое представление которого в терминах словарей базовых понятий и отношений (выделены жирным шрифтом) выглядит следующим образом:

«линия электропередачи = ***быть*** *электроустановка* ***иметь имя*** ((*номер ВЛ-325*) (*диспетчерское наименование ВЛ 330 кВ Битенай-Советск № 1*)) ***иметь параметр*** *(номинальный ток выключателя (* ***иметь единицу измерения*** *А* ***иметь значение*** *2000*) (*номинальный ток разъединителя* (***иметь единицу измерения*** *А* ***иметь значение*** *2000*)) (*номинальный ток трансформатора* (*иметь единицу измерения А иметь значение 2000*)) (*наибольший ток трансформатора* (***иметь единицу измерения*** *А* ***иметь значение*** *2000*)) (*номинальный ток ВЧ заградителя* (***иметь единицу измерения*** *А* ***иметь значение*** *2000*)) (*длительная допустимая токовая нагрузка проводов при* $0^0 C$ (***иметь единицу измерения*** *А* ***иметь значение*** *1914*)) (*длительная допустимая токовая нагрузка проводов при* $+25^0 C$ (***иметь единицу измерения*** *А* ***иметь значение*** *1448*)) ***иметь характеристику*** ((*год ввода в эксплуатацию 1971*) (*тип воздушная*)(*марка провода ошиновки 2хАС-300*)(*марка провода ЛЭП 2хАСО-300/39*)) ***иметь в составе*** (*провод, траверса, изолятор, арматура, опора, грозозащитный трос, разрядник, заземление, секционирующее устройство, молниезащита, птицезащитное устройство, гаситель вибрации, канал связи, ВЧ заградитель, устройство плавки гололеда*) ***быть предназначенным для*** (*передача электроэнергии*) ***иметь состояние (режим)*** (*нормальный*)*».* Представление состава линии электропередачи дано абстрактно, неполным списком ресурсов, составляющих ее оборудование.

После формирования в человеко-машинной системе знаков нулевого уровня и знака ${}^1x^n \in {}^1X^n$, формирования изографа (рис. 38, *д*) и установления соответствия ${}^{1\square}\Psi^n$ имеем изограф на рис. 39, *а*.

Его семантика туманна, хотя интуитивно ясно, что это знак ресурса, относящегося к электроустановкам, у которого четыре характеристических свойства, семь параметров, включающего другие ресурсы-части и находящегося в некотором режиме (состоянии). Семантика может быть раскрыта и стать понятнее, если интерактивно пользователь укажет на внутреннюю область треугольника с текстом «ИМЯ». Далее произойдет следующее: 1) фигура этого треугольника символически повернется на 180^0 вокруг верхней стороны квадрата, обозначая «развертку» изографа, и над верхней стороной квадрата розовым цветом отобразится текст (кроме круглых скобок), указанный в ${}^1x^n \in {}^1X^n$ после отношения ***иметь имя*** в круглых скобках; 2) цвет текста «ИМЯ» в треугольнике изменится с черного на розовый. Похожее произойдет, если пользователь укажет на внутреннюю область треугольника с текстом «ХАРАКТЕРИТИКА (4)», с той лишь разницей, что развертка выполнится относительно левой вертикальной стороны квадрата, а текст отобразится слева от нее. Для того чтобы свернуть гиперграф по ролевому визуальному отношению «ресурс *иметь* (*свойство*) *характеристику* характеристика» достаточно указать на любую точку внутренней области соответствующего треугольника (рис. 39, *в*).

На рисунке 39, *в* изограф свернут по отношению «ресурс иметь (свойство) характеристику характеристика» и развернут по отношению «ресурс иметь состав ресурс».

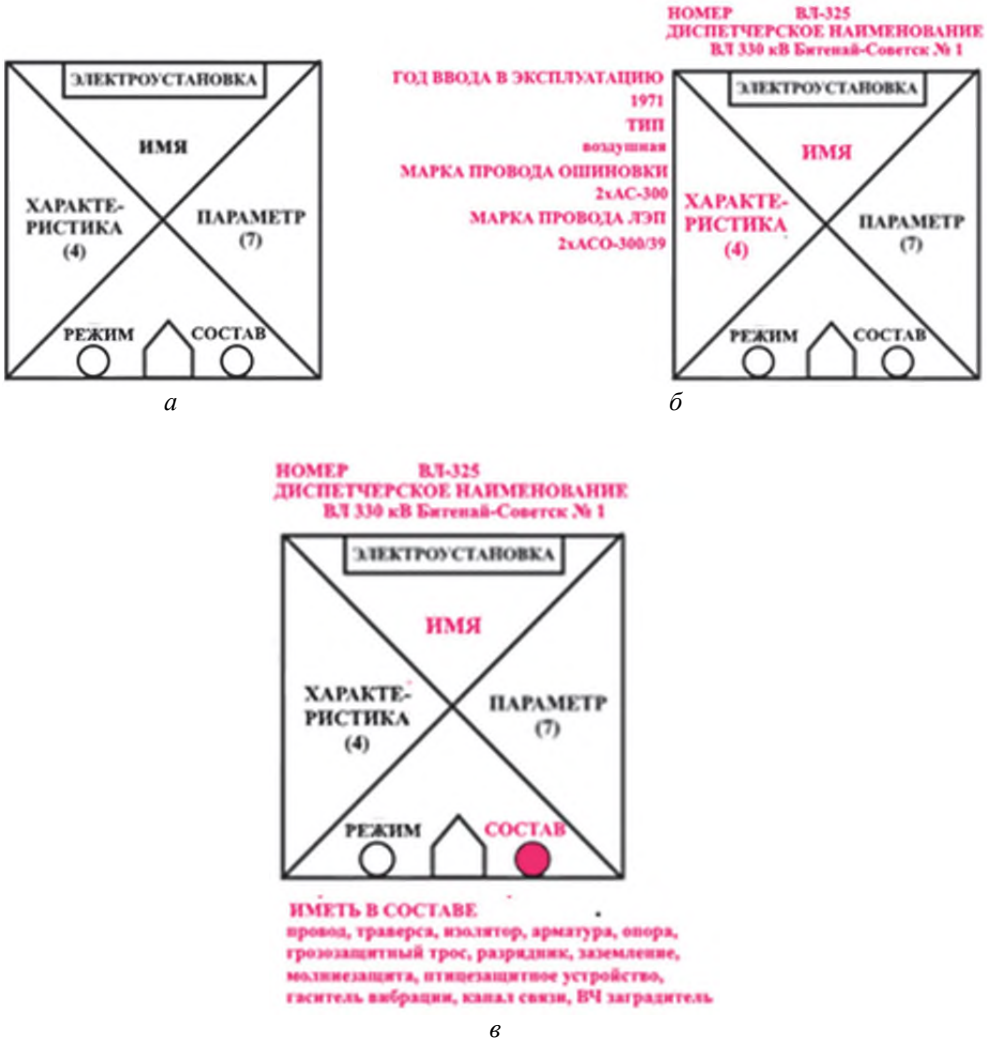


Рис. 39. Пример выполнения операции вертки-развертки изографа сложного ресурса «линия электропередачи»:

а — изограф сложного ресурса после установления соответствия ${}^{1\square}\Psi^{n}$ с именем, четырьмя характеристиками, семью параметрами, предназначением для выполнения действий, составом и состоянием (режимом) в текущий момент времени; *б* — развертка изографа сложного ресурса, запрошенная пользователем и полученная отображением на экране фрагмента знака «линия электропередачи» по отношению «*иметь имя*» выше стороны фигуры «квадрат», на которой выполнена операция примыкания фигуры треугольника — «свойство имя», а также развертка изографа сложного ресурса, запрошенная пользователем и полученная отображением на экране фрагмента знака «линия электропередачи» по отношению «*иметь характеристику*» слева от стороны фигуры «квадрат», на которой выполнена операция примыкания фигуры треугольника — «свойство характеристика»; *в* — свертка-развертка изографа сложного ресурса: изограф свернут по ролевому визуальному отношению «ресурс *иметь* (*свойство*) *характеристику* характеристика» и развернут по ролевому визуальному отношению «ресурс *иметь в составе* ресурс»

Иными словами, развертку изографа можно сравнить с действиями художника, который выбирает надпись под картиной с тем, чтобы информативнее раскрыть содержание ее образа для зрителя. Со временем, по мере накопления опыта, пользователь сможет работать с именованной схемой ресурса и воспроизведением его состояния.

Заключение

Настоящая работа содержит результаты моделирования когнитивных механизмов схематизации предметно-изобразительных представлений (внутренней формы слова) Н.И. Жинкина, делающих невидимое видимым, показывающее, как представляется человеку его собственная мысль и актуальных в профессиональной оперативной деятельности в электроэнергетических сетях и установках с высокой динамикой логико-лингвистическими средствами семиотики и визуальными переменными Ж. Бертена, математическими средствами топологии, в частности графами, планиметрии, аналитической и вычислительной геометрии, а также алгоритмами и программными средствами интерактивной машинной графики.

Для этого определен изограф — объект, специфицирующий отношение инцидентности точек (вершин) и линий (ребер) в топологическом и метрическом пространствах, используя теоретико-множественные и предикативные представления. Изографы предназначены для создания схем из нескольких геометрических фигур топологии: квадрата, треугольника, пятиугольной стрелки, окружности и текста, три первых из которых символизируют семантику предметов-ресурсов, их свойств и действий с ресурсами, соответственно в интерактивной машинной графике и экранных, метрических координатах. Главное достоинство изографов — возможность вычислений в интерактивной, человеко-машинной системе.

Хотя изографы могут применяться и автономно, они созданы для ПИ-кодирования в модели полиструктурного, многослойного по конкретности и наглядности отображения представления оперативного образа ситуаций и состояния объекта управления и методах формирования интегрированных представлений в когнитивных гибридных интеллектуальных системах. На них основано редуцированное, предметно-схемное (предметно-изобразительного) кодирование знаний о ресурсах, свойствах и действиях в когнитивно-ориентированной двухзвенной, модели процесса поддержки принятия решений методами и инструментальными средствами гибридных интеллектуальных систем.

Будучи предметно-изобразительным кодом, изограф — сжатая, редуцированная, контурно представленная образная схема, смысловое содержание которой сопровождается наглядным образом, и осуществляющей семиотическое перерождение предмета.

Проблема мыслительной деятельности человека-оператора как результата одновременной работы двух самостоятельных, территориально разнесенных

механизмов оперирования редуцированными знаками (несовместимость двух аспектов семиозиса) ведет и к несовместимости свободного логического развития мысли, ее соответствия действительности. На устранение этого недостатка и направлен двухзвенная модель механизма имитации мыслительной деятельности человека-оператора в когнитивных гибридных интеллектуальных систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00208.

Список литературы

1. *Осипов Г. С. и др*. Знаковая картина мира субъекта поведения. М. : Физматлит, 2018.

2. *Колесников А. В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / под ред. А. М. Яшина. СПб. : СПбГТУ, 2001.

3. *Kolesnikov A., Jasinski E., Rumovskaya S.* Predicative representations of relations and links of the intellectual operational-technological control in complex dynamic systems // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Research Papers Collection, 18—22 February, Minsk, Belarus. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020. Iss. 4. P. 43–50.

4. *Колесников А. В. и др.* Метаязык для гибридных интеллектуальных систем визуального управления электротехническими сетями: ресурсы, свойства и действия // Системы и средства информатики. 2018. Т. 28, № 3. С. 153—164.

5. *Kolesnikov A. V. et al.* Conceptual-visual metalanguage of hybrid intelligent systems // CEUR Workshop Proceedings: 2nd International Scientific and Practical Conference «Fuzzy Technologies in the Industry — FTI» (Ulyanovsk; Russian Federation; 23 October 2018 to 25 October 2018. Т. 2258. P. 305—313.

6. *Чебанов С. В.* Новый этап становления общей семиотики: Вклад техно и биосмиотики (отчет о конференции) // Вестник РФФИ. 2003. № 4 (34). С. 67—73.

7. *Нестеров, А. Ю.* Семиотические основания техники и технического сознания: монография. Самара : Изд-во Самарской гуманитарной академии, 2017.

8. *Спирова Э. М.* Функции символа // Журнал проблемы понимания. 2009. № 2. С. 205—211.

9. *Деглин В. Л.* Лекции о функциональной асимметрии мозга человека. Амстердам ; Киев : Ассоциация психиатров Украины, 1996.

10. *Почепцов Г. Г.* Семиотика. М. : Рефл-бук Ваклер, 2002.

11. *Раевский Д. С.* Мир скифской культуры. М. : Языки славянских культур, 2006.

12. *ART-ASSORTY.* Древнее искусство. Схематизация. URL: https://art-assorty.ru/15712-drevnee-iskusstvo-shematizaciya.html

13. *Bliss C. K.* Semantography (Blissembolics). Second enlarget Edition. Sydney : Sydney Semantography (Blissembolics) Publications, 1965.

14. *Васильева Е. С.* Использование методики Блисс для формирования элементарной коммуникации у безречевых детей // Дефектология. 2006. № 5. С. 41–44.

15. *Анисимов О. С.* 100 схем. Новгород : Изд. ООО «Великий Новгород “Печатный двор”» — В. Н., 2013.

16. *Морозов Ф.М.* Схемы как средство описания деятельности (эпистемологический анализ). М. : ИФ РАН, 2005.

17. *Венгер Л.А. и др.* Психолог в детском саду. М. : ИНТОР, 1995.

18. *Писканова Е.А.* Технический рисунок : учеб.-метод. пособие. Тольятти : ТГУ, 2011.

19. *Георгиевский О.В., Смирнова Л.В.* Техническое рисование и художественно-графическое оформление архитектукрных чертежей : учеб. пособие. М. : АСТ : Астрель : Профиздат, 2005.

20. *OpenStreetMap.* Линия: ПС Северная-330 (53126382). URL: https://www. openstreetmap.org/way/53126382#map=17/54.76715/20.52356

21. *Правительство* Калининградской области. О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2021—2025 годы и признании утратившими силу отдельный решений Губернатора Калининградской области. URL: https://infrastruktura.gov39.ru/upload/165P_30042020.pdf

22. *Рисунки* символами и картинки из символов ASCII Art. URL: http://text-image.ru/

23. *Википедия.* Свободная энциклопедия. ASCII-графика. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ASCII-графика

24. *Уроки* рисунка и живописи «Арт рецепт». Пуантилизм как стиль в живописи. URL: https://artrecept.com/zhivopis/stili/puantilizm

25. *Культурология.Ру.* Механизированный пуантилизм. Устройство Time Print Machine для точечного рисования. URL: https://kulturologia.ru/blogs/100811/15107/

26. *Evil* Mad Scientist Wiki. TSP art. URL: https://wiki.evilmadscientist.com/TSP_art

27. *Википедия.* Свободная энциклопедия. Тон (цвет). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тон_(цвет)

28. *Bosch R., Wexler W.* Figurative Tours and Braids // Pr. of Bridges 2015: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture. 2015. P. 121—128.

29. *Engaging Data.* The Mona Lisa As Drawn By A Traveling Salesman. URL: https://engaging-data.com/mona-lisa-traveling-salesman/#art

30. *Wikipedia.* The free encyclopedia. Stippling. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Stippling

31. *Secord A.* Weighted Voronoi Stippling // Proceedings of the 2 nd Iternational Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR 2002), Annecy, France. P. 37—43.

32. *Secord A.* Weighted Voronoi Stippling. URL: https://www.cs.ubc.ca/labs/imager/tr/2002/secord2002b/secord.2002b.pdf

33. *Artstudi.ru* Художественная студия. URL: http://artstudi.ru/

34. *Гулидова В.Ю.* Геометрическое рисование. М. : Изд-во ООО «АРТ ГАММА», 2018.

35. *Искусство* в чистом виде. Анаморфоз в изобразительном искусстве // LiveJournal. URL: https://artwishenka.livejournal.com/44257.html

36. *Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др.* Геоинформатика : учебник для студ. вузов / под ред. В. С.Тикунова. М. : Издательский центр «Академия», 2005.

37. *Зиновьев А.Ю.* Визуализация многомерных данных. Красноярск : Изд-во КГТУ, 2000.

38. *Бринтон В.* Графическое изображение фактов / пер. с англ. С. Займовского. М. : Общероссийский общественный фонд «Общественное мнение», 2017.

39. *Авербух В.Л., Манаков Д.В.* Анализ и визуализация «больших данных» // Труды международной научной конференции «Параллельные Вычислительные Технологии» (ПаВТ'2015). Екатеринбург, 31 марта — 2 апреля 2015. Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2015. С. 332—340.

40. *FallDi.* Big data как арт-искусство. URL: https://habr.com/ru/post/271001/

41. *Штейнбок Л.С.* Ситуационная технология отображения информации. М. : Научные технологии, 2017.

42. *Усманова А. Р.* Умберто Эко: парадоксы интерпретации. Минск : Пропилеи, 2000.

43. *Эко У.* Отсутствующая структура. Введение в семиологию / пер. А.Г. Погоняйло и В.Г. Резник. М. : ТОО ТК «Петрополис», 1998.

44. *Bertin J.* Semiology of Graphics: diagrams networks maps / transl. by W.J. Berg. New York : Esri Press, 2011. P. 440.

45. *Берлянд А.М.* Теория геоизображений. М. : ГЕОС, 2006.

46. *Лаптев В. В.* Русская инфографика. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018.

47. *Уточкин И.С.* Мгновенное восприятие естественных сцен и объектов // Когнитивная психология: феномены и проблемы. М. : ЛЕНАРД, 2014. С. 70—85.

48. *Гибсон Дж.* Экологический подход к зрительному восприятию / пер. с англ. ; общ.ред и вступ. ст. А.Д. Логвиненко. М. : Прогресс, 1988.

49. *Шиффман Х.Р.* Ощущение и восприятие. 5-е изд. СПб. : Питер, 2003.

50. *Берлянт А. М.* Геоиконика / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова ; Акад. естеств. наук Рос. Федерации. М. : Астрея, 1996.

51. *Пономарев В.Ф.* Дискретная математика для инженеров : учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия-Телеком, 2009.

52. *Болтянский В.Г, Ефремович В.А.* Наглядная топология. М. : Наука, 1963.

53. *Овчинников В.А.* Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

54. *Гейда А.С.* Моделирование при исследовании технических систем: использование некоторых расширений теории графов // Труды СПИИРАН, 2011. Вып. 2 (17). С. 234—245.

55. *Шторгина Е.С., Кривенко А.С.* Метод визуализации метаграфа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 124—130.

56. *Кручинин С.В.* Протографы и архиграфы как обобщение графов // Научно-исследовательские публикации. 2017. № 3. С. 23—33.

57. *Зыков А.А.* Гиперграфы // УМН. 1974. Т. 29, вып. 6 (180). С. 89—154.

58. *Горбачев В.И.* Теория геометрических фигур геометрического пространства в методологии теоретического типа мышления // Наука и школа. 2016. № 4. С. 132—143.

59. *Васильев В.А.* Введение в топологию. М. : ФАЗИС, 1997.

60. *Гуревич В.Б., Минорский В.П.* Учебник аналитической геометрии для вузов. М. : Физматлит, 1958.

61. *Постников М.М.* Лекции по геометрии. Семестр 1. Аналитическая геомтерия : Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.

62. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия: Введение / пер. с англ. М. : Мир, 1989.

63. *Адамар Акад. Ж.* Элементарная геометрия. Ч. 1 : Планиметрия. Изд. 3-е с приложениями проф. Д.И. Перепелкина. М. : Гос. учеб.-педагог. изд-во Минпроса РСФСР, 1948.

64. *Фоли Дж., вен Дэм А*. Основы интерактивной машинной графики : в 2 кн. / пер. с англ. М. : Мир, 1985.

65. *Роджерс Д.* Алгоритмические основы машинной графики / пер. с англ. М. : Мир, 1989.

66. *Чириков С.В.* Алгоритмы компьютереной графики (методы растрирования кривых) : учебное пособие. СПб. : СПб ГИТМО (ТУ), 2001.

67. *Павлидис Т.* Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М. : Радио и связь, 1986.

68. *Роджерс Д., Адамс Дж.* Математические основы машинной графики / пер. с англ. М. ; Миор, 2001.

69. *Александров П.С.* Лекции по аналитической геометрии, пополненные необходимыми сведениями из алгебры : учебник для университетов. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968.

70. *Штейнбок Л.С.* Ситуационная технология отображения информации. М. : Научные технологии, 2017.

71. *GNOME Foundation.* The GTK Project. URL: https://www.gtk.org/

72. *Cairo*. URL: https://www.cairographics.org/

73. *Epic Games.* Unreal Engine. URL: https://www.unrealengine.com/en-US/

Б.А. Кулик[1], А.Я. Фридман[2]

[1]Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Россия
e-mail: [1]ba-kulik@yandex.ru, [2]fridman@iimm.ru

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕ-ФАКТОРОВ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ КЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Введение

Неопределенности и некорректности входят в состав НЕ-факторов систем знаний [1]. Неопределенность выражается в виде взаимоисключающих вариантов значений, интервалов, вероятностных оценок, различных гипотез и т.д. Для их моделирования и анализа в искусственном интеллекте часто используются неклассические, в частности немонотонные, модальные и паранепротиворечивые логики, поскольку считается, что классическая логика плохо приспособлена для анализа этих неопределенностей [2—4].

Некорректность часто характеризуется парадоксальностью или противоречивостью знаний. Многочисленные примеры парадоксов и противоречий в развивающихся знаниях привела многих исследователей к идее присоединения противоречий к логическим теориям. Одним из результатов такого подхода стало развитие паранепротиворечивых логик, в основе которых лежит

© Кулик Б.А., Фридман А.Я., 2020

опровержение классического принципа «Из противоречия следует все, что угодно» [5]. Но во многих случаях такой подход может помешать стремлению разобраться в истоках возникновения противоречий в знаниях — нередко оказывается, что причиной парадокса является скрытая логическая ошибка.

Некоторые нарушения законов классической логики можно обосновать, если подобрать для них подходящую интерпретацию. Например, нарушение логического закона исключенного третьего оказывается вполне правомерным при определенном аксиоматическом построении таких математических объектов, как мультимножества, некоторые типы частично-упорядоченных множеств (например, порядок по делимости для целых положительных чисел), нечеткие множества и т. д. В то же время если в качестве основных инструментов логического анализа используются множества, свойства и отношения, то для них такого рода нелогичности не имеют смысла. В [6] показано, как основные законы алгебры множеств (де Моргана, контрапозиции и др.) можно обосновать без всяких аксиом, а только на основе определений основных структур, операций и соотношений алгебры множеств.

В докладе предлагаются математические методы анализа неопределенностей в знаниях на основе классического подхода. Рассматриваются возможности классического подхода к логическому анализу рассуждений, в которых рекомендуется применять неклассические логики, в частности:

1) неопределенности в виде вариантов значений и интервалов;

2) рассуждения, для которых используются немонотонные логики;

3) рассуждения, в которых применяются модальные логики;

4) рассуждения с парадоксами и противоречиями.

В качестве методологической основы для использования классической логики при моделировании «неклассических» рассуждений выбрана разработанная авторами алгебра кортежей (АК), для которой доказан ее изоморфизм алгебре множеств [6].

Один из возможных способов выражения и анализа неопределенности — логико-вероятностный анализ, который достаточно полно изложен в литературе по АК [6; 7] и поэтому здесь не рассматривается.

Алгебра кортежей представляет собой алгебру произвольных многоместных отношений. Отношения в АК выражаются с помощью четырех типов структур, называемых ***АК-объектами***. Каждый АК-объект погружен в определенное пространство ***атрибутов***. Имена АК-объектов содержат идентификатор, к нему добавляется заключенная в прямые скобки последовательность имен атрибутов, определяющих ***схему отношения***, в которой задан этот АК-объект. Например, имя $R[XYZ]$ означает, что пространство атрибутов АК-объекта R есть X, Y и Z. ***Однотипные*** АК-объекты — это структуры, заданные в одном пространстве атрибутов. Структуры АК матричные, причем в ячейках матриц записываются не элементы, а подмножества соответствующих атрибутов, называемые ***компонентами***. Рассмотрим основные структуры АК — *C*-системы и *D*-системы.

C-система записывается в виде матрицы, ограниченной прямыми скобками. Она состоит из компонент-множеств. Так, $R[XYZ] = \begin{bmatrix} A_1 & * & A_3 \\ B_1 & B_2 & * \end{bmatrix}$ есть *C*-система, состоящая из компонент, при этом $A_1 \subseteq X$, $A_3 \subseteq Z$ и т. д. Компонента «*» — ***полная компонента***, ее значение есть множество, равное домену соответствующего (по месту расположения) атрибута (например, значение * в первой строке — домен атрибута *Y*). Данную *C*-систему можно преобразовать в обычное отношение следующим образом:

$$R[XYZ] = (A_1 \times Y \times A_3) \cup (B_1 \times B_2 \times Z).$$

C-система, состоящая из одной строки, называется ***C-кортежем***. В логике ему соответствует отдельный конъюнкт, а *C*-системе — дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ).

D-система — это матрица компонент, ограниченная перевернутыми прямыми скобками. С помощью *D*-систем легко вычислять дополнение *C*-систем. Для этого достаточно заменить все компоненты *C*-системы их дополнениями. Компонента ∅ называется ***пустой компонентой***, так как представляет собой пустое множество и моделирует дополнение компоненты *. Компоненты ∅ и * названы ***фиктивными компонентами***.

Так, дополнение *C*-системы $T[XYZ] = \begin{bmatrix} A & * & C \\ D & E & * \end{bmatrix}$ — это *D*-система $\overline{T}[XYZ] = \left]\begin{matrix} \overline{A} & \varnothing & \overline{C} \\ \overline{D} & \overline{E} & \varnothing \end{matrix}\right[$, которая преобразуется в обычное отношение так:

$$\overline{T}\ [XYZ] = ((\overline{A} \times Y \times Z) \cup (X \times Y \times \overline{C})) \cap ((\overline{D} \times Y \times Z) \cup (X \times \overline{E} \times Z)).$$

D-система, содержащая одну строку, называется ***D-кортежем***, ему в логике соответствует отдельный дизъюнкт, а произвольной *D*-системе — конъюнктивная нормальная форма (КНФ).

1. Неопределенности в виде вариантов значений и интервалов

В исчислении предикатов допускается только два способа представления переменных в формулах: полная неопределенность, когда используется имя переменной (например, *x*), и полная однозначность, когда вместо переменной подставляется константа или функция от нее. Для представления промежуточных состояний требуется усложнять формулу. В то же время в АК имеется возможность задавать варианты значений непосредственно в самих структурах. Рассмотрим пример. Предположим, роботу необходимо найти предмет, находящийся в одной из трех комнат, причем в одну комнату заходить нельзя (там опасность), а одна комната пустая. Известно дополнительное условие: «Первая комната не опасна, вторая — не пуста». Запишем задачу на языке АК.

Обозначим O — в комнате нужный предмет, E — комната пустая и D — в комнате опасность. В качестве атрибутов будем использовать имена комнат R_1, R_2, R_3, в каждом из которых допустима одна из трех ситуаций множества $\{O, E, D\}$. Тогда условие можно выразить с помощью C-кортежа:

$$T_1[R_1\ R_2\ R_3] = [\{O, E\}\ \ \{O, D\}\ \ *].$$

Здесь первая и вторая компоненты заданы двумя вариантами значений, для третьей компоненты допускается любое значение из множества $\{O, E, D\}$.

Если задана логическая система в виде множества посылок A_i, то конъюнкция этих посылок представляет формулу, содержащую некоторое множество выполняющих подстановок, их число в общем случае больше двух. А это означает, что в системе рассуждений могут содержаться взаимоисключающие варианты, уточняющиеся по мере поступления новых данных. Но в логических формулах эта вариативность далеко не всегда явно проявляется (например, подстановка в формулу допускается только в виде одиночных значений), в то время как в АК всегда существует возможность задать значение переменной (атрибута) в виде множества вариантов.

Для систем, у которых переменные заданы в виде систем интервалов, в АК разработан метод квантования интервалов, с помощью которого система интервалов одной переменной представляется в виде множества элементарных интервалов (квантов), а каждый интервал выражен как множество квантов [6]. Для систем, у которых переменные представлены либо конечными упорядоченными множествами, либо конечной системой интервалов на основе АК разработана математическая модель с метрикой. В этой модели можно решать задачи кластеризации [8].

2. «Немонотонные» рассуждения

В классическом варианте математической логики монотонность есть неотъемлемое свойство логического вывода. Суть его такова: если из некоторого множества посылок Г выводится предложение B, то при добавлении во множество Г любой посылки (например, A) предложение B также должно выводиться. В алгебре множеств свойство монотонности выражается таким законом: пусть для множеств G и B справедливо соотношение $G \subseteq B$, тогда $(G \cap A) \subseteq B$, где A — любое множество.

Указанный закон выполняется и для логического вывода в АК, в которой проверка правильности следствия осуществляется не только с помощью трудоемкой процедуры, основанной на правилах вывода, но и с помощью других менее трудоемких алгоритмов. Формулы классической логики, представляющие посылки и следствия, выражаются в виде АК-объектов, с которыми можно выполнять обобщенные операции и осуществлять проверку обобщенных соотношений равенства ($=_G$) и включения ($\subseteq_G$). Тогда алгоритм проверки

правильности следствия B для заданных посылок A_i при использовании структур АК заключается в вычислении обобщенных пересечений и проверке обобщенного включения

$$(A_1 \cap_G \ldots \cap_G A_n) \subseteq_G B \qquad (1)$$

Рассмотрим соотношение (1). Поскольку АК изоморфна алгебре множеств, то ясно, что при добавлении любой посылки (например, C) в систему посылок из (1) соотношение $(A_1 \cap_G \ldots \cap_G A_n \cap_G C) \subseteq_G B$ выполняется. Исследование средствами АК многих примеров из [2—4], иллюстрирующих немонотонность логического вывода, показал, что во всех случаях имеет место не нарушение законов классической логики, а наличие коллизий [9].

Так, в [4] в качестве примера немонотонности предлагается следующая пара посылок: 1) «все птицы летают» и 2) «страус Тити птица, но не летает». Но анализ показывает, что для разрешения этой ситуации совсем не обязательно вводить неклассическую логику. Достаточно зафиксировать в этом рассуждении коллизию и откорректировать посылки, не нарушая принципов классической логики. В данном примере очевиден вывод о некорректности одной из посылок. Семантический анализ позволяет предположить, что ошибочна первая посылка, так как существуют птицы, которые не летают.

Многие примеры, иллюстрирующие применение немонотонных логик, сами по себе не содержат структур с нарушениями законов алгебры множеств и булевой алгебры. Предполагаемое нарушение законов классической логики заключается в том, что вводятся пересматриваемые правила вывода, которые могут применяться в зависимости от определенных условий. Например, в логике умолчаний используются правила типа:

$$P: J_1,\ldots,J_n / C,$$

где P — предпосылка, C — заключение, а $J_1,\ldots,J_n$ — обоснования: если можно доказать, что любое из них ложно, то заключение вывести нельзя. Другими словами, прежде чем применять данное правило, необходимо убедиться, что при заданных условиях и имеющихся фактах по крайней мере одно из обоснований $J_1,\ldots,J_n$ истинно. Многие видят преимущества таких правил в том, что они позволяют не перечислять исключений, присущих данной системе, а вводить их в правила в качестве «обоснований». Но при этом непонятно, как и почему нарушаются законы классической логики.

3. Модальности

Мы исследовали также модели рассуждений, где рекомендуется применять *модальные логики*. При рассмотрении реальных задач, для решения которых применяются модальные логики, оказалось, что в ряде случаев их формализация упрощается, если вместо модальных операторов использовать механизм проверки гипотез или анализ возможных вариантов решения. В качестве одного из примеров рассмотрим задачу о трех советниках [4], которая послужила для Маккарти эталоном при тестировании различных логик веры

и знания. Суть задачи в следующем. Король, желая проверить проницательность трех своих мудрых советников, нарисовал им белые пятна на лбах. При этом предупредил их, что пятна могут быть белыми либо черными, но не может быть черных пятен у всех троих. Каждый советник видит цвет пятен у других, но не у себя. Требуется определить цвет собственного пятна.

Традиционно для решения задачи применяется мультимодальная логика знаний, где операторы типа $[i]$ означают «i-й советник знает, что…». В [4] приводятся схемы аксиом такой логики, дающей формальное решение задачи. Ниже приводится решение, не требующее использования неклассической логики и основанное на анализе гипотез.

Пусть атрибутами X, Y, Z системы являются советники, значение 0 означает, что у данного советника белое пятно, а значение 1 — черное. Ситуация $T[XYZ] = [\{1\}\ \{1\}\ \{1\}]$ с тремя черными пятнами в системе невозможна, поэтому все допустимые варианты можно выразить с помощью C-системы

$$R[XYZ] = \overline{T}\ [XYZ] = \begin{bmatrix} \{0\} & * & * \\ * & \{0\} & * \\ * & * & \{0\} \end{bmatrix}.$$

Предположим, что какой-то советник (например, X) видит перед собой два черных пятна. Это можно выразить формулой $V_X = [*\ \{1\}\ \{1\}]$. Если вычислить пересечение $R[XYZ] \cap V_X$, то получим C-кортеж $[\{0\}\ \{1\}\ \{1\}]$, что означает наличие у советника X белого пятна на лбу. Назовем ситуации $[*\ \{1\}\ \{1\}]$, $[\{1\}\ *\ \{1\}]$ и $[\{1\}\ \{1\}\ *]$ разрешимыми: если какая-то из них имеет место, то эксперимент заканчивается, так как один из советников точно знает, что у него на лбу белое пятно. Предположим, советник X видит перед собой черное и белое пятно, например, $V_X = [*\ \{1\}\ \{0\}]$. Тогда он может выдвинуть две гипотезы: $H_1 = [\{1\}\ \{1\}\ \{0\}]$ и $H_2 = [\{0\}\ \{1\}\ \{0\}]$. Гипотеза H_1 выражает разрешимую ситуацию, поэтому исключается, истинной может быть только гипотеза H_2. Отсюда следует, что ситуации, в которых присутствует хотя бы один советник с черным пятном, также разрешимы.

Теперь, если советник (например, X) видит перед собой два белых пятна, $V_X = [*\ \{0\}\ \{0\}]$, то он должен проверить две гипотезы: $H_1 = [\{1\}\ \{0\}\ \{0\}]$ и $H_2 = [\{0\}\ \{0\}\ \{0\}]$. Гипотеза H_1 выражает разрешимую ситуацию, поэтому исключается. Тогда истинной может быть только гипотеза H_2.

Таким образом, использование модальных логик для решения некоторых задач отнюдь не опровергает возможности их решения на основе классической логики с использованием метода формулировки и проверки гипотез.

4. Анализ противоречий

В науке противоречия считаются индикаторами некорректности, и их обнаружение стимулирует новые исследования с целью уточнения и развития наших знаний. Рассмотрим особенности противоречий в естественных рассуждениях. В математической логике (формальное) противоречие распозна-

ется как ситуация, при которой логическая формула, представляющая рассуждение, является тождественно ложной [10]. Анализу противоречий посвящено много работ по основаниям математики и математической логики. Во многих из них «обосновывается» неизбежность противоречий. Например, открытые в начале XX столетия парадоксы теории множеств вызвали у многих математиков и философов убеждение в противоречивости самого понятия «множество» [11]. Парадоксы также анализируются в ряде работ Д. А. Бочвара. В частности, в статье [12] утверждается, что все парадоксы возникают вследствие добавления к системе аксиом некоторых специальных аксиом, противоречащих аксиомам логики.

Однако это не единственная причина парадоксов. Нередко парадокс возникает из-за неявно выраженной логической ошибки. В некоторых случаях от него можно избавиться, если изменить некоторые посылки рассуждения. В [13] приведены примеры, когда парадокс элиминируется после замены предложения «Все A есть B» на предложение «Все B есть A» или когда посылка «Все A есть B» заменяется на «Некоторые A есть B».

Еще один метод элиминации противоречия был сформулирован при исследовании свойств пресуппозиции [14]. *Пресуппозиция* — это утверждение, которое подразумевается (или воспринимается как истинное) при актуализации основного утверждения или вопроса, при этом отрицание (или ложность) основного утверждения не нарушает истинности пресуппозиции. Еще одна особенность пресуппозиции заключается в том, что предположение о ее ложности или несостоятельности влечет потерю смысла основного утверждения.

Например, в предложении *Петр завершил статью* подразумевается, что *Петр до этого работал над статьей*, — это и есть пресуппозиция. Ясно, что отрицание основного утверждения (*Петр не завершил статью*) не влияет на истинность пресуппозиции. Если предположить, что пресуппозиция ложная, то становится ясным, что завершение или незавершение статьи в данной ситуации не имеют смысла.

В работах по логике и лингвистике [15; 16] пресуппозиция часто выражается в виде логической формулы $(S \supset P) \wedge (\neg S \supset P)$, где S — основное утверждение (ассерция), а P — пресуппозиция. Однако по смыслу пресуппозиция является предпосылкой — часто события, выраженные в ассерции, происходят после событий, выраженных в пресуппозиции. Но если это выразить с помощью формулы

$$(P \supset S) \wedge (P \supset \neg S), \tag{2}$$

то окажется, что высказывание P безусловно ложное, а это противоречит смыслу пресуппозиции. Хотя неформальный анализ многих конкретных пресуппозиций показывает, что парадокса на самом деле нет. Типичный пример позволяет найти ключ к решению этой проблемы.

Рассмотрим предложение (S) *Антон опоздал в школу*. Пресуппозицией для него является предложение (P) *Антон направлялся в школу*. Ясно, что прежде чем опоздать (либо прийти вовремя), Антон должен был направлять-

ся в школу, т. е. P здесь в качестве предпосылки вполне правомерно. Однако при этом не учитываются возможные причины опоздания (проспал, встретил друзей и пообщался с ними, помогал перейти дорогу старушке и т. д.). Их можно отобразить только с помощью новой логической переменной. Назовем эту логическую переменную «переключателем ассерции» и сформулируем следующую гипотезу.

Гипотеза 1. Если P — пресуппозиция предложения S, то существует и может быть найден *переключатель ассерции* R со следующими свойствами: выражение $P \wedge R$ — предпосылка предложения S, а выражение $P \wedge \neg R$ — предпосылка предложения $\neg S$.

С учетом этого получается следующая непротиворечивая логическая модель пресуппозиции:

$$((P \wedge R) \supset S) \wedge ((P \wedge \neg R) \supset \neg S).$$

В базах знаний аналогом полученной логической модели пресуппозиции является аномалия противоречия [17]. Для корректировки этой аномалии обычно рекомендуется исключать одно из противоречивых правил. Однако предложенный при анализе пресуппозиции подход позволил разработать алгоритм элиминации аномалии противоречия с помощью поиска дополнительных параметров, аналогичных переключателю ассерции [14].

Заключение

Результаты исследования показывают, что классический подход к моделированию некоторых НЕ-факторов систем знаний позволяет интегрировать разнообразные методы решения этой проблемы с помощью разработанной авторами алгебры кортежей. Показаны возможности классического подхода к логическому анализу рассуждений, в которых рекомендуется применять неклассические логики.

Работа выполнена в рамках НИР ИПМаш РАН и частично поддержана грантами РФФИ (проекты №№ 18-29-03022-мк, 18-07-00132-а, 18-01-00076-а и 19-08-00079-а).

Список литературы

1. *Нариньяни А. С.* Инженерия знаний и НЕ-факторы: краткий обзор-08 // Вопросы искусственного интеллекта. Вестник НСМИИ РАН. 2008. № 1. С 61—77.

2. *Вагин В. Н., Головина Е. Ю., Загорянская А. А. и др.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / под ред. В. Н. Вагина, Д. А. Поспелова. 2-е изд. доп. и испр. М. : Физматлит, 2008.

3. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. / пер. с англ.; ред. К. А. Птицына. М. : Вильямс, 2006.

4. *Тейз А. и др.* Логический подход к искусственному интеллекту: от модальной логики к логике баз данных. М. : Мир, 1998.

5. *Ишмуратов А.Т., Карпенко А.С., Попов В.М.* О паранепротиворечивой логике // Синтаксические и семантические исследования неэкстенсиональных логик. М., 1989. С. 261—284.

6. *Кулик Б.А., Зуенко А.А., Фридман А.Я.* Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010.

7. *Кулик Б.А.* Вероятностная логика на основе алгебры кортежей // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. №1. С. 118—127.

8. *Кулик Б.А., Фридман А.Я.* Интеграция технологий логико-семантического анализа и классификации на основе отношений с упорядоченными значениями атрибутов // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 355—362.

9. *Kulik B., Fridman A., Zuenko A.* Logical Inference and Defeasible Reasoning in N-tuple Algebra // Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems, IGI Global, 2013. P. 102—128.

10. *Mendelson E.* Introduction to Mathematical Logic. 6th ed. Taylor & Francis Group, 2015.

11. *Бурбаки Н.* Очерки по истории математики. М. : Изд-во иностранной литературы, 1963.

12. *Бочвар Д.А.* К вопросу о парадоксах математической логики и теории множеств // Матем. сборник. 1944. Т. 15 (57), №3. С. 369—384.

13. *Кулик Б.А.* Логика естественных рассуждений. СПб. : Невский диалект, 2001.

14. *Кулик Б.А.* Исследование противоречий в естественных рассуждениях на примерах метафор и пресуппозиций // Труды Семнадцатой Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием. КИИ-2019 (21—25 октября 2019 г., г. Ульяновск, Россия). Ульяновск : УлГТУ, 2019. Т. 2. С. 192—200.

15. *Strawson P.* Introduction to Logical Theory. London, 1952.

16. *Fraassen B. van.* Presupposition, implication and self-reference // Journal of Philosophy. 1968. Vol. 65, №5. P. 136—152.

17. *Harmelen F.* Applying rule-base anomalies to KADS inference structures // Decision Support Systems. 1997. Vol. 21, №4. P. 271—280.

В.А. Мочалов, А.В. Мочалова

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия

e-mail: sensorlife@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ СВЯЗНОСТИ МЕЖДУ УЗЛАМИ ГРАФА

Введение

В работе [1] предложена математическая модель семантического анализатора, основанная на сопоставлении текста с онтосемантическими шаблонами. Анализируемый текст, поступающий на вход семантического анализатора, постепенно сокращается: некоторые части текста, в соответствии с онтосе-

© Мочалов В.А., Мочалова А.В., 2020

мантическими правилами, добавляются в очередь с приоритетом на удаление; последовательно из анализируемого текста удаляются части текста, соответствующие элементу очереди с наивысшим приоритетом. В качестве основы реализации семантического анализатора была выбрана основанная на правилах экспертная система *Drools* [2]. В данной работе полученные ранее результаты адаптируются к задаче анализа структурной надежности и реализуется подход для расчета вероятности связности между узлами заданного графа, предполагающий его преобразование в граф меньшей размерности (модифицированный граф) путем изъятия некоторых фрагментов исходного графа и учета значений показателей связности изъятых фрагментов для оценки связности модифицированного графа. Это позволяет уменьшить трудоемкость расчетов. Модификация графа осуществляется на основе некоторых правил, которые могут применяться просто человеком, что, конечно, не эффективно. Поэтому для выполнения модификации графа на основе таких правил предлагается использовать экспертные системы.

Преимущество применения экспертных систем в рассматриваемой задаче заключается в следующем:

— не требуют от эксперта специальных знаний в области программирования и позволяют ему самостоятельно добавлять правила для оценки связности подграфов на высокоуровневом языке описания правил;

— реализован алгоритм быстрого сопоставления с шаблонами, который дает возможность существенно ускорить процесс поиска шаблонов в базе фактов, особенно при ее частом изменении; в рассматриваемом случае фактами являются узлы и ребра графа и при нахождении с помощью шаблонов конкретных подграфов происходит модификация графа, т. е. модифицируется база фактов;

— обладают большими возможностями языка для написания правил.

Задача точного расчета вероятности связности узлов графа не только очень важная для практического применения, но и относится к классу NP-трудных задач [3]. В работе приводится место применения экспертных систем и других известных методов в решении рассматриваемой задачи.

Реализация редукционных правил для сокращения размерности графа на экспертной системе Drools

Использование редукционных правил для сокращения размерности графа исследуется в различных работах [4—6 и др.]. Рассмотрим далее реализацию на экспертной системе *Drools* некоторых правил для сокращения размерности неориентированного графа, в котором нам требуется найти вероятность связности между двумя целевыми узлами. Все остальные узлы в рассматриваемом графе будем считать транзитными.

В качестве фактов в экспертной системе Drools используются Java-объекты. Для хранения информации об узле графа были выбраны следующие свойства реализованного класса Node:

String type; // тип узла
String name; // имя узла
double probability; // вероятность работоспособного состояния узла
HashMap<Node, Double> hmLinks = new HashMap<Node, Double>(); // таблица вероятностей работоспособного состояния ребер со смежными узлами.

Так как в свойстве *hmLinks* в качестве уникального ключа используется смежный узел, то для расчета вероятности работоспособного состояния ребра для параллельного соединения ребер был выбран протокол, согласно которому при добавлении нового ребра в граф требуется вызвать нижеприведенную Java-функцию *addOrParallelRecalcLink*, которая либо инициализирует значение вероятности работоспособного состояния ребра (ВРСР), либо выполняет расчет нового значения ВРСР согласно формуле расчета ВРСР для параллельного соединения ребер (рис. 1).

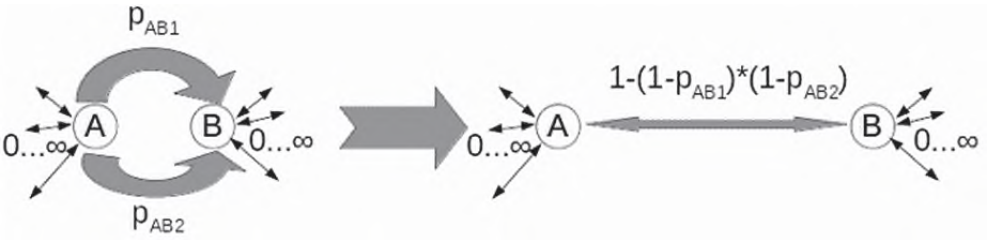


Рис. 1. Расчет вероятности работоспособного состояния ребра для параллельного соединения ребер

```
@Modifies ( "hmLinks" )
public void addOrParallelRecalcLink(Node node, Double probLinkValue, boolean setForBothNodes)
{
  Double probCur = link(node);
  if(probCur == null) setLinkProbability(node, probLinkValue);
  else{ probLinkValue = 1 - (1 - probCur) * (1 - probLinkValue);
    setLinkProbability(node, probLinkValue); }
  if(setForBothNodes) node.setLinkProbability(this, probLinkValue);
}
```

Правило 1 (рис. 2). Если у транзитного узла Т графа имеются ровно два смежных узла (А и В), то: удалить из графа транзитный узел Т и его два ребра; добавить новое ребро между узлами А и В и установить вероятность его работоспособного состояния в значение $p_{AB} = p_{AT} \cdot p_T \cdot p_{BT}$, где p_{AT} — это вероятность работоспособного состояния ребра АТ, p_{BT} — это вероятность работоспособного состояния ребра ВТ и p_T — это вероятность работоспособного состояния узла Т.

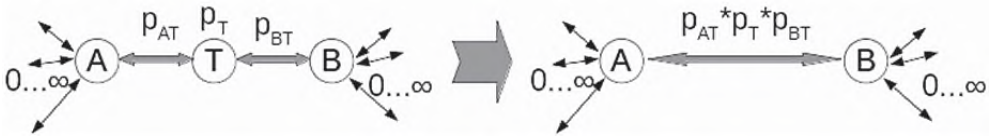


Рис. 2. Правило 1 сокращения размерности неориентированного графа

На языке экспертной системы *Drools* правило 1 может быть записано следующим образом:

```
rule "1"
when
    $n2 : Node( type == "T", hmLinks.size == 2 )
then
    Iterator<Entry<Node, Double>> it = $n2.getHmLinks().entrySet().iterator();
    Entry<Node, Double> e1 = it.next(); Entry<Node, Double> e2 = it.next();
    System.out.println("Правило 1 для узлов: " + $n2.getName() + "; " +
e1.getKey().getName() + "; " + e2.getKey().getName());
    e1.getKey().removeLink($n2); e2.getKey().removeLink($n2);
    double newLink = e1.getValue() * $n2.prob() * e2.getValue();
    e1.getKey().addOrParallelRecalcLink(e2.getKey(), newLink, true);
    delete($n2); update(e1.getKey()); update(e2.getKey());
end
```

Правило 2 (рис. 3). Если у транзитного узла T графа имеется ровно один смежный узел (A), то удалить из графа транзитный узел T и его ребро.

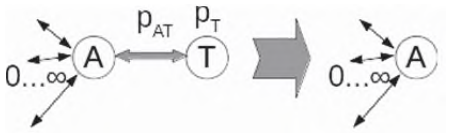


Рис. 3. Правило 2 сокращения размерности неориентированного графа.

На языке экспертной системы *Drools* правило 2 может быть записано следующим образом:

```
rule "2"
when
    $n2 : Node( type == "T", hmLinks.size == 1 )
then
    System.out.println("Правило 2 для узла: " + $n2.getName());
    Iterator<Entry<Node, Double>> it = $n2.getHmLinks().entrySet().iterator();
    Entry<Node, Double> e1 = it.next(); e1.getKey().removeLink($n2);
     update(e1.getKey()); delete($n2);
end
```

Правило 3. Если у любого узла графа (A) нет ни одного смежного узла, то удалить из графа узел A.

На языке экспертной системы *Drools* правило 3 может быть записано следующим образом:

```
rule "3"
when
    $n2 : Node( type != "ALL", hmLinks.size == 0 )
then
    System.out.println("Правило 3 для узла: " + $n2.getName());
    delete($n2);
end
```

Правило 4. Если целевой узел (S_1) имеет только один смежный узел (S_2), который является также целевым, то итоговая вероятность связности между двумя целевыми узлами вычисляется следующим образом: $p_{ALL} = p_{S1} \cdot p_{S1S2} \cdot p_{S2}$, где p_{S1S2} — это вероятность работоспособного состояния ребра S_1S_2, p_{S1} — это вероятность работоспособного состояния узла S_1 и p_{S2} — это вероятность работоспособного состояния узла S_2.

На языке экспертной системы *Drools* правило 4 может быть записано следующим образом:

```
rule "4"
when
    $n1 : Node( type == "S", hmLinks.size == 1 )
    $n2 : Node( type == "S", hmLinks.size >= 1, hmLinks contains $n1 )
then
    System.out.println("Правило 4 для узлов: " + $n1.getName() + "; " +
$n2.getName());
    delete($n1); delete($n2); double ret = $n2.link($n1) * $n1.prob() * $n2.prob();
    insert(new Node("ALL", ret));
    System.out.println("Итоговая вероятность связности: " + ret);
end
```

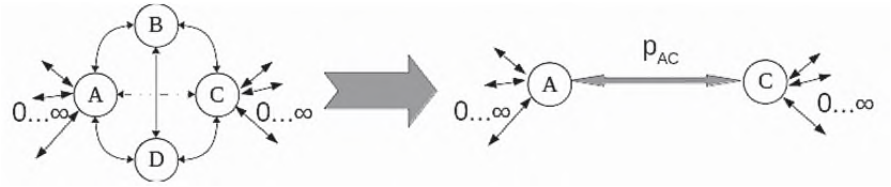


Рис. 4. Правило 4 сокращения размерности неориентированного графа

Правило 5. Если целевой узел (S) имеет только один смежный узел (T), который является транзитным, и у узла T более одного смежного узла, то: удалить узел S; сделать узел T целевым, дать ему имя узла S и установить вероятность работоспособного состояния узла T равной $p_{TNEW} = p_T \cdot p_S \cdot p_{TS}$,

где p_{TS} — это вероятность работоспособного состояния ребра TS, p_T — это вероятность работоспособного состояния узла T и p_S — это вероятность работоспособного состояния узла S.

На языке экспертной системы *Drools* правило 5 может быть записано следующим образом:

```
rule "5"
when
    $n1 : Node( type == "S", hmLinks.size == 1 )
    $n2 : Node( type == "T", hmLinks.size >= 2, hmLinks contains $n1 )
then
    System.out.println("Правило 5 для узлов: " + $n1.getName() + "; " +
$n2.getName());
    $n2.setProbability( $n2.link($n1) * $n1.prob() * $n2.prob() );
     $n2.removeLink($n1); delete($n1); $n2.setType("S");
    $n2.setName($n1.getName()); update($n2);
end
```

Правило 6. На левой части рисунка 4 изображен подграф (G) с четырьмя узлами (A, B, C и D), в котором узлы B и D являются транзитными. Пунктиром отмечено необязательное для подграфа ребро AC, наличие или отсутствие которого не влияет на нижеприведенную логику расчета вероятности связности между узлами A и C за счет использования ранее описанного протокола учета параллельных соединений ребер (т. е. в нижеприведенном правиле возможное наличие ребра AC будет учитываться только при вызове функции *addOrParallelRecalcLink* в правой части правила). Если в графе мы встречаем подграф G, то:

— добавить новое ребро между узлами A и C и установить вероятность его работоспособного состояния в значение $p_{AC} = p_{DB} \cdot p_1 + (1 - p_{DB}) \cdot p_2$, где p_{DB} — это вероятность работоспособного состояния ребра DB, p_1 — это вероятность связности узла A и C при условии работоспособного состояния ребра DB и p_2 — это вероятность связности узла A и C при условии неработоспособного состояния ребра DB. При этом

$$p_1 = p_B \cdot (1 - p_D) \cdot p_{AB} \cdot p_{BC} + p_D \cdot (1 - p_B) \cdot p_{AD} \cdot p_{DC} + \\ + p_B \cdot p_D \cdot (1 - (1 - p_{AB}) \cdot (1 - p_{AD})) \cdot (1 - (1 - p_{BC}) \cdot (1 - p_{DC})),$$

где p_B, p_D — вероятности работоспособного состояния узлов B и D соответственно, а p_{AB}, p_{AD}, p_{BC}, p_{DC} — вероятности работоспособного состояния ребер AB, AD, BC и DC соответственно. Вероятность $p_2 = 1 - (1 - p_{AB} \cdot p_B \cdot p_{BC}) \cdot (1 - p_{AD} \cdot p_D \cdot p_{DC})$;

— удалить узлы B и D;

— удалить ребра AB, AD, BC и DC.

На языке экспертной системы *Drools* правило 6 может быть записано следующим образом:

```
rule "6"
when
$nA : Node( type != "ALL", hmLinks.size >= 2 )
$nB : Node( type == "T"  , hmLinks.size == 3, hmLinks contains $nA )
$nD : Node( type == "T"  , hmLinks.size == 3, hmLinks contains $nA && hmLinks contains $nB )
$nC : Node( type != "ALL", this != $nA, hmLinks.size >= 2, hmLinks contains $nB && hmLinks contains $nD )
then
System.out.println("Правило 6 для узлов: " + $nA.getName() + "; " + $nB.getName() + "; " + $nD.getName() + "; " + $nC.getName());
Double pDBOK = $nB.prob()*(1-$nD.prob())*$nA.link($nB)*$nB.link($nC)+$nD.prob()*(1-$nB.prob())*$nA.link($nD)*$nD.link($nC)+$nB.prob()*$nD.prob()*((1-(1-$nA.link($nB))*(1-$nA.link($nD)))*(1-(1-$nB.link($nC))*(1-$nC.link($nD))) );
double pDBBad = 1 - (1 - $nA.link($nB) * $nB.prob() * $nB.link($nC)) * (1 - $nA.link($nD) * $nD.prob() * $nD.link($nC));
double newLinkAllProb = $nD.link($nB) * pDBOK + (1-$nD.link($nB)) * pDBBad;
$nA.removeLink($nB); $nA.removeLink($nD); $nC.removeLink($nB);
$nC.removeLink($nD); delete($nB); delete($nD);
    $nA.addOrParallelRecalcLink($nC, newLinkAllProb, true); update($nA); update($nC);
end
```

Другие правила для экспертной системы могут быть записаны по аналогии. Конечно, не любой граф можно свернуть в итоговый узел, используя только экспертные правила. Если после работы экспертной системы граф не свернулся в итоговый узел, то следует запустить алгоритм поиска подграфов минимального размера, которые могут быть преобразованы в узел или ребро графа. Для каждого такого подграфа в зависимости от его размера необходимо запустить одну из известных процедур для расчета вероятности связности между его входным и выходным узлом. К примерам таких известных процедур следует отнести [7]: метод прямого перебора; методы статистического моделирования и метод Монте-Карло; метод декомпозиции булевых функций; метод факторизации (метод ветвления, метод Мура — Шеннона) [3; 8; 9] и др. После вычисления вероятности связности между входным и выходным узлом каждого подграфа происходит модификация базы фактов экспертной системы и запускается вновь блок логического вывода на основе правил экспертной системы, и далее шаги повторяются вплоть до получения итоговой вероятности.

После вычисления вероятности связности между входным и выходным узлом каждого подграфа происходит модификация базы фактов экспертной системы следующим образом:

а) если найденный подграф M может быть преобразован в узел N графа (пример приведен в правиле 5), то: выполнить расчет вероятности работоспособного состояния преобразованного узла N; преобразованный узел N добавить в граф (узел становится целевым если в подграфе имеется хотя бы один целевой узел, а в противном случае узел становится транзитным); удалить все узлы подграфа M; добавить узлу N ребра связи с внешними узлами подграфа M; обновить базу фактов экспертной системы в соответствии с выполненными изменениями в графе; если после удаления подграфа M в итоговом графе остался только один целевой узел (это возможно, только если в подграфе M было два целевых узла), то вероятность его работоспособного состояния (узла N) и есть итоговая вероятность связности между двумя целевыми узлами;

б) если найденный подграф M может быть преобразован в ребро F графа (пример приведен в правиле 6), то: выполнить расчет вероятности работоспособного состояния преобразованного ребра F; удалить все узлы подграфа M кроме входного и выходного; удалить все ребра связи с удаленными узлами из подграфа M; добавить новое ребро F между входным и выходным узлом графа; обновить базу фактов экспертной системы в соответствии с выполненными изменениями в графе.

После модификации базы фактов экспертной системы вновь запускается блок логического вывода на основе правил экспертной системы, и далее шаги повторяются вплоть до получения итоговой вероятности связности между узлами графа.

Кроме правил вычисления вероятности связности между входным и выходным узлом подграфа интерес также представляют и другие правила модификации структуры подграфов.

На рисунке 5 приведен пример графа, для которого требуется найти вероятность связности между узлом 2 и узлом 17. Вероятность безотказной работы каждого узла p_m=0.95, а вероятность безотказной работы каждого ребра p_{ij}=0.90. Только лишь вышеприведенные 6 правил экспертной системы позволили точно вычислить итоговую вероятность связности между целевыми узлами p_{ALL}=0.7213846303144723.

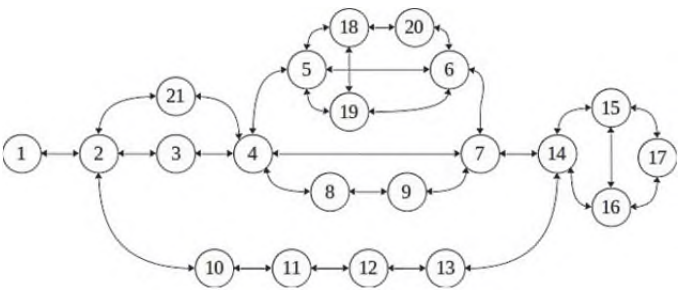


Рис. 5. Пример графа, для которого требуется найти вероятность связности между узлом 2 и узлом 17

Вывод на консоль последовательности срабатывания правил:
Правило 1 для узлов: 21; 4; 2 . Правило 1 для узлов: 10; 11; 2 .
Правило 1 для узлов: 20; 18; 6 . Правило 1 для узлов: 9; 8; 7 .
Правило 1 для узлов: 8; 4; 7 . Правило 1 для узлов: 3; 4; 2 .
Правило 1 для узлов: 13; 12; 14 . Правило 1 для узлов: 12; 14; 11 .
Правило 1 для узлов: 11; 14; 2 . Правило 2 для узла: 1.
Правило 6 для узлов: 14; 15; 16; 17 . Правило 5 для узлов: 17; 14 .
Правило 6 для узлов: 5; 18; 19; 6 . Правило 1 для узлов: 6; 5; 7 .
Правило 1 для узлов: 5; 4; 7 . Правило 1 для узлов: 7; 4; 17 .
Правило 1 для узлов: 4; 17; 2 . Правило 4 для узлов: 17; 2 .

Заключение

В статье описывается оригинальный подход применения экспертных систем для расчета вероятности связности между узлами графа. Так как ручное написание правил для экспертной системы — это весьма трудоемкая работа, то целесообразно генерировать такие правила на основе рассчитанных формул вероятности связности графов небольшой размерности. Так, в [10] приводится один из возможных способов для получения таких формул, основанный на переборе вариантов полного отсечения каждой из вершин графа. В [11] приводится пример использования специального языка описания онтологически-семантических шаблонов для генерации правил на языке экспертной системе *Drools*.

Список литературы

1. *Mochalova A.V., Mochalov V.A.* Mathematical model of an ontological-semantic analyze using basic ontological-semantic patterns // Lecture Notes in Artificial Intelligence, Proceedings of 15th MexicanInternational Conference on Artificial Intelligence. 2016. P. 53—66.

2. Drools — Business Rules Management System. URL: https://www.drools.org/.

3. *Colbourn Ch.J.* The combinatorics of network reliability. N.Y. : Oxford Univ. Press, 1987.

4. *Lucet C., Manouvrier J.-F.* Exact methods to compute network reliability // Proceedings of «Mathematical Methods in Reliability» conference, 1997.

5. *Rebaiia M., Ait-Kadi D.* Network reliability evaluation and optimization : Methods, algorithms and software tools // CIRRELT, 2013.

6. *Shooman A.M. Algorithms for network reliability and connection availability analysis* // Electro 95 Internationa Professional Program Proceedings, 1995. P. 309—333.

7. *Ушаков И.А.* Курс теории надежности систем : учеб. пособие. М. : Дрофа, 2008.

8. *Page L., Perry J.* A practical implementation of the factoring theorem for network reliability // IEEE Trans. Reliability, 1988. Vol. 37, N. 3. P. 259—267.

9. *Resende L.* Implementation of a factoring algorithm for reliability evaluation of undirected networks // IEEE Trans. Reliability, 1988. Vol. 37, N. 5. P. 462—468.

10. *Мигов Д.А.* Формулы для быстрого расчета вероятности связности подмножества вершин в графах небольшой размерности // Проблемы информатики. 2010. №2(6). С. 10—17.

11. *Мочалова А.В., Мочалов В.А.* Язык описания онтологически-семантических правил для вопросно-ответной системы // Труды VIII Международной научной конференции «Прикладная лингвистика в науке и образовании. ALPAC REPORT — полвека после разгрома», 24—26 ноября 2016 г. СПб. : РГПУ им. А.И. Герцена, 2016. С. 73—79.

Е.Р. Мунтян[1], В.Н. Литвиненко[2]
[1,2]Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
e-mail: [1]ermuntyan@sfedu.ru, [2]vitlit@sfedu.ru

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОВ

Введение

Для описания знаний традиционно используется представление о двухуровневой структуре знаний *Lederberg et al*. (рис. 1, *а*), наиболее распространенное в России [1; 2]. Основу такой структуры знаний составляют данные (понятия), т.е. отдельные факты, характеризующие объекты, процессы и явления предметной области, а также их свойства [3]. Для двухуровневой модели знания — это хорошо структурированные данные, или данные о данных, или метаданные [4].

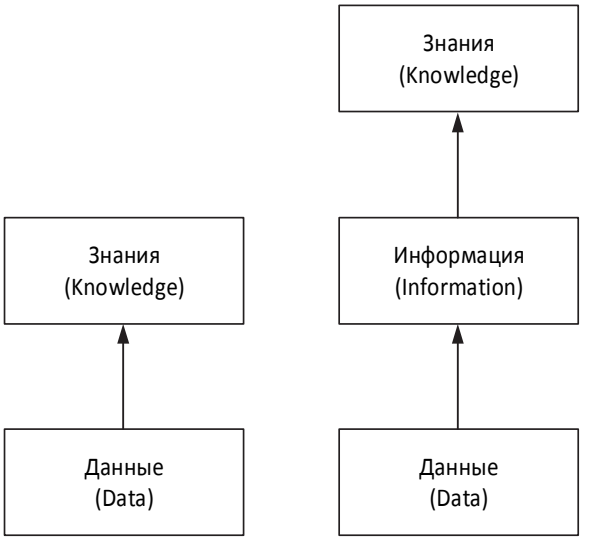


Рис. 1. Модели структуры знаний:
а — двухуровневая модель (*Lederberg*, 1969); б — трехуровневая модель (*Tuomi*, 1990)

© Мунтян Е.Р., Литвиненко В.Н., 2020

Известна трехуровневая структура представление знаний — модель *Tuomi* [5] (рис. 1, *б*). Здесь данные (понятия) — самые простые элементы знания, их цель неясна и неоднозначна. Информация есть объединение сведений или данных. Для информации характерна более высокая конкретность цели, чем для данных. Тогда знания представляют собой процесс обработки входной информации, включая координацию действия для достижения результатов, целей или получения конечных продуктов, т. е. «знание — это целенаправленное координирование действие» [6]. Кроме того, применяются четырех-, пяти- и шестиуровневые модели представления знаний [4].

Известны способы представления знаний, в основе которых используются продукционные модели, семантические сети и фреймы [7]. В то же время в литературе отмечается интерес к созданию гибридных моделей представления знаний [8—10], основанных на сочетании классических подходов.

В ряде работ представлены результаты решения комбинаторных задач на графах с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ) [11] или применения графов и их обобщений для решения задач ИИ [12—14].

Так, в [4] описаны подходы использования графов для представления знаний в четырехуровневой модели *Zeleny* [6], а в [15; 16] знания о взаимодействии объектов сложных технических систем в виде трехуровневой структуры получены при помощи графов. В рамках статьи авторы предлагают применить трехуровневую модель представления знаний [15] в организационных системах на примере решения задачи распространения информации в социальных сетях. Выбор графовой модели представления знаний для решения практических задач данной предметной области обусловлен гибкостью и проработанностью инструментария. В настоящее время достаточно исследованы модели классической теории графов, а также предложены некоторые развития таких моделей, например графы, учитывающие разнотипные и множественные связи между вершинами, что позволяет расширить функциональные возможности моделей для различных предметных областей [17; 18].

Формальное описание нечеткого графа для моделирования задач организационных систем

Формальное описание нечеткого графа с множественными и разнотипными связями:

$$G' = (Gv, Ge), \tag{1}$$

где $Gv = \{gv_1, gv_2, \ldots, gv_n\}$ — множество вершин; $Ge = \{ge_1, ge_2, \ldots, ge_m\}$ — множество ребер (связей) графа (*gv — graph vertex*, *ge — graph edge*).

Вершинам gv_i и ребрам ge_j графа G' могут быть назначены веса $\eta_i \in [0; 1]$ и $\mu_j \in [0; 1]$. Весам вершин и ребер придается смысл достоверности или степени принадлежности нечеткому множеству [19]. Степени принадлежности могут быть постоянными или вычисляемыми по функциям принадлежности нечетких либо лингвистических переменных.

Нечеткий граф G' позволяет сочетать несколько видов связи [18]: ориентированные и неориентированные ребра; однотипные, разнотипные и множе-

ственные ребра в виде вектора. Граф G' может быть связанным или несвязанным. Граф является связанным, если любая пара его вершин связана [20]. Если $Ge = ø$ при $Gv \neq ø$, то граф G' является нуль-графом [21] и все его вершины изолированы.

С целью определения возможности распространения информации в социальных сетях предлагается использовать граф, вершины gv_i которого соответствуют акторам [22], а ребра ge_j — отношениям между ними. Здесь акторы — пользователи социальной сети, между которыми существуют разнотипные отношения. Тогда вес вершины — продолжительность пользования сетью.

При этом неориентированные однотипные ребра ge_j соответствуют отношению «общаться в сети», а их веса μ_j — степени интенсивности общения акторов. А неориентированные разнотипные ребра ge_j представляют отношения «обсуждать тему, связанную с угрозой терроризма», «обсуждать политические ситуации», «обсуждать социальные вопросы», а их веса μ_j соответствуют степени интенсивности общения акторов на определенную тему.

Для оценки значения показателей весов ребер используется вербальное описание (очень слабый показатель, слабый показатель, умеренный показатель, сильный показатель, очень сильный показатель) с соответствующими определениями значений весов посредством числовых интервалов или нечетких множеств.

Трехуровневая модель представления знаний на основе графа

Для представления знаний используем трехуровневую структуру [15], которая формально описана в виде кортежа:

$$MK = <D, I, K>, \quad (2)$$

где D (*data*) — данные; I (*information*) — информация; K (*knowledge*) — знания.

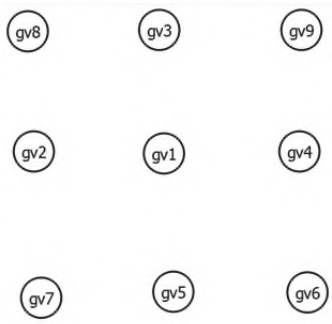


Рис. 2. Данные D (граф G'_1)

Если для реализации трехуровневой модели знаний MK используется граф с множественными и разнотипными связями, то такая модель может быть представлена следующим образом:

— данные D соответствуют вершинам нуль-графа $G'_1 = (Gv_1)$ (рис. 2);

— информация I отображается в неориентированном связанном графе $G'_2 = (Gv_1, Ge_2)$ (рис. 3);

— знания K — это путь в графе, ведущий к некоему результату. Например, знания могут быть представлены в виде пути Sg_l, состоящего из ребер заданного типа в графе $G'_3 = (Gv_1, Ge_3)$ (рис. 4).

На рисунке 2 изображен нуль-граф G'_1, заданный подмножеством вершин $Gv_1 = \{gv_1, gv_2, \ldots, gv_9\}$, которые соответствуют акторам a_1 — a_9.

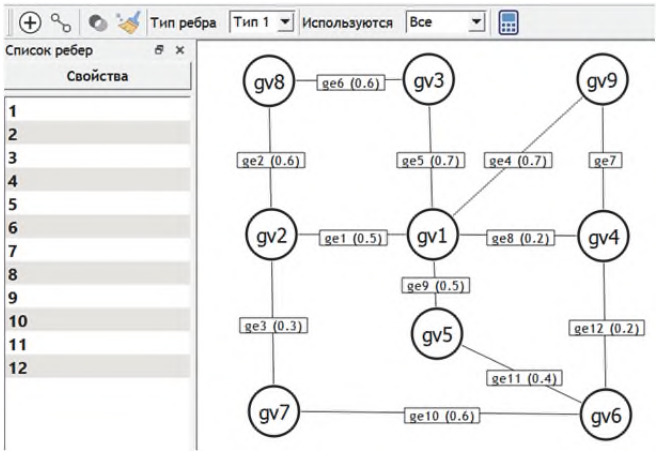


Рис. 3. Информация I (граф G'_2)

Вес вершины демонстрирует продолжительность пользования сетью. Такой граф при помощи вершин дает возможность представить данные D о пользователях социальной сети: число пользователей и длительность их отношения к сети. Однако граф G'_1 не позволяет отобразить информацию об общении пользователей, что имеет значение для решения поставленной задачи.

При этом нечеткий связанный граф G'_2, заданный множеством вершин Gv_1 и множеством ребер графа $Ge_2 = \{ge_1, ge_2, \ldots, ge_{12}\}$ (рис. 3), позволяет представить информацию I на втором уровне модели за счет использования однотипных ребер ge_j. Как отмечалось ранее, однотипные ребра ge_j соответствуют отношению «общаться в сети», а их веса μ_j — степени интенсивности общения акторов. Числовые значения весов ребер, отличные от «1», указаны на рисунке 3 для каждого ребра, например для ребра ge_1—0,5, для ребра ge_2—0,6.

Моделирование и исследование графов выполнено в программном модуле (ПМ) [23]. Результаты исследования графа G'_2 показывают, что актор a_1 — самый общительный, а акторы a_8, a_9 имеют наименьшее значение для распространения информации.

Однако для определения возможности распространения информации в социальных сетях оказывается недостаточной информация о наличии пользователей и их связях внутри сети. Необходимы сведения о возможных способах распространения информации определенной направленности. Авторы полагают, что решение этой задачи позволит сформировать знания K.

Граф G'_3, заданный множествами вершин Gv_1 и ребер $Ge_3 = \{Ge_2, ge_{13}, ge_{14}, \ldots, ge_{17}\}$ (рис. 4), позволяет представить знания K на третьем уровне модели за счет использования разнотипных ребер ge_j. Ребра графа типа tp_1 соответствуют отношению «обсуждать тему, связанную с угрозой терроризма», а их веса μ_j демонстрируют степень интенсивности общения акторов на эту тему.

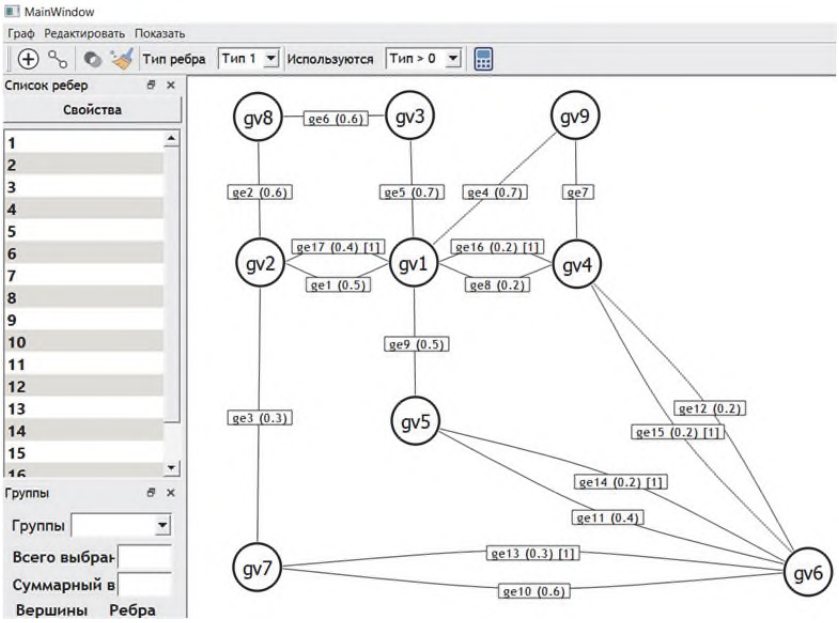


Рис. 4. Знания K, представленные в виде пути Sg_1 графа G'_3

Путь $Sg_1 = \{ge_{13}, ge_{14}, ge_{15}, ge_{16}, ge_{17}\}$, состоящий из ребер типа tp_1, проходит через вершины gv_7, gv_6, gv_5, gv_4, gv_2, gv_1. Тогда, для трехуровневой модели знаний MK путь Sg_1 представляет собой знания K.

Анализ результатов исследования графа G'_2 позволяет:

— определить путь распространения информации о терроризме в социальной сети, который соответствует пути Sg_1 графа;

— выявить пользователя, через которого в сети проходит наибольший поток информации об угрозе терроризма (актор a_4), тогда как наименьшее значение для распространения информации на заданную тему имеют пользователи, соответствующие акторам a_2, a_7.

Если предположить, что в графе присутствуют ребра других типов, например tp_2, tp_2 и т. д., которые соответствуют другим отношениям акторов, то для модели MK знания K будут представлены рядом путей из разнотипных ребер.

Соответственно, множество путей, состоящих из разнотипных ребер графа, моделирующего взаимодействие субъектов организационной системы, представляют собой знания, которые для заданной предметной области позволяют решить задачу распространения информации в социальных сетях. Процесс формирования таких путей и, особенно, возможности его автоматизации не рассматриваются в рамках данной статьи и будут описаны в последующих работах авторов.

Таким образом, обобщение структуры знаний (2) для графа G будет представлено на трех уровнях:

— на первом уровне исходные данные D соответствуют вершинам $gv_i \in Gv$, где $Gv = \{gv_i \mid i = 1, 2, \ldots, n\}$ — множество вершин графа G. Здесь данные обладают минимальными свойствами;

— на втором уровне информация I отображается в виде ребер $ge_j \in Ge'$, где $Ge' = \{ge_j \mid j = 1, 2, \ldots, m\}$ — подмножество однотипных ребер графа G. Информация I позволяет конкретизировать данные;

— знания K формируются на третьем уровне и представляют собой множество путей $Sg = \{Sg_l \mid l = 1, 2, \ldots, k\}$ в графе G, ведущих к некоему результату. При этом k — количество путей, состоящих из разнотипных ребер $ge_j \in Ge''$, где $Ge'' = \{ge_j \mid j = (m + 1), (m + 2), \ldots, f\}$ — подмножество разнотипных ребер графа G, а f — их число. Здесь множество ребер графа G $Ge = Ge' \cup Ge''$.

Полученные знания K в виде множества путей позволяют получить результаты решения практической задачи в модели взаимодействия субъектов организационной системы, например, распространения информации в социальных сетях с целью предотвращения угрозы терроризма.

Заключение

В статье обосновано использование графов для представления трехуровневой структуры знаний в области моделирования задач организационных систем. Рассмотрен пример получения знаний для определения возможности распространения информации в социальных сетях с целью предотвращения угрозы терроризма. Для анализа данных в организационных системах предложено использование программного модуля, позволяющего исследовать графы с множественными и разнотипными связями. Предложенная трактовка структуры и заложенный в графовую модель смысл позволяет сформировать знания за три этапа вместо четырех и более этапов, а значит, снизить временные затраты на решение ряда практических задач предметной области. Кроме того, создаются новые возможности для аналитического изучения знаний и информации, их свойств и взаимосвязи.

Список литературы

1. *Кондрашина Е.Ю., Литвинцева Л.В., Поспелов Д.А.* Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / под ред. Д.А. Поспелова. М. : Наука, 1989.

2. *Вагин В.Н.* Знание в интеллектуальных системах // Новости искусственного интеллекта. 2002. № 6 (54). С. 8—18.

3. *Lederberg J., Sutherland G.L., Buchanan B.C. et al.* Applications of artificial intelligence for chemical inference. 1. The number of possible organic compounds. Acyclic structures containing C, H, O and N // Journal of American Chemical Society. 1969.

4. *Бронфельд Г.Б.* Некоторые возможности формального представления структуры знаний // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 4 (97). С. 91—100.

5. *Tuomi I.* Data is more than knowledge: implications of the reversed knowledge hierarchy for knowledge management and organizational memory // Journal of Management Information Systems. 1999. No 16(3). P. 103—107.

6. *Zeleny M.* Management Support Systems: Towards Integrated Knowledge Management // Human Systems Management. 1987. No 7(1). P. 59—70.

7. *Уэно Х., Коямо Т., Окамото Т. и др.* Представление и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. М. : Мир, 1989.

8. *Авдеенко Т.В., Бакаев М.А.* Гибридная модель представления знаний для реализации вывода во фреймовой онтологии // Научный вестник НГТУ. 2013. № 3 (52). С. 84—90.

9. *Еремеев А.П.* Развитие аппарата таблиц решений в контексте создания гибридных интеллектуальных систем семиотического типа // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы III Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2016. С. 121—132.

10. *Мунтян Е.Р.* Использование гибридных подходов для представления знаний // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта. 2018. С. 199—203.

11. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В. и др.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / под ред. А.В. Колесникова. М. : ИПИ РАН, 2011.

12. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R.* Researches of interaction of actors with use fuzzy hypergraph and cognitive modeling // Papers in English 14th International scientific-techical conference on actual problems of electronics instrument engineering: IEEE. 2018. P. 127—131.

13. *Sergeev N., Kolodenkova A., Muntyan E.* Assessment of qualification of university graduates on the basis of fuzzy graph approaches // Proceedings of 2018 4th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). 2018. P. 1—5.

14. *Muntyan E., Sergeev N., Tselykh A.* Analysing big social graphs using a list-based graph folding algorithm [Электронный ресурс] // ITM Web of Conferences (ICICCI 2018). 2019. Vol 25. URL: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/abs/2019/02/itmconf_icicci 2018_01003/itmconf_icicci2018_01003.html.

15. *Мунтян Е.Р.* Трехуровневая модель представления знаний на основе графов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 5. С. 145—157.

16. *Мунтян Е.Р.* Представление знаний в граф-моделях сложных технических систем // Информатизация и связь. 2020. № 2.

17. *Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р.* Использование списков для представления социальных отношений // Информатизация и связь. 2018. № 4. С. 43—49.

18. *Мунтян Е.Р.* Реализация нечеткой модели взаимодействия объектов сложных технических систем на основе графов // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 3. С. 411—418.

19. *Ярушкина Н.Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. М. : Финансы и статистика, 2004.

20. *Оре О.* Теория графов. М. : Наука, 1980.

21. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Дискретная математика : учебник. М. : Физматлит, 2014.

22. *Латур Б.* Пересборка социального. Введение в акторно-сетевую теорию. М. : ГУ-ВШЭ, 2014.

23. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018665499. Программный модуль для представления акторов и отношений между акторами на основе графов / Е. Р. Мунтян. Зарег. 05.12.2018. М. : Роспатент, 2018.

С. Б. Румовская
Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН, Калининград, Россия
e-mail: sophiyabr@gmail.com

РЕДУКЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ С КОГНИТИВНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение

В настоящее время существенное разнообразие перерабатываемой информации и невиданные темпы увеличения ее объемов, а также неоднозначность оценки диагностических ситуаций, ошибки в выборе приоритетов и противоречивость требований способствуют все более частому появлению ситуаций с недостаточно выявленными или обнаруженными условиями и с неопределенной целью — проблем, в том числе и в медицине. В [1] определена неоднородная (гетерогенная) диагностическая задача *(диагностическая проблема)* как задача с нефиксированными предметной и проблемной областями. Диагностическая проблема — сложная задача распознавания болезни и оценки индивидуальных биологических особенностей и социального статуса объекта диагностики (пациента) путем истолкования результатов целенаправленного медицинского обследования и их обобщения в виде установленного диагноза. Характер принятия решений относительно проблемы полиязыковый и состав, а значит, и структура ее — переменные величины. Это задачи, включающие «однородные подзадачи» со свойствами зашумленности, нечеткости исходных данных, специфицирующиеся одним из методов формализованного представления систем. Множество подзадач включают функциональные подзадачи, составляющие функциональную структуру гетерогенной задачи, и технологические — решаемые для эффективной организации обработки данных и знаний в ходе диагностики.

Кроме того, клиническое мышление [2] нельзя отождествлять с научным (формально-логическим), философским или образно-художественным, так как оно представляет собой сочетание всех указанных видов мышления. Основная сложность состоит в том, что в каждом конкретном случае удельный вес разных видов мышления всегда отличен, что и предопределяет неповторимость и сложность врачебного мышления.

В работе представлен новый метод редукции диагностической проблемы, учитывающий механизмы решения проблем специалистом и когнитивную визуализацию ее элементов. Для разработки использовались результаты ис-

© Румовская С. Б., 2020

следований В. Ф. Спиридонова по механизмам решения проблем и задач, а также результаты исследований в области системного анализа, направленные на особенности процесса редукции и представления ее результата — декомпозиции в зависимости от типа задач.

1. Методы редукции

В системном анализе в зависимости от особенностей задач применяются соответствующие методы редукции. Для задач анализа сложных механических, биологических и экономических систем, задач о собственных значениях, задач регулирования, оптимизации и анализа устойчивости по частям методом расчленений для систем с большим числом переменных используется диакоптика Крона [3]. Для краевых задач областей сложной геометрической формы, для построения быстросходящегося итерационного процесса решения систем большой размерности, для распараллеливания вычислений — методы декомпозиции области [4—6]. Методы разделения графов [7—12] применяются в методе конечных элементов, задачах линейного программирования, проектирования сверхбольших интегральных схем, транспортных задачах и задачах планирования. Для задач программирования для многопроцессорных вычислительных систем используются методы декомпозиции данных [13], функциональная [13] и программная декомпозиция [14]. Особую роль для решения неоднородных, сложных диагностических задач (проблем) играют методы редукции, основанные на знаниях [15].

Метод редукции по фазам управления использует идею классификации задач по фазам управления. Метод исходит из предположения, что в проблеме можно выделить однородные подобласти, наследующие свойства фаз управления, т. е. подобласти однородных задач учета, анализа, прогнозирования и т. п.

Метод редукции по информационно-управляющим отношениям предполагает, что проблема может быть разделена в результате анализа информационных отношений между ее подзадачами. Подзадача в этом случае представляется моделью типа «черный ящик», для которого определены вход и выход. Полученная в результате такой редукции декомпозиция должна отображать обратные и координирующие связи источников и приемников информации, т. е. информационно-управляющие связи. Выделяют четыре информационно-управляющие структуры: «последовательность» или «цепочка», «предобработка» или «постобработка», «подчиненная обработка», «метаобработка». Проблема ассоциируется в единстве с ее решателем, а декомпозиция представляет собой сеть решателей, связанных информационно-управляющими связями.

Метод редукции по стратам. Редукция по стратам зависит от профессиональных точек зрения на одну и ту же проблему. В этом случае однородность в пределах страты проявляется в однородности языка профессиональной деятельности, однородности фундаментальных, полностью формализо-

ванных знаний и в определенной степени в частично формализованных знаниях. Проблемы данного метода редукции — выбор экспертов и смещение акцентов на согласование результатов решения однородных задач. Метод избыточен, поскольку заменяет моделирование проблемы моделированием простых задач — профессиональных образов.

Метод смешанной редукции — заданы приоритеты на множестве методов редукции, основанной на знаниях: фазовая редукция имеет первый приоритет; второй приоритет имеет стратификация или информационно-управляющая редукция (отражают системный и информационный подходы); третий приоритет присвоен методам редукции формализованных или трудноформализуемых задач.

Перечисленными выше методами редукции не ограничивается всё многообразие подходов к построению декомпозиции неоднородной задачи (проблемы), задачи-системы. Например, в [16] предложен подход к декомпозиции проблемы диагностики множественных отклонений — базируется на теории J. A. Reggia [17] покрытия множества. Диагностическая проблема редуцируется относительно гипотез об общих и непересекающихся причинно-следственных связях между симптомами. Результирующая структура базируется на вычислительных принципах причинно-следственных связей, независимости подзадач и минимальной факторизуемости. Таким образом, поддержка принятия решения представляет собой интерпретацию симптомов. База знаний представляет собой множество симптомов и множество соответствующих им патологий, обусловливающих эти симптомы. Есть ряд работ [18—20], описывающих декомпозицию проблем технического проектирования информационных систем, базирующуюся на понятиях — структура, функции и цели, а также описывающих применение генетического оператора, кроссовера и нейросетей.

В настоящее время гетерогенные (неоднородные) диагностические задачи лучше всего решают коллективы экспертов (консилиумы), что диктует необходимость работы со знаниями. Поэтому методы редукции, основанные на знаниях, — базовые для построения декомпозиций диагностических проблем в медицине.

2. Редукция диагностической проблемы

Редуцировать диагностические проблемы предлагается вширь и вглубь (рис. 1). Редукция вширь — декомпозиция по профессиональным нишам или, следуя Месаровичу и Такахаре [21], по стратам, анализируя горизонтальные связи, создаваемые лицом, принимающим решения (ЛПР — заместитель главного врача по медицинской части, начмед), на некоторое время, ситуативно, чтобы решить диагностическую проблему. Проблема анализируется с различных точек зрения, относительно позиций наблюдателей, экспертов — врачей смежных специальностей. При этом качество решений зависит от количества выделенных аспектов-страт. Такая редукция вширь раскрывает междисциплинарность проблемы профессиональную.

А междисциплинарность методологическую раскрывает редукция вглубь, которая основывается на психологических исследованиях В. Ф. Спиридонова и выявленном им механизме решения проблем — «изменение представления проблемы в ходе решения». Согласно этим исследованиям, эксперты, опытные специалисты в различных областях редуцируют проблему в образ тесно связанной и иерархически выстроенной системы задач и обслуживающих их подзадач, предполагающих наличие знания о способе их решении.

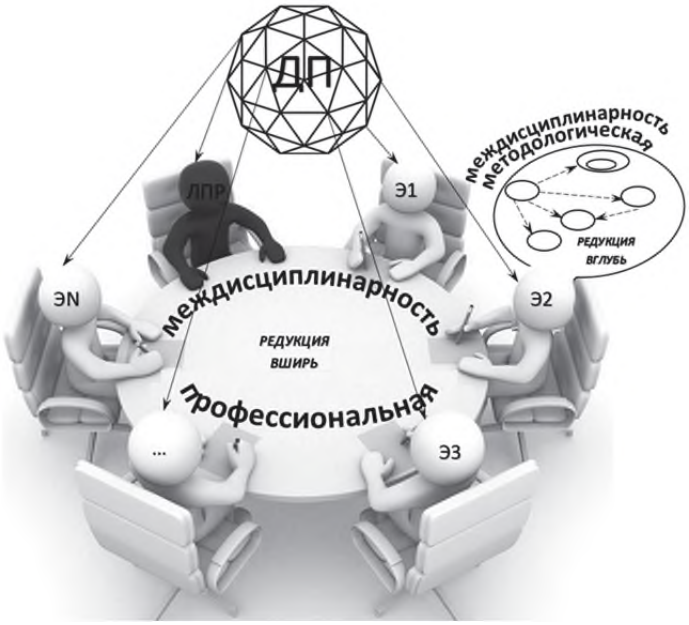


Рис. 1. Подход к редукции диагностической проблемы:
ЛПР — лицо, принимающее решение; Э1,…,ЭN — эксперты, узкоспециализированные врачи;
ДП — диагностическая проблема

Другими словами, диагностическая проблема представляется как декомпозиция иерархически выстроенных с горизонтальными связями элементов разного типа:

• «Предметное диагностическое решение» — конкретные действия, результатом которых является достижение поставленной цели — диагноз (план процесса диагностики, план обследования пациента: «чтобы поставить диагноз, необходимо собрать данные анамнеза, провести физикальное и при необходимости лабораторное и инструментальное обследования»).

• «Диагностическая задача» — более крупная и «диагностическая подзадача» — более мелкая задача, связанная с решением крупной (чтобы подтвердить предварительный диагноз, требуется сделать ультразвуковое исследование брюшной полости и общие анализы крови, мочи и биохимию; перед

тем как диагностировать ишемическую болезнь сердца, следует выделить информативный набор показателей состояния здоровья пациента относительно данного заболевания).

• «Диагностические решения-связки» — действия, учитывающие конкретные условия по типу «если…, то...».

• «Скомпенсированные затруднения» (часто встречающиеся трудности, для которых найдено типовое решение — диагностические задачи, для решения которых есть четкий и однозначный протокол обследования).

При этом в рамках проблемно-структурной методологии функциональных гибридных интеллектуальных систем:

• Диагностические задачи и скомпенсированные затруднения представляют собой функциональные подзадачи, составляющие функциональную структуру диагностической проблемы.

• Диагностические подзадачи — это технологические задачи, решаемые для организации эффективной обработки данных и знаний в ходе диагностического процесса.

• Диагностические решения-связки определяют часть горизонтальных связей подзадач.

• Предметное решение — это описание концептуальной модели диагностического процесса.

На рисунке 2 представлена общая схема редукции диагностической проблемы. Введем обозначения:

• p_D — диагностическая проблема; $p_{u\ 1},...,p_{u\ n1}$ — множество задач учета; $p_{k\ 1},...,p_{k\ n2}$ — множество задач контроля;

• $p_{predinf\ tex}$ — технологическая задача предобработки информации;

• $p_{exp\ 1},...,p_{exp\ n}$ — множество подпроблем, решаемых экспертами-врачами; p_{LPR} — подпроблема, решаемая лицом, принимающим решения (ЛПР), лечащим врачом;

• p_k — координирующая подзадача;

• $p_{dpodz\ tex\ 2}$ — техническая диагностическая подзадача 2 для диагностической задачи $p_{dz\ 1}$;

• $p_{dz\ 1},...,p_{dz\ n4}$ — множество диагностических задач; $p_{skzat\ 1},...,p_{skzat\ n3}$ — множество скомпенсированных затруднений;

• $p_{FKOE1},...,p_{FKOEn}$ — множество подпроблем формирования когнитивных образов экспертов-врачей узкой специализации;

• p_{FKOLPR} — подпроблема формирования когнитивного образа ЛПР;

• p_{FKOO} — подпроблема формирования когнитивного образа объекта диагностики.

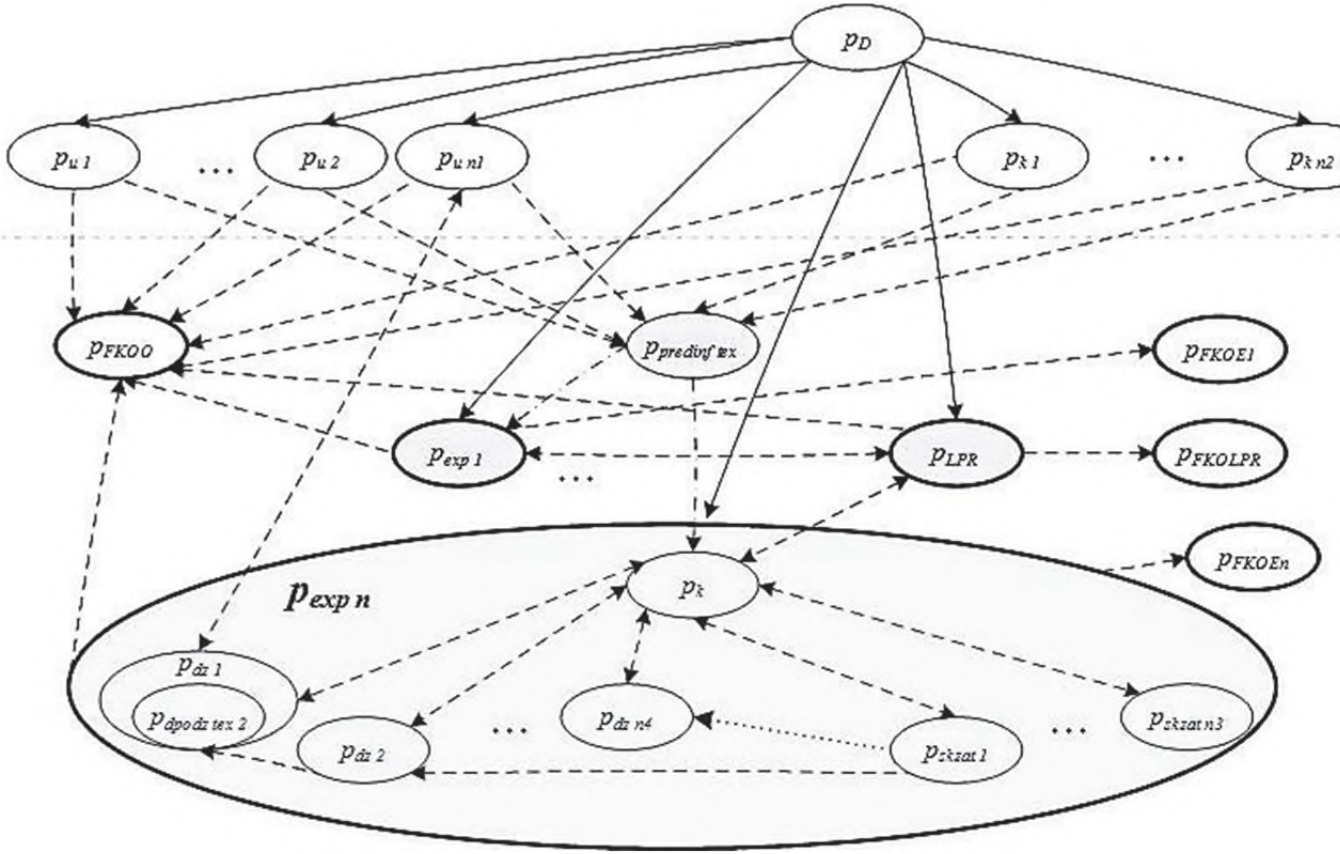


Рис. 2. Общая схема редукции диагностической проблемы:
→ — отношения «целое-часть»; - - → — информационно-управляющие отношения;
·····→ — диагностические решения-связки; - · → — отношения определения

Метод редукции диагностической проблемы в медицине разрабатывался на базе смешанного метода редукции, основанного на знаниях. В смешанной редукции методы ранжированы.

На рисунке 2 над пунктирной линией отображены результаты фазовой редукции, которая позволяет выделить скомпенсированные затруднения, а под пунктирной линией — редукции по стратам (выделяются подпроблемы, решаемые экспертами-врачами) и редукции по информационно-управляющим отношениям (подпроблемы связываются в информационно-управляющие структуры; представление подпроблем в сознании экспертов-врачей).

Фазовая редукция имеет первый приоритет, что позволяет не только отделить задачи пассивных фаз (учет, контроль), которые могут быть решены в рамках традиционных технологий информатики — баз данных, электронных таблиц, тестовых и графических редакторов, от задач активных фаз.

Однако при диагностировании в медицине преимущественно решаются именно задачи учета и контроля, поэтому на рисунке 2 выделены именно они.

Второй приоритет отдается стратификации или информационно-управляющей редукции, которые отражают системный и информационный подходы.

Относительно медицины этот этап также претерпевает изменения:

• сначала запускается редукция по стратам, которая позволяет выделить профессиональные образы диагностической проблемы (подпроблемы $p_{exp\ 1},...,p_{exp\ n}$), для которых выделяется подзадача предобработки информации $p_{predinf\ tex}$;

• затем выделенные профессиональные образы после запуска метода редукции по информационно-управляющим отношениям связываются координирующей задачей p_{LPR} в структуру «метаобработка», которая фактически выполняет и функцию постобработки информации, полученной от всех $p_{exp\ 1},...,p_{exp\ n}$, а также содержит предметное диагностическое решение (план диагностики); при этом каждый профессиональный образ связывается в структуру «последовательность» с соответствующей подпроблемой формирования когнитивного образа. На этом этапе на задачах $p_{exp\ 1},...,p_{exp\ n}$ могут быть также установлены и информационно-управляющие отношения.

Каждая подпроблема в сознании эксперта аналогично исходной диагностической проблеме представляется как декомпозиция иерархически выстроенных с горизонтальными связями элементов разного типа во главе с p_k (структура «метаобработка»): диагностические задачи и диагностические подзадачи, диагностические решения-связки и скомпенсированные затруднения.

Третий приоритет у методов редукции формализованных или трудноформализуемых задач, преобразующих подзадачи в граф И/ИЛИ и КОМБ (на рис. 1 не показана).

С учетом вышесказанного редукция диагностической проблемы p_D выполняется по следующей схеме:

$$
{}^{8}x^{n}\Big|_{D}^{u} \xrightarrow{p_D, p_D|^{S}, p_D|_{p}^{e}, p_D|_{m}^{e}, p_D|^{kr}} \left({}^{8}X^{n}\Big|_{u}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{k}^{h}, {}^{8}x^{n}\Big|_{LPR}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{exp}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{FKO}^{h}; \frac{1}{{}^{88}r_{2}^{n}} \right) \circ
$$

$$
\circ \left({}^{8}X^{n}\Big|_{u}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{k}^{h}; {}^{88}r_{1}^{n} \right) \circ \left({}^{8}x^{n}\Big|_{predinf\ tex}^{h}, {}^{8}x^{n}\Big|_{LPR}^{h}; {}^{88}R_{4}^{n} \right) \circ \left({}^{8}X^{n}\Big|_{exp}^{h}, {}^{8}x^{n}\Big|_{LPR}^{h}; {}^{88}R_{3}^{n} \right) \circ
$$

$$
\circ \left({}^{8}X^{n}\Big|_{exp}^{h}, {}^{8}x^{n}\Big|_{LPR}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{FKO}^{h}; {}^{88}R_{3}^{n}, {}^{88}R_{4}^{n} \right);
$$

$$
{}^{8}x^{n}\Big|_{exp\ i}^{u} \xrightarrow{p_{exp\ i}, p_{exp\ i}|_{v}^{e}, p_{exp\ i}|_{m}^{e}, p_{exp\ i}|^{kr}} \left({}^{8}x^{n}\Big|_{k}^{h}, {}^{8}x^{n}\Big|_{dpodz\ tex\ 2}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{dz}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{skzat}^{h}; \frac{1}{{}^{88}r_{2}^{n}}, {}^{88}R_{3}^{n}, {}^{88}R_{4}^{n} \right),
$$

где ${}^{8}x^{n}\Big|_{D}^{u} \in {}^{8}X^{n}\Big|^{u}$ — знак диагностической проблемы в информационном языке функциональных гибридных интеллектуальных систем; p_D — схема ролевых концептуальных моделей задачи планирования; $p_D|^{kr}$ — схема ролевых концептуальных моделей процедуры координации решения однородных задач; ${}^{8}X^{n}\Big|_{u}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{k}^{h}, {}^{8}x^{n}\Big|_{LPR}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{exp}^{h}, {}^{8}X^{n}\Big|_{FKO}^{h}$ — множества знаков однородных задач учета, контроля, подпроблемы, решаемой ЛПР, подпроблем, решаемых экспертами-врачами, подзадач формирования когнитивного образа соответственно; ${}^{88}r_{1}^{n}$, $\frac{1}{{}^{88}r_{2}^{n}}$ — отношения «предшествовать» и «целое-часть» соответственно; $p_D|_{p}^{e}, p_D|_{v}^{e}, p_D|_{m}^{e}$ — схемы ролевых концептуальных моделей элементарных информационно-управляющих структур («последовательность», «подчиненная обработка», «метаобработка»); ${}^{88}R_{3}^{n}, {}^{88}R_{4}^{n}$ — множества отношений декомпозиции и отношений элементов диагностической проблемы и подпроблем/однородных подзадач соответственно; $p_D|^{S}$ — схема ролевых концептуальных моделей для стратифицированного описания диагностической системы принятия решения [1].

Заключение

Используемая в данной работе приоритетная эвристика позволяет гибко сочетать достоинства различных методов редукции — неформальное, резкое сокращение размерности области допустимых решений на первых, менее формализованных этапах анализа сложных задач, с последующими формально-логическими приемами анализа.

Предложенный метод редукции позволит решать диагностические проблемы функциональными гибридными интеллектуальными диагностическими системами, разрабатываемыми по проблемно-структурной методологии, в рамках которой в профессиональных образах диагностические задачи и скомпенсированные затруднения представляют собой функциональные под-

задачи, а диагностические подзадачи — это технологические задачи. Диагностические же решения-связки определяют часть горизонтальных связей подзадач, а предметное решение представляет собой описание концептуальной модели диагностического процесса. Функциональные гибридные интеллектуальные диагностические системы сделают преодоление проблемы видимым и контрастным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-07-00250 А.

Список литературы

1. *Румовская С. Б.* Исследование методов поддержки принятия коллективных диагностических решений и разработка инструментальных средств «Виртуальный консилиум» (на примере диагностики артериальной гипертензии) : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017.

2. *Спиридонов В. Ф.* Психология мышления: решение задач и проблем. М. : Генезис, 2006.

3. *Попков В. В.* Всеобщая инженерная наука Габриэля Крона // Вестник Международного института А. Богданова. 2000. № 3.

4. *Копысов С. П., Красноперов И. В., Рынков В. Н.* Объектно-ориентированный метод декомпозиции области // Вычислительные методы и программирование. 2003. Т. 4, № 1. С. 176—193.

5. *Przemieniecki J. S.* Theory of matrix structural analysis. N. Y. : McGaw-Hill, 1968.

6. *Соболев С. Л.* Алгоритм Шварца в теории упругости // ДАН СССР. 1936. Т. 4, № 6. С. 235—238.

7. *Гергель В. П.* Теория и практика параллельных вычислений : учеб. пособие. 2-е изд. М. : НОУ «Интуит», 2016.

8. *Lipton R. J., Tarjan R. E.* A separator theorem for planar graphs // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1979. № 36. P. 177—189.

9. *Earl R. Barnes.* An algorithm for partitioning the nodes of a graph // SIAM J. Algebraic Discrete Methods. 1984. Vol. 3. № 4. P. 541—550.

10. *Gaiy L. Miller, Shang-Hua Teng, Stephen A. Vavasis.* A unified geometric approach to graph separators // Proceedings of 31st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 1991. P. 538—547.

11. *Paige C. C., Saunders M. A.* Solution to sparse indefinite systems of linear equations // SIAM Journal on Numerical Ananlysis. 1974. № 12. P. 617—629.

12. *Fiduccia C. M., Mattheyses R. M.* A linear time heuristic for improving network partitions // Proceedings 19th IEEE Design Automation Conference. 1982. P. 175—181.

13. *Немнюгин С. А.* Модели и средства программирования для многопроцессорных вычислительных систем. М. : НОУ «Интуит», 2010.

14. *Орлов С. А., Цилькер Б. Я.* Технологии разработки программного обеспечения : учебник для вузов. 4-е изд. СПб. : Питер, 2012.

15. *Колесников А. В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / под ред. А. М. Яшина. СПб. : СПбГТУ, 2001.

16. *Wu T. D.* A problem decomposition method for efficient diagnosis and interpretation of multiple disorders // Comput Methods Programs Biomed, 1991. Vol. 35, № 4. P. 239—250.

17. *Reggia J.A., Nau D.S., Wang P.Y.* Diagnostic expert system based on a set covering model // Intl. Journal of Man-Machine Studies. 1983. Vol. 19. P. 437—460.

18. *Koopman P.J.* A Taxonomy of Decomposition Strategies Based on Structures, Behaviors, and Goals // 9th International Conference Desighn Theory and Methodology, ASME P. 1995. Vol. 83, №2. P. 611—618.

19. *Altus S.S., Kroo I.M., Gage P.J.* A Genetic Algorithm for Scheduling and Decomposition of Multidisciplinary Design Problems // Journal of Mechanical Design. 1996. Vol. 118. P. 486—489.

20. *Khare V.R., Yao X., Sendhoff B. et al.* Co-evolutionary modular neural networks for automatic problem decomposition. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2005. P. 2691—2698.

21. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М. *:* Мир, 1973.

Г.В. Рыбина[1], А.А. Слиньков[2], Д.Р. Буянов[3]

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

e-mail: [1]gvrybina@mephi.ru, [2]gvrybina@yandex.ru, [3]sanch971@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ БАЗ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ

Введение

В настоящее время важное место среди приоритетных направлений, определенных Указом Президента РФ (от 10.10.2019 г. №490) в Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 г., уделяется разработке и развитию программного обеспечения, в котором используются такие базовые технологии искусственного интеллекта (ИИ), как: технологии извлечения знаний из различных источников и интеллектуального анализа больших данных; технологии прогнозирования и поддержки принятия решений; технологии планирования и многоагентного управления целенаправленным поведением в неструктурированных средах; технологии обработки естественных языков и др.

Особую роль среди базовых технологий ИИ в настоящее время играют автоматизированные технологии получения знаний из таких различных источников, как эксперты, тексты на естественных языках (ЕЯ-текст) и базы данных (БД), которые могут эффективно использоваться для создания новых прикладных технологий в различных сферах экономики и производства. В этой связи в центре внимания исследований и разработок последних лет (отечественных и зарубежных) оказались вопросы, связанные с решением комплекса научных и технических проблем приобретения, представления и

© Рыбина Г.В., Слиньков А.А., Буянов Д.Р., 2020

обработки темпоральных (временных) знаний для построения динамических интеллектуальных систем, в частности динамических интегрированных экспертных систем (ИЭС) [1—5], использующихся для решения широкого класса неформализованных и формализованных задач различной практической значимости и сложности.

Цель работы — обсуждение некоторых новых результатов в этой области в контексте развития задачно-ориентированной методологии построения ИЭС для статических и динамических проблемных областей [1; 2].

1. Анализ технологий извлечения знаний из различных источников

Проблема приобретения темпоральных знаний наиболее остро возникает при решении сложных практических задач в таких областях, как энергетика, космос, экология и др., а также в социальной сфере, например в области здравоохранения, где накоплены значительные объемы данных и знаний. Поэтому для построения баз знаний (БЗ) для интеллектуальных систем типа ИЭС, как правило, требуется привлечение нескольких экспертов или групп экспертов, что существенно удорожает стоимостные и временные параметры разработки систем, особенно при отсутствии автоматизированных средств поддержки процессов получения знаний от эксперта/экспертов, — основного источника знаний [3—5].

В настоящее время типология источников знаний уже не ограничивается только экспертами, поскольку значительные объемы экспертных знаний накоплены в ЕЯ-текстах, различных прикладных онтологиях, а также в БД современных информационных бизнес-систем [6; 7]. Поэтому активно развиваются автоматизированные технологии, связанные с получением (выявлением) знаний из ЕЯ-текстов, и различные технологии получения знаний из БД (Data Mining, Deep Data Mining, Knowledge Discovery in Databases и др.) [2; 5].

Для решения проблем извлечения темпоральных знаний из ЕЯ-текстов в настоящее время применяются разные методы и подходы: машинное обучение нейронных сетей [8—10], построение онтологий и поиск на графе понятий [11], логика Маркова [12], рассмотрение синтаксиса и семантики конкретного языка [13], использование большого корпуса аннотированных с помощью языка TimeML проблемно-ориентированных текстов [14], получение темпоральной информации из временных рядов [15; 16]. Технологии получения знаний из темпоральных БД [17; 18] связаны с использованием таких алгоритмов, как Random Forest [19], темпоральный ID3 [20; 21] и др.

Однако все технологии получения знаний из различных источников возникали и развивались независимо, поэтому сегодня подобная автономность и распределенность не позволяют осуществлять эффективную разработку, сопровождение и мониторинг таких значительных информационных ресурсов, как БЗ, онтологии и БД, которыми обладают интеллектуальные системы, в частности ИЭС [1; 2]. Проблемы интеграции методов и технологий получе-

ния знаний из различных источников, а также исследования в области создания инструментальных средств и технологий распределенного приобретения знаний являются сегодня наиболее актуальными, о чем свидетельствует ряд работ, например [4; 5; 22—25] и др.

Опыт разработки прикладных ИЭС, в том числе динамических ИЭС [2; 3; 5] на основе задачно-ориентированной методологии (автор Г. В. Рыбина) [1] и поддерживающего ее инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, показал эффективность совместного использования трех источников знаний: эксперты, ЕЯ-тексты и БД. Например, анализ экспериментальных данных, полученных при создании БЗ нескольких прикладных ИЭС с применением комбинированного метода приобретения знаний (КМПЗ) [1—5; 24; 25], — неотъемлемой части данной методологии, свидетельствует, что локальное использование БД в качестве дополнительного источника знаний способно пополнить объем разрабатываемых БЗ на 10—20 %, в зависимости от специфики проблемной области (ПрО).

Современный этап развития технологии приобретения знаний из различных источников в контексте создания динамической версии КМПЗ и средств его поддержки, функционирующих в составе инструментария нового поколения типа WorkBench — комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, связан с автоматизацией процессов получения, представления и обработки темпоральных знаний для построения БЗ в динамических ИЭС. Актуальность исследования связана с тем, что в настоящее время, несмотря на существование значительного количества подходов к представлению темпоральных зависимостей, практически не рассматриваются вопросы получения темпоральных знаний для построения темпоральных БЗ в динамических интеллектуальных системах, в частности в динамических ИЭС [5].

Цель работы — представление новых результатов экспериментального программного моделирования процессов приобретения темпоральных знаний для автоматизированного построения БЗ в динамических ИЭС (на примере медицинской диагностики).

2. Особенности комбинированного метода приобретения знаний и средств его реализации

Базовая версия КМПЗ [1; 2; 24] и средства его поддержки постоянно развиваются и успешно применяются для автоматизации процессов разработки БЗ в статических ПрО, причем сегодня поддерживается распределенный вариант компьютерного приобретения знаний [24; 25], обеспечивающий в рамках клиент-серверной архитектуры интеграцию трех типов источников знаний (эксперты, ЕЯ-тексты, БД) с учетом их географической распределенности. Исходя из контекста данной работы сфокусируем основное внимание только на тех особенностях КМПЗ, которые наиболее важны для автоматизированного построения темпоральных БЗ в динамических ИЭС.

Общая организация процесса прямого получения знаний от экспертов путем компьютерного интервьюирования на всех этапах жизненного цикла построения ИЭС базируется на авторском подходе «ориентации на модель решения типовой задачи» [1], в соответствии с которым управляющие знания о стратегиях (методах) решения конкретных классов задач, решаемых схожим образом, оформляются в виде некоторой эвристической модели типовой задачи [1] (диагностика, проектирование, планирование и др.). Поэтому процессы получения знаний управляются с помощью наборов моделей решения типовых задач, для чего наработан и постоянно развивается ряд приемов и подходов, позволяющих создавать сценарии диалогов с экспертами, отражающих как *тематическую* структуру диалога (т. е. схему решения типовой задачи [1; 2]), так и *локальную* структуру диалога (шаги диалога [1; 2]), т. е. набор конкретных действий и реакций между экспертом и системой.

Процессы приобретения знаний от экспертов и ЕЯ-текстов — компьютерное моделирование, позволяющее на основе метода «имитация консультации» [1; 2] для построения схемы «действие — реакция» партнеров, строить все компоненты модели решения типовой задачи и формировать как фрагменты *поля знаний* [1; 2] (промежуточное представление структурированных знаний, используемое для верификации информации, полученной из различных источников), так и соответствующие фрагменты БЗ.

Все процессы интервьюирования экспертов поддерживаются интерпретатором сценариев диалога, причем каждый сценарий соответствует конкретному типу решаемой задачи, включая экранные формы для ввода недостоверных знаний [1] (неопределенность, неточность, нечеткость) и подключение средств, реализующих адаптивный метод репертуарных решеток [1] (для дифференцирования диагнозов в случае активации сценария для задачи медицинской диагностики). В составе программных средств поддержки базового и распределенного КМПЗ важное место занимает специализированный лингвистический процессор и совокупность динамически пополняемых словарей (лингвистические аспекты КМПЗ детально описаны в [1; 2; 24]).

КМПЗ — интеграция взаимосвязанных процессов компьютерного интервьюирования экспертов с методами обработки ЕЯ-текстов, вводимых в течение сеанса интервьюирования и после окончания в виде протоколов интервьюирования, а также с методами приобретения знаний из БД [1; 24; 25] на основе модифицированного алгоритма Random Forest [19].

Суть модификации известного алгоритма заключалась в использовании многомерного пространства признаков, один из которых — временная метка. Построение ансамбля деревьев решений производится в соответствии с Random Forest, однако расчет значения критерия разбиения претерпел изменения, обусловленные применением многомерного пространства признаков (критерием разбиения будет среднее арифметическое вычисленных значений информационной энтропии). Кроме того, в отличие от решающих деревьев, построенных на основе модифицированных алгоритмов CART и C4.5, использующихся в базовой версии КМПЗ [1; 24; 25], построение дерева осу-

ществляется до тех пор, пока не будут обработаны все элементы подвыборки и без применения процедуры отсечения ветвей. Алгоритм построения деревьев решений выполняется столько раз, сколько необходимо для того, чтобы минимизировать ошибку классификации объектов из тестовой выборки (классификация объектов производится путем голосования по аналогии с базовой версией Random Forest).

Таким образом, актуальная проблема текущего этапа исследований — дальнейшая эволюция КМПЗ, с целью разработки методов и средств автоматизированного построения темпоральных БЗ в динамических ИЭС. К настоящему времени уже разработаны и апробированы при создании нескольких прототипов динамических ИЭС модели, методы и программные средства представления и обработки темпоральных знаний [2—5; 26]. Ниже представлено описание текущих результатов экспериментального программного моделирования темпоральной версии КМПЗ.

3. Моделирование процессов автоматизированного извлечения знаний из различных источников

3.1. Общая организация «языкового эксперимента»

Для моделирования процессов извлечения знаний из экспертов и ЕЯ-текстов (подъязык деловой прозы [1; 2]) использовалась типовая задача — медицинская диагностика, а в качестве ПрО рассматривалась комплексная диагностика заболеваний молочной железы и диагностика травм коленного сустава. Модельные диалоги проводились в виде «языкового эксперимента» [2; 4; 5], связанного с поиском *темпоральной* информации, т. е. темпоральных отношений как внутри каждого ЕЯ-предложения, поступающего от эксперта, (с учетом текущего состояния локальной структуры диалога), так и с поиском отношений, указывающих на время создания текста.

Для этих целей использовались словарь темпоральных лексем, разработанный на основе [27; 28], специализированный лингвистический процессор и средства поддержки интервьюирования, функционирующие в составе средств комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ. В рамках «языкового эксперимента» реализовано около 50 сеансов интервьюирования с участием студентов, которые по принципу «сам себе врач» вводили лексемы (временные предлоги, целевые предлоги, причинные предлоги, частицы, наречия времени и др.) в соответствующие экранные формы для построения фрагментов поля знаний.

На основе проведенных экспериментов получена совокупность модифицированных сценариев, описывающих тематическую и локальную структуру диалога при решении типовой задачи медицинской диагностики, что позволило реализовать элементы «сквозной» технологии прямого приобретения и представления (в терминах расширенного языка представления знаний [1; 2]) фрагментов темпоральной БЗ, готовых для осуществления темпорального вывода на продукционных правилах [26].

Таким образом, использование набора модельных диалогов позволило экспериментально определить, какие темпоральные сущности (маркеры) [5] можно выявлять на основе алгоритмов и программных средств темпоральной версии КМПЗ, существенно пополнить текущий словарь темпоральных лексем и модифицировать отдельные программные компоненты.

3.2. Общая организация экспериментов с темпоральной БД

Другой комплекс экспериментов проводился с модифицированным алгоритмом Random Forest и средствами его реализации, использовавшимися для приобретения знаний из медицинской темпоральной БД, содержащей данные в определенном формате, причем набор медицинских данных экспортировался в БД под управлением СУБД SqLite 3, а затем в отдельную таблицу с выделением идентификаторов с присвоенными классами, (т. е. формируется таблица с объектами, которая содержит их атрибуты в каждый момент времени, и таблица с классами). Алгоритм Random Forest по данной темпоральной БД строит ансамбль деревьев, где каждое дерево комитета относит классифицируемый объект к одному из классов, т. е. голосует, и побеждает класс, за который проголосовало наибольшее число деревьев.

В контексте данной работы основная задача заключается в реализации процесса построения элементов поля знания после завершения работы алгоритма Random Forest. Здесь на полученном ансамбле деревьев применяется специальный алгоритм, на основе которого производится преобразование деревьев решений в элементы поля знаний (объекты и правила), с использованием некоторой дополнительной информации из темпоральной БД. Полученный фрагмент пригоден для дальнейшей верификации и объединения [1; 2; 12; 22] с фрагментами поля знаний, полученными в результате проведения сеансов интервьюирования экспертов [1; 2; 12; 22].

На рисунке 1 представлены примеры круговых диаграмм, отображающих количественный результат проведенных экспериментов, для чего были разработаны сценарии включающие: добавление новых событий и интервалов в модельные диалоги, за счет которых пополнился словарь темпоральных лексем; включение в поле знаний событий и интервалов без ссылок и/или с неверными значениями для проверки реакции средств поддержки верификации поля знания на аномалии (негативная проверка); использование синонимичных событий и интервалов для последующего экспериментального исследования средств объединения элементов поля знаний, полученных из источников различной типологии.

Сценарий проведения экспериментов с темпоральной БД включал (рис. 2): регистрацию темпоральной БД в динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ (под регистрацией подразумевается добавление файла, содержащего темпоральную БД, в директорию, где находится исполняемый файл); открытие БД и чтение данных, хранящихся в БД, а именно: идентификаторов объектов, классов и временных меток; создание файлов с сериализа-

цией ансамбля деревьев, описанием поля знания на расширенном языке представления знаний, а также описанием поля знаний на внутреннем представлении.

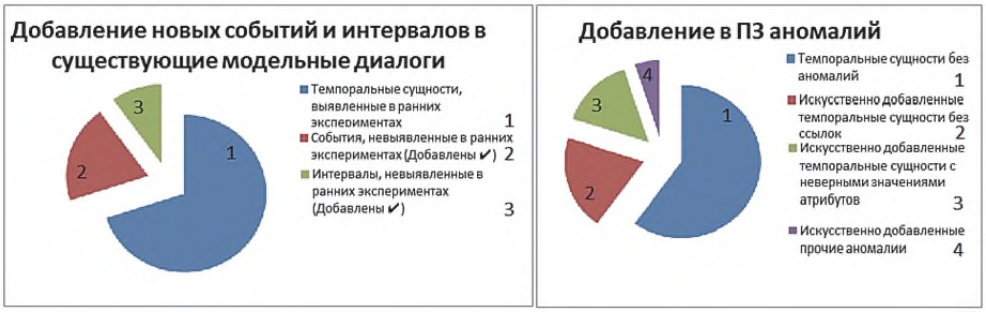


Рис. 1. Круговые диаграммы с результатами экспериментов

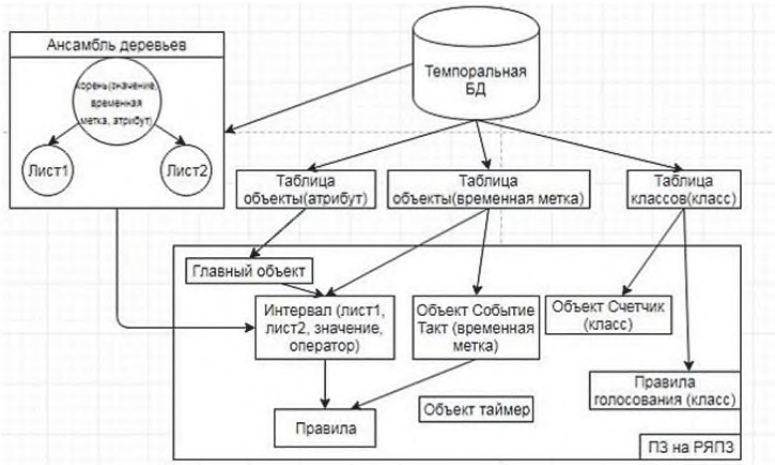


Рис. 2. Отображение темпоральной БД в элементы поля знаний

Следует отметить, что алгоритм Random Forest был протестирован на нескольких темпоральных БД, имеющих одинаковую структуру, но разное количество объектов, классов, временных меток, а также с различными форматами временных меток. К тому же при тестировании строились ансамбли из 50, 100 деревьев.

Заключение

Вне рамок данной работы остались вопросы, связанные с сопоставлением и объединением описанных в каждом фрагменте поля знаний объектов, их типов и правил. Здесь с учетом «темпоральной составляющей» используется

модифицированные алгоритмы и программные средства, разработанные для базового и распределенного КМПЗ. Кроме того, также не рассматривается вопрос верификации полученных знаний как важного этапа построения БЗ динамических ИЭС.

В целом разработанные методы, алгоритмы и технологии получения темпоральных знаний из различных источников (эксперты, ЕЯ-тексты, БД) особенно важны для медицинских ПрО, где аккумулируются значительные объемы темпоральной информации даже об одном пациенте, включая все его предыдущие состояния и болезни в широком временном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-01-00457).

Список литературы

1. *Рыбина Г.В.* Теория и технология построения интегрированных экспертных систем : монография. М. : Научтехлитиздат, 2008.

2. *Рыбина Г.В.* Интеллектуальные системы: от А до Я. Серия монографий в 3 кн. М. : Научтехлитиздат, 2015. Кн. 2 : Интеллектуальные диалоговые системы. Динамические интеллектуальные системы.

3. *Рыбина Г.В.* Современные архитектуры динамических интеллектуальных систем: проблемы интеграции и современные тенденции // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2017. № 2. С. 1—12.

4. *Rybina G.V., Danyakin I.D.* Combined Method of Automated Temporal Information Acquisition for Development of Knowledge Bases of Intelligent Systems. Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Knowledge Engineering and Applications. London : IEEE, 2017. P. 117—123.

5. *Рыбина Г.В.* Динамические интегрированные экспертные системы: технология автоматизированного получения, представления и обработки темпоральных знаний // Информационные измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16, № 7. С. 20—31

6. *Цветкова Л.А., Черченко О.В.* Внедрение технологий Big Data в здравоохранение: оценка технологических и коммерческих перспектив // Экономика науки. 2016. Т. 2, № 2. С. 139—150.

7. *Aggarwal C.C., Zhai C.* Mining Text Data. Springer, 2012.

8. *Verhagen M., Gaizauskas R., Schilder F. et al.* SemEval-2007 Task 15: TempEval Temporal Re-lation Identification // SemEval 07 Proceedings of the 4th International Workshop on Semantic Evaluations, Stroudsburg: Asso-ciation for Computational Linguistics. 2007. P. 75—80.

9. *Pan E.* Learning Temporal Information from Text / Encyclopedia of Data Warehousing and Mining, Second Edition, Montclair State University. USA. 2009. P. 1146—1149.

10. *Mani I., Verhagen M., Wellner B. et al.* Machine learning of temporal relations // In ACL-44:Proc. of the 21st Int. Conf. on Computational Linguistics and the 44th annual meeting of the Association for Computational Linguistics, Morristown. NJ, USA: Association for Computational Linguistics. 2006. P. 753—760.

11. *Schilder F.* Temporal Relations in English and German Narrative Discourse. Univ. of Edinburgh. College of Science and Engineering. School of Informatics. 1997.

12. *Yoshikawa K., Riedel S., Asahara M. et al.* Identifying Temporal Relations with Markov Logic // In Proceedings of the Joint Conference of the 47th Annual Meeting of the ACL and the 4th International Joint Conference on Natural Lan-guage Processing of the AFNLP. Suntec. Singapore, 2009. P. 405—413.

13. *Hagege C., Tannier X.* XTM: A Robust Temporal Text Processor // CICLing 08 Proceedings of the 9th international conference on Computational linguistics and intelligent text processing. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2008. P. 231—240.

14. *Pustejovsky J., Castano J., Ingria R. et al.* TimeML: Robust Specification of Event and Temporal Expression in Text // In Proceedings of New Directions in Question Answering. 2003. P. 28—34.

15. *Янковская А. Е., Колесникова С. И., Букреев В. Г.* Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов. Томск : ТПУ, 2010.

16. *Заболеева-Зотова А. В., Фамхынг Д. К., Захаров С. С.* Гибридный подход к обработке временной информации в тексте на русском языке // Труды 11-й нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием. М. : URSS, 2008. С. 228—235.

17. *Kaufmann M. et al.* Timeline Index: A Undefied Data Structure for Processing Queries on Temporal Data in SAP HANA // Proc. of the 2013 ACM SIGMOD Int. Conf. of Management of Data. N. Y. : ACM, 2013. P. 1173—1184.

18. *Wan Ishak et al.* Mining temporal reservoir data using sliding window technique // CiiT Int. J. of Data Mining and Knowledge Engineering, 2011.Vol. 3, No. 8. P. 473—478.

19. *Tzacheva A. A., Bagavathi A., Ganesan P. D.* MR — Random Forest Algorithm for Distributed Action Rules Discovery // International Journal of Data Mining & Knowladge Management Process. 2016. Vol. 6, No. 5. P. 15—30.

20. *Vagin V., Fomina M., Morosin O. ey al.* Temporal Decision Trees in Diagnostic Systems // 2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems. ICABCD 2018.

21. *Антипов С. Г., Фомина М. В.* Метод формирования обобщенных понятий с использованием темпоральных деревьев решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 2. С. 64—76.

22. *Khovrichev M., Elkhovskaya L., Fonin V. et al.* Intelligent Approach for Heterogeneous Data Integration: Information Processes Analysis Engine in Clinical Remote Monitoring Systems // 8th Int. Young Scientists Conf. 2019. Vol. 156. P. 134—141.

23. *Aljawarneh S., Anguera A., Atwood J. W. et al.* Particularities of data mining in medicine: lessons learned from patient medical time series data analysis // Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking. 2019. Iss. 1. Article 260.

24. *Рыбина Г. В.* Комбинированный метод приобретения знаний для построения баз знаний интегрированных экспертных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 8. С. 19—41.

25. *Рыбина Г. В., Дейнеко А. О.* Распределенное приобретение знаний для автоматизированного построения интегрированных экспертных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 4. С. 55—62.

26. *Рыбина Г. В., Мозгачев А. В.*, Реализация темпорального вывода в динамических интегрированных экспертных системах // Искуственный интеллект и принятие решений. 2014. № 1. С. 34—45.

27. *Ефименко И. В.* Семантика времени: модели, методы и алгоритмы идентификации в системах автоматической обработки естественного языка // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Лингвистика». М. : Изд-во МГУ, 2007. № 2.

28. *Арутюнва Н. Д., Янко Т. Е.* Логический анализ языка: Язык и время / отв. ред. Н. Д. Арутюнва, Т. Е Янко. М. : Индрик, 1997.

В.М. Чёрненький[1], В.И. Терехов[2], Ю.Е. Гапанюк[3]
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: [1]chernen@bmstu.ru, [2]terekchow@bmstu.ru, [3]gapyu@bmstu.ru

ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ — КОНЦЕПЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ

Введение

В статье рассматривается концепция гибридных интеллектуальных информационных систем (ГИИС), обобщенная структура ГИИС на основе сознания и подсознания, ряд реализаций интеллектуальных систем, использующих концепцию ГИИС. Показано, что предложенный подход позволяет реализовывать интеллектуальные системы в различных модальностях (изображения, звук, текст); при этом структура ГИИС инвариантна по отношению к обрабатываемой модальности. Таким образом, концепция ГИИС может рассматриваться в качестве архитектурного шаблона, упрощающего разработку интеллектуальных систем.

1. Гибридные интеллектуальные информационные системы

В настоящее время для построения интеллектуальных систем используется большое количество подходов: продукционные правила, нейронные сети, нечеткая логика, эволюционные методы и др. Отметим явную тенденцию к совместному применению разных методов для решения различных классов задач. Это привело к появлению такого направления, как «гибридные интеллектуальные системы» (ГИС). Основополагающими работами в области ГИС можно считать труды профессора А.В. Колесникова [1; 2].

При этом необходимо различать понятия «гибридная интеллектуальная система» и «интегрированная интеллектуальная система». Второе понятие более широкое. Профессор Г.В. Рыбина полагает [3], что интегрированная интеллектуальная система является гибридной только в случае полной интеграции ее компонентов.

В англоязычной литературе термин *hybrid intelligence* в основном используется для обозначения гибридизации различных методов мягких вычислений и экспертных систем [4, 5]: нейро-нечеткие системы, нечеткие экспертные системы, использование эволюционных методов для конструирования нейронных сетей и нечетких моделей, другие методы. Подобная «глубокая» гибридизация полностью соответствует критерию Г.В. Рыбиной о полной интеграции компонентов гибридной системы.

Ключевым вопросом становится вопрос о том, каким образом реализовать принцип гибридности. Ответ на этот вопрос предлагается, в частности, в ра-

© Чёрненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е., 2020

боте профессора Н.Г. Ярушкиной [6]. В ней сформулирован следующий принцип гибридности [6, с. 20—21]: «В литературе встречаются схемы гибридизации нейроинформатики и ИИ, построенные по следующему принципу: правое полушарие — нейрокомпьютер; левое полушарие — основанная на знаниях система, а вопрос лишь в их взаимодействии или балансе право- и левополушарности. В реальном поведении человека невозможно разделить восприятие и логическую обработку, поэтому более успешной представляется схема глубинной интеграции».

Очевидно, что основой для такой интеграции должна стать модель знаний, которая обеспечит уровень сложности и многообразия, необходимый для решения задачи.

Довольно часто при проектировании ГИС применяют сервис-ориентированный подход, при котором каждый сервис может применять собственную модель знаний. Но такой подход может создавать серьезные сложности при интеграции систем, состоящих даже из относительно небольшого числа сервисов.

В настоящее время в качестве моделей глубинной интеграции все чаще рассматриваются модели на основе сложных сетей, которые рассматриваются в работах И.А. Евина [7], О.П. Кузнецова и Л.Ю. Жиляковой [8], К.В. Анохина [9] и других исследователей. На кафедре системы обработки информации и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках данного направления предложена метаграфовая модель [10]. Эту модель предлагается применять как средство для описания: сложных сетей [11], семантики и прагматики информационных систем [12], гибридных интеллектуальных информационных систем [13].

В настоящее время интеллектуальные системы, как правило, не разрабатываются отдельно, но встраиваются в виде модулей в традиционные информационные системы для решения задач, связанных с интеллектуальной обработкой данных и знаний. Такую комбинированную систему, в соответствии с [13], назовем гибридной интеллектуальной информационной системой (ГИИС). ГИИС обладает следующими особенностями:

1) сочетает различные методы, используемые для построения интеллектуальных систем, и в этом смысле является ГИС;

2) сочетает интеллектуальные методы с традиционными методами, применяемыми для разработки данных в информационных системах, и в этом смысле является комбинацией ГИС и информационной системы, предназначенной для обработки данных;

3) использует единую модель знаний, которая обеспечивает «глубокую», или «глубинную», интеграцию по Г.В. Рыбиной и Н.Г. Ярушкиной.

В настоящее время для реализации интеллектуальных систем (в том числе гибридных) часто применяется подход на основе многоагентной системы (МАС). В работе В.Б. Тарасова [14] приводится несколько определений МАС и программных агентов, мы адаптируем эти определения применительно к ГИИС.

Под программным агентом будем понимать программный модуль, который выполняется в виде автономной задачи (не зависит от других агентов), способен обмениваться информацией со средой и другими агентами. Под МАС будем понимать систему однородных или разнородных агентов, функционирующих в среде.

Для реализации ГИИС наиболее интересным представляется подход на основе холонической многоагентной системы (холонической МАС). Такой класс систем также подробно рассмотрен в [14]. В соответствии с определением [14, с. 234] холон — это «целое, рассматриваемое в то же время как часть целого». Этот подход является обобщением понятия «вложенности».

Холонический подход предполагает «глубинную» интеграцию как модели знаний, так и агентов, осуществляющих обработку знаний.

2. Обобщенная структура ГИИС

Принцип гибридности был чрезвычайно удачно предложен профессором Н.Г. Ярушкиной [6]. Можно несколько развить метафору право- и левополушарности, предложенную в [6], и говорить о «подсознании» и «сознании» ГИИС. «Подсознание» строится на основе методов мягких вычислений (и условно соответствует правому полушарию), а «сознание» на основе традиционных методов обработки данных и знаний (и условно соответствует левому полушарию). Обобщенная структура ГИИС, построенная на основе «сознания» и «подсознания», представлена на рисунке 1.

Рис. 1. Обобщенная структура ГИИС

Основой системы выступают «подсознание» системы (модуль подсознания, МП) и «сознание» системы (модуль сознания, МС). «Подсознание» связано со средой, в которой функционирует ГИИС.

Главная задача МП — обеспечение взаимодействия ГИИС со «средой», или «выживание» ГИИС в среде. Поскольку среда может быть представлена в виде набора непрерывных сигналов, то в качестве методов обработки данных «подсознания» хорошо подходят методы, основанные на нейронных сетях и нечеткой логике, в том числе и комбинированные нейронечеткие методы.

Модель данных «подсознания» максимально приближена к «понятийной системе» среды, представляет собой набор данных, который позволяет максимально эффективно взаимодействовать со средой. Часть этих данных может не иметь «физического смысла» с точки зрения МС, однако позволяет МП взаимодействовать со средой с нужной производительностью.

«Сознание» ГИИС строится на принципах обработки данных и знаний. Обработка данных в МС может вестись на основе традиционных языков программирования или технологии workflow.

Однако в последнее время все большую популярность приобретает подход на основе продукционных правил. Раньше данный подход использовался для принятия решения в экспертных системах, но в настоящее время на основе правил пишутся обычные программы. Такой подход называется программированием на основе правил (rule-based programming). К его достоинствам на основе правил можно отнести гибкость, так как в этом случае программа не кодируется жестко, а фактически «выводится» из правил на основе данных. К недостаткам — возможность зацикливания правил, а также сложность обработки большого объема правил.

Отметим, что задача хранения требуемых данных решается отдельно на уровне МС и МП. Мы предполагаем, что на уровне обобщенной архитектуры соответствующие хранилища «встроены» в МС и МП, поэтому хранилища не представлены явно на рисунке 1.

Модуль сознания воспринимает понятийную систему как целостную модель «онтологического» класса и может «осознанно» обрабатывать элементы модели на основе правил.

Модуль подсознания воспринимает понятийную систему в виде отдельных (возможно, несвязанных) признаков. Требования к «осознанию» целостности модели не предъявляются. Основной критерий — эффективность взаимодействия системы со средой.

С точки зрения коммуникации в ГИИС возможны следующие варианты или их комбинации.

1. Коммуникация осуществляется через среду. МП читает данные из среды, преобразует и передает в МС. МС осуществляет логическую обработку и возвращает результаты обработки в МП. МП записывает результирующие данные в среду, откуда они могут быть прочитаны другими ГИИС.

2. Для коммуникации с другими ГИИС используется модуль коммуникации (МК). В зависимости от решаемых задач с МК может взаимодействовать МС (что характерно для традиционных информационных систем) или МП (что более характерно для систем на основе мягких вычислений).

3. Взаимодействие с пользователем также может происходить через МС (что характерно для традиционных информационных систем) или через МП (что может быть использовано, например, в автоматизированных тренажерах).

Граничная модель сознания и подсознания предназначена для глубинной интеграции модулей сознания и подсознания и представляет собой интерфейс

между этими модулями с функцией хранения данных. В качестве данных выступает комплексная онтология, которая используется как сознанием, так и подсознанием. Одна из основных задач подсознания — распознавание из среды элементов онтологии.

Если рассматривать сознание как разновидность экспертной системы, то распознанные элементы онтологии могут рассматриваться в качестве элементов операционной памяти экспертной системы, которые приводят к срабатыванию соответствующих правил.

В зависимости от целей системы правила могут формировать выходную информацию для пользователя или сигналы для модуля подсознания, оказывающие требуемое воздействие на среду.

С точки зрения многоагентного подхода такие компоненты, как МП, МС, МК, — агенты. В то же время они части системы, которая также выступает агентом.

При этом МП — сложная структура, включающая агенты нижнего уровня, каждый из которых может в свою очередь включать МП, МС, МК, предназначенные для решения конкретных задач данного агента. Несмотря на то что агент нижнего уровня находится в составе МП, он может включать в свою структуру МС, предназначенный для решения задач МП более высокого уровня. С точки зрения данного подхода нет ничего удивительного в том, что в МС могут использоваться нечеткие продукционные правила, а в МП входят «классические» модули обработки данных.

Предложенная архитектура рассматривается как обобщенный подход, который должен быть адаптирован для создания информационных систем в конкретных предметных областях.

3. Примеры реализации систем на основе концепции ГИИС

В данном разделе рассмотрим три примера реализации интеллектуальных систем на основе концепции ГИИС.

Первый пример — ГИИС распознавания дорожных знаков. Средой является визуальная информация, распознаваемая видеокамерой. Модуль подсознания выделяет признаки изображения и реализован с использованием ансамбля нейронных сетей. Модуль сознания распознает дорожные знаки на основе выделенных признаков и реализован в виде экспертной системы.

Второй пример — ГИИС классификации музыкальных произведений [15]. Средой выступает звуковая информация. Модуль подсознания выделяет признаки, необходимые для классификации, и реализован с применением сверточной нейронной сети. Модуль сознания классифицирует музыкальные произведения на основе выделенных признаков и реализован в виде решающего дерева.

Третий пример — ГИИС генерации стихотворений [16]. Структура системы представлена на рисунке 2.

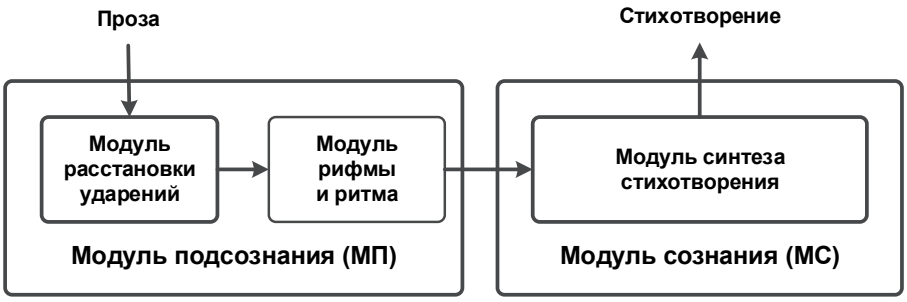


Рис. 2. Структура ГИИС генерации стихотворений

В качестве среды в данной системе выступает текст. На вход системы поступает прозаический текст, выходом системы является стихотворный текст.

Модуль расстановки ударений строится на гибридном подходе, сочетая в себе как подход на основе правил, так и применение методов машинного обучения. Правила используются для относительно простых случаев, например буква Ё всегда ударная, слова определенных частей речи безударны, в значимых словах с одним слогом под ударением этот слог и т. д. В более сложных случаях применяется модель на основе сверточной нейронной сети.

Модуль рифмы и ритма определяет признаки, которым больше всего соответствует входной текст. Поиск слов для рифмы выполняется с помощью словаря, сформированного на основе корпуса стихотворений. В корпусе заданы как возможные окончания слов, так и их чередование. Модуль также реализован на основе нейросетевой модели.

Модуль синтеза стихотворения формирует стихотворные строфы. На вход модуля подается текст и полученные на предыдущих этапах признаки. Модуль реализован на основе правил.

Рассмотренные примеры ГИИС показывают, что предложенный подход позволяет реализовывать интеллектуальные системы в различных модальностях (изображения, звук, текст). При этом структура ГИИС инвариантна по отношению к обрабатываемой модальности.

Заключение

Обобщенную структуру ГИИС предлагается строить на основе модулей «сознания» и «подсознания». На основе обобщенной структуры могут быть построены частные случаи структуры ГИИС, которым соответствуют конкретные ГИИС.

Необходимо отметить, что методы, основанные на векторном представлении, все активнее используются для обработки данных не только «подсознания», но и «сознания», например графовые нейронные сети (Graph Neural Network). Концепции «сознания» и «подсознания» ГИИС при этом не исчезают, но могут быть реализованы унифицированным образом на основе век-

торного представления признаков. Применение векторного представления можно рассматривать как «схему глубинной интеграции» сознания и подсознания.

Список литературы

1. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. СПб. : СПбГТУ, 2001.

2. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.* Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М. : ИПИ РАН, 2014.

3. *Рыбина Г.В., Пароджанов С.С.* Технология построения динамических интеллектуальных систем : учебное пособие. М. : НИЯУ МИФИ, 2011.

4. *Zadeh L.A., Abbasov A.M., Yager R.R. et al.* Recent Developments and New Directions in Soft Computing. Springer-Verlag, 2014.

5. *Melin P., Castillo O., Kacprzyk J.* Nature-Inspired Design of Hybrid Intelligent Systems. Springer-Verlag, 2017.

6. *Прикладные* интеллектуальные системы, основанные на мягких вычислениях / под ред. Н.Г. Ярушкиной. Ульяновск : УлГТУ, 2004.

7. *Евин И.А.* Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2, № 2. С. 121—141.

8. *Кузнецов О.П., Жилякова Л.Ю.* Сложные сети и когнитивные науки // Нейроинформатика-2015. XVII Всероссийская научно-техническая конференция : сборник научных трудов. М. : МИФИ, 2015. Ч. 1. С. 18.

9. *Анохин К.В.* Когнитом: гиперсетевая модель мозга // Там же. С. 14—15.

10. *Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И. и др.* Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем // Прикладная информатика. 2017. Т. 12, № 3 (69). С. 57—79.

11. *Черненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е.* Представление сложных сетей на основе метаграфов // Нейроинформатика-2016. XVIII Всероссийская научно-техническая конференция : сборник научных трудов. М. : НИЯУ МИФИ, 2016. Ч. 1. С. 173—178.

12. *Самохвалов Э.Н., Ревунков Г.И., Гапанюк Ю.Е.* Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2015. Вып. № 1. С. 83—99.

13. *Черненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е.* Структура гибридной интеллектуальной информационной системы на основе метаграфов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. Вып. № 9. С. 3—14.

14. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002.

15. *Stikharnyi A., Orekhov A., Andreev A., Gapanyuk Yu.* The Hybrid Intelligent Information System for Music Classification. In: Selected Papers from the XXI International Conference on Neuroinformatics, Neuroinformatics 2019. Studies in Computational Intelligence. Springer, 2019. Vol. 856. P. 71—77.

16. *Taran M., Revunkov G., Gapanyuk Yu.* The Hybrid Intelligent Information System for Poems Generation // Selected Papers from the XXI International Conference on Neuroinformatics, Neuroinformatics 2019. Studies in Computational Intelligence. Springer, 2019. Vol. 856. P. 78—86.

Секция 2

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В НАУКЕ, ОБРАЗОВАНИИ, МЕДИЦИНЕ, ЭКОНОМИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Руководители секции — проф. С. Н. Ковалев
проф. И. Б. Фоминых

Е. Е. Белова[1], О. В. Толстель[2]
БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия
e-mail: [1]el_liza_belova@mail.ru, [2]tolstel.oleg@mail.ru

ПРОТОТИП РАЗГОВОРНОГО ЧАТ-БОТА НА ОСНОВЕ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ ДЛЯ БАНКОВСКОЙ СИСТЕМЫ

Введение

В статье описывается процесс разработки прототипа чат-бота для банковской системы. Будут проанализированы возможные платформы и подобраны технологии для реализации прототипа чат-бота для банка, создан прототип чат-бота для банка и разработаны сценарии диалогов.

Планируется, что чат-бот будет предоставлять следующие возможности: получение справочной информации; предоставление контактных данных; ответы на вопросы пользователя.

По мере роста потребительских ожиданий в банковской сфере начинают все активнее использовать искусственный интеллект, машинное обучение и чат-ботов. Чат-боты нужны для того, чтобы автоматизировать рутинные действия сотрудников банка, оптимизировать внутренние и внешние процессы. Применение чат-ботов позволяет уменьшить издержки и удовлетворить потребности прогрессивных клиентов.

Кроме того, чат-боты снижают отток клиентов банка [10], ведь они — эффективный инструмент построения коммуникаций с клиентами и новый коммуникационный канал [8]. По прогнозам, в 2022 г. в банках взаимодействие с клиентами будет на 90% автоматизировано за счет использования чат-ботов [4].

Согласно статистике, 2 млрд человек используют мессенджеры, а за период 2016—2021 гг. число пользователей мессенджеров вырастет почти на миллиард человек. Кроме того, активность пользователей высока: средний пользователь WhatsApp проводит в мессенджере 195 минут [9]. ВКонтакте — одна из самых популярных социальных сетей в России: ежедневно в эту сеть заходят 23 млн пользователей [1].

© Белова Е. Е., Толстель О. В., 2020

1. Чат-боты для банков

Термин «чат-бот» придумал Майкл Молдинг в 1994 г. для описания разговорных программ [6]. В мире насчитывается огромное количество чат-ботов. Только в США их создано более 100 тыс. Чат-боты, созданные банками в США, позволяют клиентам переписываться с банком и оплачивать счета, а также получать информацию о счете и остатках, при этом используя обычный язык, кроме того, они создают финансовый профиль, в котором объединены рекомендации по финансовым операциям и подбору инструментов для торговли [8].

Российские банки стараются не отставать от мировых тенденций. Собственные чат-боты есть у Сбербанка, ВТБ, «Тинькофф банка», «Альфа-Банка» [7].

Согласно статистике, аудитория мессенджеров в России — не менее 50 млн человек. При этом пользователи WhatsApp и Viber составляют долю, превышающую 50 %. Следом идет Skype и приложения социальных сетей «ВКонтакте», Facebook Messenger и «Одноклассники».

Аудитория Telegram — самого технологичного мессенджера с точки зрения возможностей для внедрения ботов — составляет всего 1—1,5 млн пользователей. Тем не менее, несмотря на относительно малочисленную аудиторию, именно Telegram, судя по всему, обладает наибольшим потенциалом в сфере чат-бот разработок [8]. Так как в настоящее время использование Telegram нежелательно из-за претензий Роскомнадзора [3], то для своего чат-бота будем использовать приложение социальной сети «ВКонтакте».

Важно, чтобы чат-боты были не только информационными, а чтобы с их помощью совершались банковские операции, которые описывались бы текстом или с помощью голоса [8]. Этот новый канал коммуникации банка с клиентом должен стать очень персонифицированным, т. е. помнить всю историю и предлагать только те продукты и услуги, которые нужны клиенту [8].

Различают следующие виды обращений клиентов.

Обращения общего характера. Большинство клиентов банков интересует справочная информация: 90 % таких обращений приходятся на десяток типичных вопросов, а ответы на них легко автоматизируются.

Юридические запросы и жалобы — более сложный вариант обращений, они часто связаны с негативом, их поток зависит не только от роста клиентской базы, но и от активности «антиколлекторских помощников».

Нестандартные запросы. Как правило, они связаны с человеческим фактором на стороне клиента. Например, он забыл пароль для входа в личный кабинет, при этом у него сменился номер телефона и адрес электронной почты [7].

Чат-боты разделяют на кнопочные («интерфейсные») и разговорные [2].

Кнопочные чат-боты просты в освоении, но малофункциональны. Если сделать панели со сложными, разветвленными меню, разобраться в них будет совсем нелегко и получится неудобный интерфейс.

Альтернатива кнопочным чат-ботам — разговорные боты. Они реагируют на реплики собеседника и могут вести с ним диалог. Разговорные чат-боты подразделяют на основанные на искусственном интеллекте и на языковой модели и правилах.

Разговорные чат-боты с искусственным интеллектом способны обучаться. Но для этого требуются огромные объемы специально подготовленных данных, собрать которые по силам далеко не каждому банку. Поэтому из-за недостаточности обучения такие чат-боты могут вести себя непредсказуемо, неправильно отвечать на вопросы, неверно оценивать намерения клиента и т. п.

Оптимальный вариант бота — это «гибрид» всего лучшего, что представлено в ботах всех типов. Поэтому стали появляться и «гибридные» чат-боты, в которых, например, часть функций вынесена на кнопки, но при этом они параллельно ведут диалог с собеседником и исполняют текстовые «команды» [2].

Самое сложное наладить протокол взаимодействия API между чат-ботом и серверами компании. Если клиент запрашивает информацию из своего личного кабинета (например, о размере задолженности), требуется установить связь с внутренней базой данных.

Естественный человеческий язык, а особенно русский, очень тяжел для машинного понимания. Клиенты часто используют сокращения, сленг или допускают опечатки. При нестандартных запросах необходимо применять технологии машинного обучения и нейронных сетей [7].

2. Возможности и функционирование чат-бота

Разработанный чат-бот относится к «разговорным на основе языковой модели и правил» [2]. Его возможности проиллюстрированы на рисунке 1.

По userID он определяет имя пользователя, зарегистрированного «ВКонтакте». Таким образом, чат-бот знает, как обратиться к клиенту

Реализован чат-бот в открытой библиотеке DeepPavlov для создания диалоговых систем, содержащей набор претренированных компонент для анализа языка, включая компоненты текстовой классификации.

В обучении чат-бота используются три файла: данные обучения (assistant-trn.json), проверки (assistant-val.json) и тестирования (assistant-tst.json). При небольшом наборе данных время обучения чат-бота составляет 20 мин. В первоначальной базе имелась информация об адресе банка, его режиме работы. Результат работы прототипа чат-бота после обучения на малой базе данных (10 диалогов) представлен на рисунке 2.

Из диалога видно, что чат-бот отвечает корректно лишь на узкий круг вопросов, так как было прописано мало сценариев диалогов. Расширим базу вопросов. Добавим возможность для пользователя узнать курсы валют, включим дополнительную информацию о банкоматах и расширим информацию о режимах работы банка.

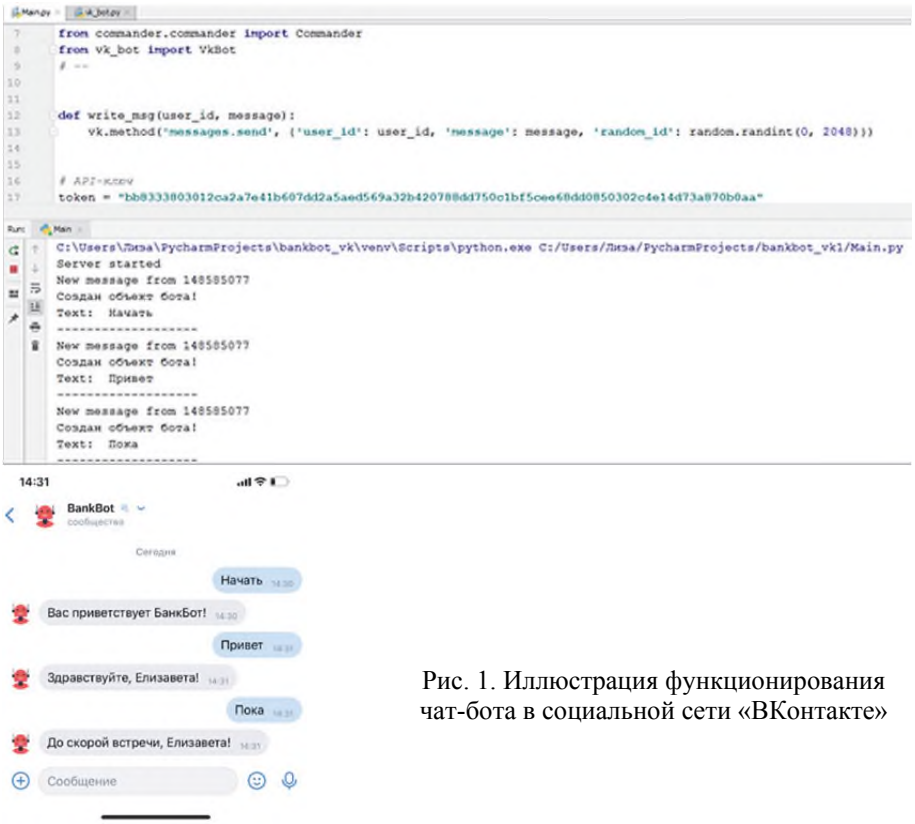


Рис. 1. Иллюстрация функционирования чат-бота в социальной сети «ВКонтакте»

```
bot(['Здравствуйте'])
['Здравствуйте, чем я могу вам помочь?']
bot(['Когда работает банк?'])
['Банк работает до 19:00 в будний дни']
bot(['Спасибо'])
['Рад был помочь! До свидания!']
bot(['Привет'])
['Здравствуйте, чем я могу вам помочь?']
bot(['Адрес главного офиса'])
['Ул. А. Невского 14]
bot(['Очень далеко'])
['Какая жалость! В следующий раз, может быть. Хорошего дня!']
bot(['Я не успею'])
['Банк работает до 19:00 в будний дни']
```

Рис. 2. Пример диалога чат-бота и клиента после обучения на малой базе данных (10 диалогов)

После обучения на расширенной базе данных, состоящей из 49 диалогов, прототип чат-бота стал отвечать более гибко и конкретно (рис. 3).

```
bot(['Привет, бот'])
['Здравствуйте, чем я могу вам помочь?']
bot(['Время работы банка'])
['Вас интересует полное расписание или конкретный день?']
bot(['Полное'])
['ПН: с 09:00 до 18:00 ВТ: с 09:00 до 18:00 СР: с 09:00 до 18:00 ЧТ: с 09:00 до 18:00 ПТ: с 09:00 до 18:00 СБ: с 10:0
0 до 17:00 ВС: выходной день']
bot(['Спасибо'])
['Рад был помочь! До свидания!']
bot(['Привет'])
['Здравствуйте, чем я могу вам помочь?']
bot(['Курс валют'])
['Какая валюта Вас интересует? Могу предложить доллар, евро, злоты.']
bot(['Злоты'])
['ПОКУПКА: 15,86. ПРОДАЖА: 16,80']
bot(['Спасибо'])
['Рад был помочь! До свидания!']
bot(['Привет'])
['Здравствуйте, чем я могу вам помочь?']
bot(['До скольки работает банк?'])
['Вас интересует полное расписание или конкретный день?']
bot(['Суббота'])
['СБ: с 10:00 до 17:00']
bot(['Не успею'])
['Какая жалость! Я могу Вам еще чем-то помочь?']
```

Рис. 3. Пример диалога чат-бота и клиента на расширенной базе вопросов

Поскольку данная версия чат-бота предназначена для использования в банковской сфере, с его помощью можно: получить контактную информацию о филиалах и офисах Сбербанка, режиме их работы; узнать курсы валют, установленные и применяемые в Сбербанке [2].

В частности, на вопрос о курсе валют чат-бот запрашивает какой тип валюты интересует клиента и предлагает выбрать конкретную валюту из трех видов, после чего отвечает. Во время диалога с прототипом все слова клиента записываются и упорядочиваются по частоте употребления (рис. 4).

1	Привет 14	9	Курс 6	17	работает 2	25	Злоты 2		
2	Спасибо 13	10	валют 6	18	главный 2				
3	работы 11	11	Время 5	19	офис 2				
4	банка 9	12	Не 4	20	банка? 2				
5	Здравствуйте 8	13	Где 3	21	находится 2				
6	банкомата 8	14	выгодно 3	22	Отлично 2				
7	Адрес 6	15	Привет, 2	23	Суббота 2				
8	режим 6	16	бот 2	24	Далеко 2				

Рис. 4. Использованные слова при диалоге с чат-ботом

Заключение

Объем российского рынка чат-ботов за последний год увеличился вдвое и достиг одного млрд. рублей. Пока экономический смысл использования чат-ботов ограничивается снижением трудозатрат человеческого персонала, но с развитием технологий умные программы могут получить более широкие полномочия [5].

Каждая существующая тема, по которой происходит взаимодействие с чат-ботом, может настраиваться, изменяться и расширяться. В дальнейшем планируется расширять дистрибутивные возможности чат-бота, дополняя их новыми темами, и внедрить обученный чат-бот в приложение социальной сети ВКонтакте.

Список литературы

1. *Аудитория* социальных сетей в России 2019. URL: https://clck.ru/K2ogh (дата обращения: 05.12.2019).

2. *Болышев М.* Siri, Алиса и финансовый чат-бот. Как робот-собеседник определит эмоциональное состояние вашего клиента? URL: https://clck.ru/LbEWU (дата обращения: 06.12.2019).

3. *Газета.ru* «Одно другому не противоречит»: что происходит с Telegram в России URL: https://www.gazeta.ru/tech/2019/10/24/12774110/everything_is_ permitted.shtml (дата обращения: 06.12.2019).

4. *Исследование* топ-50 чат-бот платформ и виртуальных ассистентов 2019 года. Блог компании МФТИ. URL: https://clck.ru/LckAP (дата обращения: 15.12.2019).

5. *Кривошапко Ю.* Бот в помощь // Российская газета — Федеральный выпуск № 202(7960). URL: https://clck.ru/J2zri (дата обращения: 12.12.2019).

6. *Матвеева Н.Ю., Золотарюк А.В.* Технологии создания и применения чат-ботов // Научные записки молодых исследователей. М. : Финансовый университет при Правительстве РФ, 2018. №1. С. 28—30.

7. *Пономарев А.* Кейс: мы внедрили чат-бота — теперь он экономит нам около 250 рабочих часов в месяц. URL: https://clck.ru/LbDqz (дата обращения: 06.12.2019).

8. *Фомичев Г.* Банковские чат-боты: российский опыт и мировые тенденции. URL: https://clck.ru/LbCF5 (дата обращения: 05.12.2019).

9. *Чат-боты* в 2019 году. URL: https://clck.ru/LcgFk (дата обращения: 13.12.2019).

10. *Белова Е.Е., Толстель О.В.* Использование библиотек языка программирования Python для анализа оттока клиентов банка (принята к публикации).

Г. Б. Бурдо[1], Н. В. Воронцов[2]
[1]Тверской государственный технический университет, Россия
[2]МВТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: [1]gbtms@yandex.ru

ОНТОЛОГИИ КАК ОСНОВА МОДЕЛЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ САПР ТП С ЭЛЕМЕНТАМИ ОБУЧЕНИЯ

Введение

Большинство отечественных машиностроительных предприятий, выпускающих наукоемкую продукцию, характеризуется многономенклатурностью изделий, частой сменой их видов, при этом необходимо сокращать период времени, предусмотренный на технологическую подготовку производства.

Сегодня активно реализуются элементы искусственного интеллекта в системах автоматизированного проектирования технологических процессов, значительно сокращающих длительность технологической подготовки производства, однако одного этого направления развития автоматизированным систем явно недостаточно.

1. Подходы к построению систем автоматизированного проектирования технологических процессов с элементами обучения

В [1] показано, что онтологический подход открывает новые возможности для построения машиностроительных автоматизированных систем. На основе онтологий уточнены параметры технологической системы, влияющие на процесс принятия решений при проектировании технологических процессов на различных уровнях декомпозиции. Далее, на основе анализа синтезированных технологических процессов была предложена методика, позволяющая переходить к проектированию на основе типовых технологических решений. На основе анализа [2—9] конкретизированы принципы, полагаемые в основу создания систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) с элементами обучения (ЭО) на основе образов: 1) информационная и временная интеграция с автоматизированного проектирования технологических процессов (АПУТП); 2) интеграция с системами поддержки жизненного цикла изделия; 3) реализация в САПР ТП процедур накопления и обобщения информации (опыта проектирования).

Последнее мероприятие предполагает реализацию процедур накопления [9] и обобщения опыта применения критериев (1) и обобщения и накопления опыта проектирования (2).

Наиболее интересны процедуры обобщения (ОБ) и накопления (Н) опыта проектирования, которые состоят в том, что каждое технологическое решение ($ТР_i$) запоминается с соответствующим множеством признаков детали ($МП_К$), включающих множество структур $\{S_{lk}\}$ и параметров $\{П_{jk}\}$ детали,

© Бурдо Г. Б., Воронцов Н. В., 2020

и множества организационно-производственных признаков $ОРП_k$, определяющих организационные и производственные условия выполнения *ТПр*, ЦФ, оборудование, инструмент, оснастку:

$$ТР_i \leftrightarrow \langle\ \{\{S_i\},\{П_i\},ОРП\}_k\ \rangle, МК_k = \langle\ \{\{S_i\},\{П_i\},ОРП\}_k\ \rangle.$$

Для каждого вида решения $ТР_i$ накапливаются множества $\{МК_k\}$, обобщением которых получается технологический образ *О*. Выявляется интервал технологических решений, $\Delta ТР_i$, соответствующий одному и тому же образу. $ТР_i^{П}$, проверенные в ТП, должны:

$$ТР_i^{П} \leftrightarrow \langle\ \left\{ S_i^{П} \in \left\{ \cup S_l \right\}; \left\{ П_j^{П} \right\} \in \left\{ \Delta П_j \right\}; \left\{ ОРП^{П} \right\} \in \left\{ \Delta ОРП \right\} \right\}\ \rangle,$$

в этом случае решение считается достоверным. Технологический образ получается обобщением опыта: $ТР_i^{П} \times ТР_i \times \left\{ МП_К \right\} \rightarrow О_i$ и характеризуется определенными интервалами допустимых значений *{ΔМП}* и *{$\Delta ОРП^j$}*. Образ $О_i$:

$$О_i = \langle\ \{S = \left\{ \cup S_l \right\}, \{\Delta П_j\}, \{\{\Delta ОРП_j\}_i\} \wedge \{НД\}\}\ \rangle,$$

где $\left\{ НД \right\}$ — множество номеров и названий детали, для которых проектировались технологические процессы.

Накопление и обобщение опыта следует производить поэтапно, начиная с минимального состава элементов в множествах $МП_К$, постепенно расширяя их до полных объемов, строя иерархию образов. Полное $МП_К$ позволяет непосредственно выбирать $ТР_i$ любого уровня. Частный случай накопления и обобщения — их межуровневая процедура:

$$ТР_i^j \leftrightarrow \left\{ ТР_i^{j-1}, МК'_k \right\};\ ТР_i^j \times ТР_i^{jП} \times МП'_К \times ТР^{j-1} \rightarrow О_i^j;\ \ О_i^j = \left\{ ТР^{j-1}, МП'_К \right\},$$

где *j* — номер уровня, $МП'_К$ — подмножество множества $МП_К$, необходимое для синтеза $ТР_i^j$ на основе решения предыдущего уровня $ТР_i^{j-1}$.

2. Процедуры обучения на уровнях декомпозиции процесса технологического проектирования

Процедуры Н и ОБ решений строятся по уровням декомпозиции процесса проектирования, каждому соответствует образ *О*. На первом уровне накапливается и обобщается информация по методам получения заготовок *МЗ*, маршрутам обработки *МОП* и этапам Э изготовления детали.

Для методов получения заготовки (*3*), признаками $МП_1^1$, однозначно определяющими ее выбор:

$$З_i \leftrightarrow \langle\ \left\{ ТД_{l,} S_l \left\{ РК_{ji} \right\}, N, МД, m, \left\{ ОРП_j \right\}, ЦФ, НД \right\}_К\ \rangle = МП_{1В}^1,$$

где $З_i$ — i-й метод получения заготовок; $ТД_l$ — тип детали; S_l — граф связей поверхностей, определяющий контур заготовки; $\{РК_{jl}\}$ — его размерные параметры; N — годовая программа выпуска; $МД$ — материал детали; m — масса; $НД$ — номер детали; $ЦФ$ — целевая функция. Процедура формирования образа:

$$\{З_i\} \times \{МП^1_{1l}\} \to \{O^1_{1i}\};$$

$$O^1_{1i} = \langle\ \{\{ТД_l\}, \{\ S_l\ \}, \{\Delta РК_{jl}\}, \Delta N, \{МД\}, m, \{ОРП_j\}, \{НД\}, \{ЦФ\}\}_i\ \rangle.$$

Маршрут обработки поверхностей определяется параметрами $МП^1_2$:

$$МОП_i \leftrightarrow \langle\ \{ВП_m, З_i, СПЗ_i, \{РП_j\}_m, S_m, \{ТР_j\}_m,$$

$$ШП_m, МД, N, ФМ_m, \{ОРП_i\}, \{НД\}\}\ \rangle = МП^1_{2m},$$

где $ВП_m$ — вид поверхности; $СПЗ_i$ — системные параметры заготовки, включающие размерные связи между ее поверхностями и точность размеров; $\{РП_j\}_m$ — множество размеров поверхностей; S_m — связи поверхностей с другими; $\{ТР_j\}_m$, $ШП_m$ — множества, определяющие параметры точности размера и взаимного расположения; $ФМ$ — физико-механические свойства поверхности;

$$\{МОП_i\}^{П} \times \{МОП_i\} \times \{МП^1_{2m}\} \to \{O^1_{2i}\},$$

$$O^1_{2i} = \langle\ \{\{ВП_m, \{З_i\}, \{СПЗ_i\}, S = \bigcup S_m, \{\Delta ТР_j\}, \{РП_j\}_m,$$

$$ФМ_m, \{\Delta ШР_J\}, \Delta N, \{МД\}, \{ОП_j\}\ \}\ \rangle.$$

Практической проверке подлежат точность и шероховатость обработанной поверхности.

Этапы обработки $Э_К$ определяются следующими признаками $МП^3_{1К}$:

$$Э_К \leftrightarrow \langle\ \{ТД_l, З_i, СПЗ_i, \{РП_{jm}\}, S_Д, \{ОП_j\}, ЦФ, МД, \{ФМ_m\}, N, \{ТР_{jm}\}, \{ШП_m\}_k\ \rangle.$$

Процедура обобщения-создания образа:

$$\{\ Э_К\ \}^{П} \times \{Э_К\} \times \{МП^3_{1К}\} \to \{O^1_{3К}\}, \text{ а образ } O^1_{3К}:$$

$$O^1_{3К} = \langle\ \{\{ТД_l\}, \{З_i\}, \{СПЗ_i\}, \{\Delta РП_{jm}\} S^{Б}_{Д}, \{МД\}, \{ФМ_m\}, \{\Delta N\}, \{ОП_j\}, \{\Delta ТР_{jm}\}, \{\Delta ШП_{jm}\}, \{НД\}\}\ \rangle,$$

где $S^{Б}_{Д}$ — размерные связи технологических баз детали.

Маршрут обработки детали определяется признаками $МП^2_{1i}$:

$$M_i \leftrightarrow \langle \begin{Bmatrix} \{ТД_l\}, S^{Б}_{Д}, \{З_i\}, \{СПЗ_i\}, МД, \{ФМ_m\}, \\ \{N\}, \{ОП_j\}\{ТР_{jm}\}, \{ШП_{jm}\}, \{ОР\} \end{Bmatrix} \rangle = МП^2_{1i}$$ где $\{ОР\}$ — множество определяющих размеров детали (длина, ширина, высота, приведенный диаметр и т. д.) — граф общих размеров детали;

$$\{M_i\}^{П} \times \{M_i\} \times \{МП^2_1\} \rightarrow \{O^2_{1i}\},$$

$$O^2_{1i} = \begin{Bmatrix} \langle \ \{ТД_l\}, S = \cup S^{Б}_{Д}, \{З_i\}, \{СПЗ_i\}, \{НД\}, \{\Delta N\}, \{\Delta ТР_{jm}\}, \\ \{\Delta ШП_{jm}\}, \{МД\}, \{\Delta ОР\}, \{ФМ_m\}, \{ОП_j\}, \{ЦФ\} \ \rangle \end{Bmatrix}.$$

Операционная технология определяется признаками $МП^3_{1i}$:

$$ОП_i \leftrightarrow \langle \begin{Bmatrix} ТД_l, S_Д, З_i, СПЗ_i, \{ОП_j\}, \{ТР_{jm}\}, \\ \{ШР_{jm}\}, МД, \{ФМ_m\}, ЦФ, \{ОР\} \end{Bmatrix} = МП^3_{1i} \ \rangle,$$

где $S_Д$ — размерные связи поверхностей детали.

Процедура получения образа:

$$\{ОП_i\}^{П} \times \{ОП_i\} \times МП^3_{1i} \rightarrow O^3_{1i}.$$

$$O^3_{1i} = \langle \begin{Bmatrix} \{ТД_l\}, S = \bigcup S_Д, \{З_i\}, \{СПЗ_i\}, \{\Delta ШП_{jm}\}, \{МД\}, \{ФМ_m\}, \{\Delta N\}, \\ \{ОП_i\}\{\Delta ТР_{jm}\}, \{ОР\}, \{ЦФ\}, \{НД\} \end{Bmatrix} \rangle.$$

Параметры режимов резания определяются признаками $МП^4_{1i}$:

$$РР_i \leftrightarrow \langle \ \{ВП_i, З_i, СПЗ_i, \{РП_j\}_i, \{ТР_j\}_i, ШП_i, \{ОП_j\}, НД, ФМ, МД\} \ \rangle,$$

$$\{РР_i\}^{П} \times \{РР_i\} \times \{M^4_1\} \rightarrow \{O^4_1\},$$

$$O^4_{1i} = \langle \ \{ \ ВП_i, З_i, СПЗ_i, \{\Delta РП_j\}_i, \{\Delta ТР_j\}_i, \Delta ШП_i, \{ОП_j\}, НД, ФМ, МД \ \} \ \rangle.$$

Управляющие программы определяются признаками $МП^4_2$.

$$УП_i \leftrightarrow \langle \begin{Bmatrix} ТД_l, S^{П}_{Д}, S^{/}_{Д}, \{ОП_j\}, \{ТР_{jm}\}, \\ \{ШР_m\}, МД, \{ФМ_m\}, S_B, \{РП_i\} \end{Bmatrix} \rangle = МП^4_{2i},$$

где $S^{П}_{Д}$ — размерные связи детали, соответствующие состоянию после обработки; $S^{/}_{Д}$ — те же самые, но до обработки; S_B — временная структура выполнения переходов в ОП. Для быстрого поиска программ с целью их корректировки достаточно $ТД_l$, $S^{П}_{Д}$, $S^{/}_{Д}$.

Обобщение опыта (корректировка УП) выполняется по результатам их отработки в ТП:

$$\{УП_i\}^{П} \times \{УП_i\} \times \{M_2^4\} \to \{O_4^2\};\ O_2^4 = \langle\ \{ТД_l, S_Д^{/}, S_Д^{П}, \{НД\}\}\ \rangle.$$

Добавляя оставшиеся неучтенными признаками, можно получать соответствующие подмножества образа O_2^4.

На этом уровне следует выполнять *ОБ* данных по фактическим затратам времени на выполнении операции в двух направлениях.

Первое: определение, сравнение и корректировка времени на выполнение конкретной операции в целом:

$T_{ШТКi}^{Р} \times \{T_{ШТКi}^{Ф}\} \to T_{ШТК}^{У}$, где $T_{ШТКi}$ — штучно-калькуляционное время выполнения *i*-й операции конкретной детали; индекс *Р, Ф, У* — расчетное, фактическое, уточненное значение. Второе: анализ затрат времени и их уточнение на выполнение множества элементов различных операций, характеризуемых параметрами:

$$\{Z_j\} : \{T_{ШТКi}^{Р}\} \times \{T_{ШТКi}^{Ф}\} \times \{Z_i\} \to t_j^{У},$$

где $t_j^{У}$ — множество уточненных составляющих штучно-калькуляционного времени, соответствующих множеству элементов операций Z_j. На основе образов обеспечивается проектирование по методу типизации на всех уровнях, вплоть до полных аналогов.

Модель накопления и обобщения информации в САПР ТП приведена на рисунке.

Рис. Модель накопления и обобщения информации

Запоминаются технологическое решение (информационная модель ТПр *i*-го уровня) и перечисленные выше определяющие его признаки (параметры). Решения группируются по конструктивно-технологически сходным деталям, определяются и оцениваются интервалы признаков.

Решение и интервалы признаков (параметров) заносятся в базу знаний, в дальнейшем технологическое решение любого уровня выбирается сравнением значений признаков детали с интервалами значений признаков в базе знаний. САПР ТП выполняет накопление и определение интервалов параметров, оценка и обобщение осуществляется с участием экспертов.

Заключение

Представленная модель накопления и обобщения информации с элементами искусственного интеллекта в САПР ТП, сокращает время технологической подготовки производства. В обобщении и накоплении знаний активно участвуют эксперты с учетом результатов отработки технологических процессов в производстве. Предлагаемая САПР ТП с элементами обучения может реализовываться в программной среде известных отечественных САПР ТП. Использование данной САПР ТП позволяет предприятию добиться успеха на рынке и получить преимущество перед конкурентами-производителями при сокращении сроков подготовки производства, снижении трудоемкости производства на стадии его подготовки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-37-50084.

Список литературы

1. *Бурдо Г.Б., Воробьева Е.В.* Онтологический подход при проектировании технологических процессов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: материалы IV международной научно-технической конференции OSTIS-2015. Минск, 2015. С. 461—464.

2. *Бурдо Г.Б.* Автоматизация технологической подготовки многономенклатурного производства / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, Н.В. Испирян [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования : межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. техн. ун-т. Тверь, 2013. Вып. 6. С. 106—110.

3. *Евгенев Г.Б.* Системология инженерных знаний : учеб. пособие для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

4. *Поздеев Б.М.* Управление знаниями и интеллектуальная поддержка принятия решений этапах проектирования и производства машиностроительных изделий // Тр. IX национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2004. М. : Физматлит, 2004. Т. 3. С. 1039—1050.

5. *Яблочников Е.И.* Организация единого информационного пространства технической подготовки производства с использованием PDM SmarTeam // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 3. С. 22—29.

6. *Корсаков В.С., Капустин Н.М., Темпельхоф К.Х. и др.* Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / под общ. ред. Н.М. Капустина. М. : Машиностроение, 1986.

7. *Кондаков А.И.* САПР технологических процессов. М. : Академия, 2007.

8. *Цветков В.Д.* Системно-структурное моделирование и автоматизация проектировании технологических процессов. Минск : Наука и техника, 1979.

9. *Бурдо Г. Б.* Автоматизированная система управления процессами создания наукоемких машиностроительных изделий / Г. Б. Бурдо, О. В. Стоянова // Программные продукты и системы. 2014. № 2 (106). С. 164—170.

А. В. Галкин[1], В. А. Пименов[2], П. В. Сараев[1,3]
[1]ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия
[2]ПАО «НЛМК», Липецк, Россия
e-mail: [1]avgalkin82@mail.ru, [2]pimenov_va@nlmk.com, [3]psaraev@yandex.ru

РЕМОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ДЕФЕКТА ПРИ ПРОКАТКЕ

Введение

Математическим ремоделированием называется подход на основе перехода от математических или имитационных моделей одного или различных типов к моделям некоторого одного класса [1]. Ремоделирование применяется в том случае, когда непосредственное использование первоначальной модели для решения задачи невозможно. В итоге для моделирования процесса применяются гибридная система, включающая модель из исходного класса и модель из ремоделирующего класса.

В работе рассмотрено использование данного подхода к задаче моделирования формоизменения дефектов подката в процессе холодной прокатки. В качестве характеристики изменения относительной глубины дефекта принят критерий интенсивности сглаживания дефектов. Для вычисления критерия применяется коэффициент напряженного состояния, который определяется через величину среднего контактного напряжения. Вывод величины среднего контактного напряжения проводится по уравнениям и условиям плоской пластической деформации и кинематики продольной прокатки.

В процессе ремоделирования с использованием полученной математической модели формоизменения дефектов подката выявлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на изменение относительной глубины дефектов, и построена зависимость изменения относительной глубины дефектов от этих параметров. С применением полученной зависимости возможно определение оптимального значения величины суммарных обжатий, при котором относительная глубина дефекта будет минимальной.

1. Описание процесса проката

Прокатка стали — процесс пластической деформации металла за счет обжатия между двумя вращающимися валками. Схема данного процесса приведена на рисунке 1.

© Галкин А. В., Пименов В. А., Сараев П. В., 2020

Обрабатываемая заготовка, обычно полоса, движется между двумя валками, которые вращаются в разные стороны. Движение осуществляется за счет действия сил трения, возникающих в зоне контакта полосы с валками. После прохождении между валками толщина полосы уменьшается, в то же время увеличиваются ее длина и ширина [2].

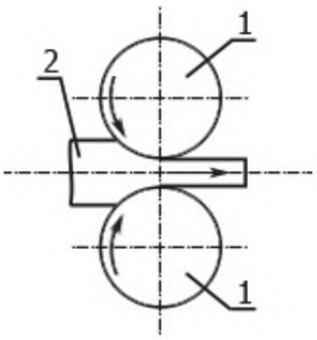


Рис. 1. Схематичное изображение процесса продольной прокатки: *1* — валки; *2* — полоса

В зависимости от температуры обрабатываемой заготовки прокатка делится на горячую и холодную. Прокатываемая заготовка в процессе холодного проката — полосовая листовая сталь, которая была прокатана в горячем состоянии до толщины несколько миллиметров. Результат процесса холодной прокатки — тонкая листовая сталь, которая служит материалом для корпусов автомобилей и бытовых электроприборов. Таким образом, на данном этапе получается готовая продукция, обладающая необходимыми для потребителей качественными характеристиками. Самый распространенный способ холодной прокатки листовой стали — рулонный, для которого применяются непрерывные станы.

Качество готовой прокатной продукции определяется различными характеристиками. Например, химический состав, механические и химические свойства металла, отсутствие дефектов, в том числе поверхностных. Своевременное выявление дефектов позволяет исключить попадание бракованного изделия на последующие этапы обработки.

Образование поверхностных дефектов холоднокатаной полосы во многом обусловливается дефектами подката — как внутренними, так и внешними. Дефекты подката классифицируются по причинам их возникновения: сталеплавильного происхождения, обусловленные выплавкой, раскислением и разливкой стали (раскатанный пузырь, плена, расслоение, крупные неметаллические включения); возникающие при горячей прокатке и смотке полос (вкатанная окалина, раковина, отпечатки, риски); обусловленные транспортировкой полос, намоточно-размоточными операциями при травлении, задачей подводки полосы в головную часть прокатного стана, а также появляющиеся непосредственно при холодной прокатке (царапины, риски, наколы, забоины, продиры).

В процессе холодной прокатки формоизменяются дефекты, одна группа дефектов выкатывается полностью или частично, а другая — сохраняет свою форму до конца прокатки. Наличие дефектов на поверхности полосы может быть причиной для забракования металла, так как дефект делает невозможным использовать полученную прокатную продукцию по назначению. Различные отклонения в технологии производства могут приводить к образованию несовершенств на поверхности полосы.

Цель работы — моделирование процессов трансформации дефектов поверхности подката и полосы при холодной прокатке и анализ влияния технологических факторов процесса на трансформацию дефектов поверхности.

2. Математическая модель выкатываемости поверхностных дефектов

На рисунке 2 представлен процесс трансформации поверхностного дефекта заготовки при холодной прокатке.

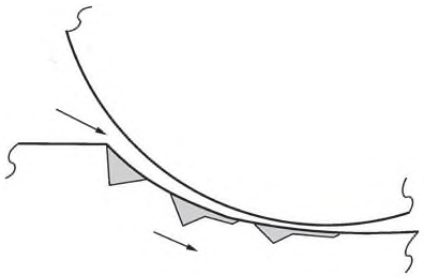


Рис. 2. Трансформация дефектов в процессе прокатки

В качестве математической модели трансформации поверхностного дефекта используется уравнение среднего контактного напряжения и критерий интенсивности сглаживания дефектов.

Уравнение среднего контактного напряжения выводится из основных уравнений плоской деформации с применением параметров очага деформации и уравнения равновесия Карамана [3; 4]. В случае исключения влияния упругих деформаций валков и полосы получаем выражение для среднего контактного напряжения [5]:

$$p_{cp} = 1{,}15\sigma_{\phi}\left(1+\frac{\mu l}{2h_{cp}}\right),$$

где $h_{cp} = \dfrac{h_0 + h_1}{2}$ — средняя толщина полосы; $\sigma_{\phi} = \sigma_{исх} + a\varepsilon^{b}$ — сопротивление металла пластичной деформации; $\sigma_{исх}, a, b$ — экспериментально определяемые коэффициенты, характеризующие марку или группу марок сталей и сплавов.

Критерий интенсивности сглаживания дефекта используется для оценки изменения глубины дефекта в процессе прокатки и имеет следующий вид [6]:

$$\zeta_{\delta} = 0{,}19\left(1-e^{-0.9n_{\sigma}^{3}}\right)\left[1+\left(\frac{h_0^2}{b_{\delta}^2}+\frac{9h_0^2}{l_{\delta}^2}\right)+\left(0{,}04+0{,}004R_a^B\right)\right],$$

где n_{σ} — коэффициент напряженного состояния; b_{δ}, l_{δ} — ширина и длина поверхностного дефекта; R_a^B — шероховатость поверхности рабочих валков.

Для расчета коэффициента напряженного состояния можно воспользоваться следующей формулой [2]:

$$n_{\sigma} = \frac{p_{cp}}{\beta\sigma_{\phi}},$$

где β — постоянная Лодэ.

Шероховатость поверхности валков устанавливается по коэффициенту трения и имеет следующий вид [7]:

$$n_\sigma = \frac{p_{cp}}{\beta\sigma_\phi},$$

где $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%$ — относительное обжатие полосы.

В итоге глубину дефекта на *i*-й стадии деформации можно определить через критерий интенсивности сглаживания дефекта по следующей формуле:

$$\frac{b_i}{h_i} = \frac{b_0}{h_0} - \zeta_\delta \ln(\frac{h_0}{h_i}),$$

где b_i, h_i — глубина дефекта и толщина полосы на *i*-й стадии деформации.

3. Анализ выкатываемости дефектов

С использованием предложенной модели можно провести анализ изменения дефекта — его глубины в процессе прокатки. На рисунке 3 приведено изменение относительной глубины дефекта в процессе обжатия полосы в зависимости от значения коэффициента трения при разной величине относительной глубины дефекта подката.

Сплошными линиями на графике изображены изменения относительных глубин дефекта при коэффициенте трения μ = 0,03, пунктирными линиями — при коэффициенте трения μ = 0,07. Графики наглядно демонстрируют влияние силы трения на выкатываемость дефектов. При большем значении силы трения относительная глубина дефектов уменьшается быстрее. Скорость изменения относительной глубины дефектов не зависит от исходного значения и одинакова при прочих равных условиях.

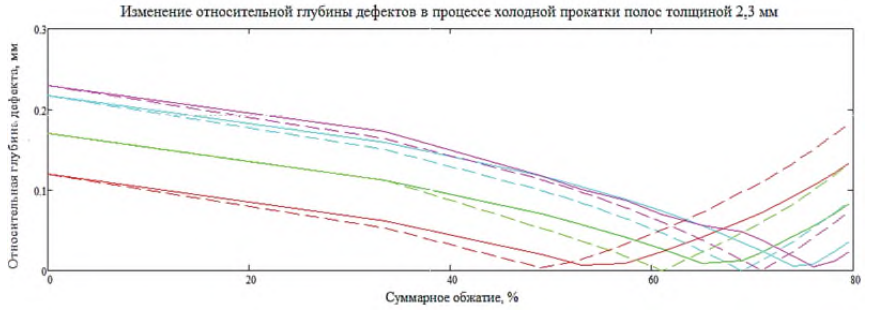


Рис. 3. График исследования зависимости относительных глубин дефектов от различных значений величин коэффициентов трения

На рисунке 4 видно изменение относительной глубины дефекта в процессе обжатия полосы в зависимости от длины дефекта при разной величине относительной глубины дефекта подката.

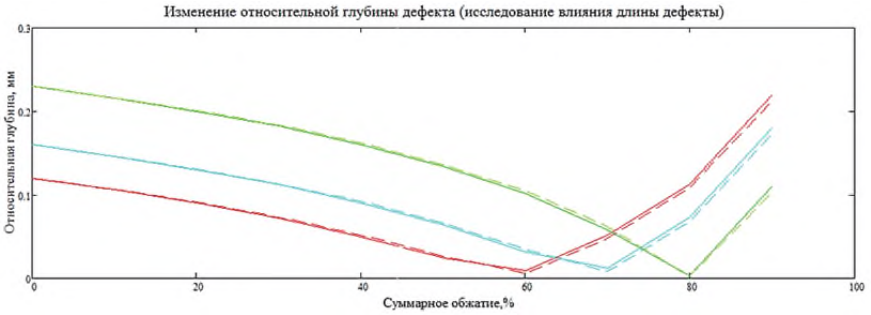


Рис. 4. График исследования зависимости относительных глубин дефектов от различных длин дефекта

Изменение длины дефекта, как и его ширины, незначительно оказывает влияние на его трансформацию.

В качестве параметров, оказывающих наибольшее влияние на изменение поверхностных дефектов, выявлены следующие: суммарно обжатие, исходная относительная глубина и коэффициент трения.

Поэтому для определения оптимальной величины обжатия можно использовать следующую зависимость, полученную с применением сгенерированных по построенной модели трансформации поверхностного дефекта [8]:

$$\varepsilon_{\Sigma(опт)} = 0,366 - 1,255\mu + 1,749\frac{\delta_0}{h_0}.$$

При известных значениях коэффициента трения и величине начальной относительной глубины дефекта по полученной зависимости можно определить оптимальное значение величины суммарных обжатий, при котором относительная глубина дефекта будет наименьшей. Пример выявления оптимальных величин обжатия подката с дефектами приведен в таблице.

Пример определения оптимальных суммарных обжатий

$\frac{\delta_0}{h_0} = 0,15$				$\frac{\delta_0}{h_0} = 0,25$			
$\mu = 0,05$	$\varepsilon_\Sigma = 0,55$	$\varepsilon_{\Sigma(опт)} = 0,566$	$\varepsilon_\Sigma = 0,60$	$\mu = 0,07$	$\varepsilon_\Sigma = 0,70$	$\varepsilon_{\Sigma(опт)} = 0,715$	$\varepsilon_\Sigma = 0,73$
$\frac{\delta}{h}$	0,01	0,0003403	0,012	$\frac{\delta}{h}$	0,013	0,000145	0,01
$\mu = 0,04$	$\varepsilon_\Sigma = 0,55$	$\varepsilon_{\Sigma(опт)} = 0,578$	$\varepsilon_\Sigma = 0,61$	$\mu = 0,06$	$\varepsilon_\Sigma = 0,70$	$\varepsilon_{\Sigma(опт)} = 0,728$	$\varepsilon_\Sigma = 0,75$
$\frac{\delta}{h}$	0,016	0,0004105	0,011	$\frac{\delta}{h}$	0,021	0,0000563	0,017

Заключение

Рассмотрен подход ремоделирования к задаче определения формоизменения дефектов подката в процессе холодной прокатки. Подход заключается в построении на основе уравнений плоской пластической деформации и кинематики продольной прокатки зависимости для выкатываемости дефектов. Для решения задачи используется гибридная система, включающая исходную модель и построенную на ее основе модель из ремоделирующего класса. Эта гибридная система позволяет отследить трансформацию поверхностных дефектов типа «вытравленная окалина» и «рябизна» на любой стадии деформации при холодной прокатке. Исходная модель включает в себя уравнение среднего контактного напряжения и критерий интенсивности сглаживания дефектов. Результаты графического представления процесса деформации полосы и изменения относительной глубины дефекта позволяют говорить о хорошем описании процесса выкатываемости дефекта моделью. Исследование результатов расчета позволили определить параметры, оказывающие наиболее сильное влияние на моделируемый процесс. На основе этого экспериментальным путем получена зависимость параметров модели выкатываемости дефектов, теоретически позволяющая найти величину оптимального обжатия полосы до минимального значения относительной глубины дефекта. Проведен анализ моделируемой ситуации; исследование результатов расчета и построение графиков позволили определить оптимальные значения параметров модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта № 19-48-480009 р_а.

Список литературы

1. *Блюмин С.Л., Галкин А.В., Сараев П.В., Сысоев А.С.* Ремоделирование динамических объектов переменной структуры // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 160—167.

2. *Николаев В.А.* Теория прокатки : монография. М. : Металлургия, 2007.

3. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. М. : Наука, 1969.

4. *Грудев А.П.* Теория прокатки. М. : Интермет Инжиниринг, 2001.

5. *Клименко П.Л., Данченко В.Н.* Контактные напряжения при прокатке. Днепропетровск : Пороги, 2007.

6. *Бармин Г.Ю.* Регламентация качества поверхности подката, режимов холодной прокатки и дрессировки при производстве тонкой и тончайшей жести : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 1990.

7. *Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т.* Трение и смазки при обработке металла давлением. М. : Металлургия, 1982.

8. *Мещерякова А.О., Галкин А.В., Пименов В.А.* Моделирование и исследование процессов деформации дефектов поверхности проката // Современные проблемы

горно-металлургического комплекса. Наука и производство : материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол, 2015. Т. 2. С. 217—223.

Л. А. Гладков[1], Н. В. Гладкова[2]
Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
e-mail: [1]leo_gladkov@mail.ru, [2]nadyusha.gladkova77@mail.ru

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУМЕРНОЙ УПАКОВКИ

Введение

Двумерная упаковка — одна из наиболее востребованных и актуальных вариаций задачи упаковки, так как сфера ее применения в нашей повседневной жизни очень обширна. Задача двумерной упаковки [1] может использоваться при решении таких задач, как, например, распределение ресурсов, выделение вычислительных кластеров, построение механизмов аллокации и очистки памяти в виртуальных вычислительных средах. Широкие возможности при выборе постановки задачи и задании ограничений повышает ее практическую ценность и актуальность.

В процессе решения задачи, в зависимости от типа рассматриваемой упаковки, используется ряд ограничений. Во-первых, это число пространственных измерений в задаче (одно-, двух- и трехмерная упаковка). Во-вторых, форма размещаемых блоков (прямоугольной или произвольной формы). В случае, если форма блоков многоугольная либо произвольная, упаковка является нерегулярной. Практически все варианты задачи двумерной упаковки — NP-сложные, следовательно, не существует алгоритма оптимального решения за полиномиальное время, и для решения этих задач необходимо применять эвристические методы поиска.

1. Постановка задачи

Существующие аппроксимационные алгоритмы двумерной упаковки стремятся найти решение, максимально приближенное к оптимальному. Эти алгоритмы отличаются от эвристических тем, что должны гарантировано находить решение задачи в течение заданного промежутка времени. При этом качество решения должно быть не ниже определенного значения, обычно задается интервал 5—10 % от оптимального значения.

Эффективность алгоритмов двумерной упаковки характеризуется их отклонением от значения переменной эталонной (назовем ее x_{OPT}). x_{OPT} — это минимальное количество единиц тары, вмещающих заданный набор объектов. Оптимальное решение имеет аппроксимационный фактор, равный еди-

© Гладков Л. А., Гладкова Н. В., 2020

нице. Выполнение данного условия означает, что алгоритм использует x_{OPT} оптимальное количество контейнеров. Однако в настоящее время не существует точных алгоритмов, позволяющих достигать такого результата. Исследуя существующие алгоритмы и оценивая их отклонение от x_{OPT}, можно судить об актуальности проблемы создания новых алгоритмов двумерной упаковки.

Рассмотрим задачу двумерной упаковки прямоугольных блоков. Задача может быть сформулирована следующим образом. Имеется множество блоков $I = \{1, 2,..., n\}$, каждый из которых имеет ширину w и высоту h и один или несколько контейнеров (единиц тары). Требуется разместить блоки в контейнер без наложений (границы каждого блока параллельны границам контейнера) таким образом, чтобы минимизировать или максимизировать целевую функцию с учетом имеющихся ограничений. При решении задачи важно учитывать такие характеристики, как область использования, возможные типы блоков, типы контейнеров [2].

Для наглядности и упрощения формального представления задачи двумерной упаковки можно воспользоваться графическими способами (схемами). Одна из самых популярных и удобных схем представления — представление в виде бинарного дерева с n листьями [3]. Листья дерева соответствуют объектам (блокам) упаковки, и у каждой вершины есть метка h — горизонтальный или v — вертикальный.

В данной схеме каждая пара объектов i и j имеет четыре варианта расположения в зависимости от следующих условий. Если лист i — левый потомок вершины u с меткой h, а лист j — ее правый потомок, то мы должны расположить блок i левее блока j, в обратном случае j левее i. Если же i — левый потомок вершины u с меткой v, а j — ее правый потомок, то мы должны расположить блок i ниже блока j, в обратном случае j ниже i.

В общем случае задача двумерной упаковки состоит в назначении конечного числа объектов заданной формы в контейнер определенной формы так, чтобы использовать минимальное число контейнеров при соблюдении заданных ограничений.

Тогда задачу размещения объектов (блоков) в ограниченном двумерном пространстве можно описать следующим образом. Дан контейнер, представляющий собой область двумерного пространства шириной W и высотой H. Также дано множество N блоков $A = \{a_i\}$, $i = 1,\ldots, N$. Множество блоков разбито на множество типов $T = \{t_j\}$, где каждый j-й тип имеет строго определенные габаритные размеры блоков. Необходимо разместить заданное множество A блоков T различных типов общим числом N в контейнере, пространство которого ограничено прямоугольником M таким образом, чтобы выполнялись все ограничения и значение целевой функции было наилучшим с точки зрения используемого критерия оптимизации. Результат представляется в виде плана размещения блоков в контейнере.

В качестве критерия оптимизации в нашей задаче будем использовать суммарную площадь блоков. Каждый тип блоков характеризуется кортежем

$< x_i, y_i >$ длины два, где x_i, y_i — габаритные размеры элемента. В ходе решения задачи положение элементов, обозначенное заданным типом, в пространстве задается множеством $S = \{s_i (< x_{1i}, y_{1i} >, < x_{2i}, y_{2i} >) \mid i = 1, 2, \ldots, n\}$, где $< x_{1i}, y_{1i} >$, $< x_{2i}, y_{2i} >$ — координаты углов элемента — самого близкого к началу осей координат и самого удаленного соответственно. Так же задается прямоугольник $M = \{m_x, m_y\}$, где m_x, m_y — габаритные размеры области упаковки.

2. Алгоритм оптимизации на основе искусственных иммунных систем

В начале 90-х гг. прошлого века возникло новое научное направление — «искусственная жизнь» [4; 5]. Главная идея данного направления — желание смоделировать основные принципы организации естественных (биологических) систем и использовать в дальнейшем эти принципы при построении искусственных систем, решении задач оптимизации и управления. Исследования в области «искусственной жизни» тесно связаны с другими («смежными») научными направлениями, такими как эволюционное моделирование, нейронные сети и т. д. При этом естественным образом возникают и развиваются исследования гибридных моделей и систем, основанных на «глубоком» сочетании моделей и методов, присущих разным научным направлениям. Например, различные модели эволюции популяций искусственных организмов, модели «нечетких контроллеров» для управления параметрами эволюционных алгоритмов и т. д.

В числе разработок по направлению «искусственная жизнь» можно выделить искусственные иммунные системы (ИИС), основанные на их изучении оптимизационные алгоритмы. Первые практические результаты, представляющие интерес для научного сообщества, появились сравнительно недавно, в 90-е гг.

С биологической точки зрения искусственную иммунную систему можно считать прототипом иммунной системы человека. Известно, что иммунная система человека имеет сложную многоуровневую структуру, в которой каждый уровень реализует определенную форму защиты организма от внешних патогенов. В свою очередь, искусственная иммунная система представляет собой компьютерную модель (информационную систему), использующую терминологию, понятийный аппарат иммунологии и принципы организации иммунной системы человека для решения практических вычислительных и оптимизационных задач [6]. В настоящее время модели ИИС широко применяются при построении моделей коллективного искусственного интеллекта и самоорганизующихся многоагентных систем.

Иммунная сеть — математическая структура, имитирующая некоторые функции иммунной системы человека. Иммунные сети во многом похожи на нейронные сети, они также обладают способностью к обучению, прогнозированию и принятию решений в незнакомой ситуации. Как и нейронные сети, иммунные сети не нуждаются в заранее известной модели задачи, а строят

эту модель на основе полученной информации. Наконец, как нейронные, так и иммунные сети наиболее эффективны при решении плохо формализованных (слабо структурированных) задач [6].

В упрощенном виде одна итерация алгоритма работы искусственной иммунной сети имеет следующий вид [6]:

1. Из текущей популяции антител S^b выбираем η^b антител с максимальной BG-аффинностью.

2. Для каждого антитела из числа отобранных η^b антител создаем η_c клонов и помещаем их во множество S^m.

3. Выполняем мутацию каждого антитела из множества S^m по формуле:

$$X_i^m(t+1) = X_i^m(t) + \alpha U_{|X|}(-0{,}5;\ 0{,}5),\ i \in [1 : |S^m|\ ],$$

где α — коэффициент мутации.

4. Определяем BG-аффинность всех антител модифицированного множества S^m и осуществляем его сжатие путем исключения всех антител, кроме η_d лучших.

5. Объединяем популяцию S^b с полученной указанным образом популяцией S^m и выполняем сжатие этой объединенной популяции с сохранением наилучших решений.

Примем следующие значения параметров алгоритма: размер популяции $|S^b| = 50$; число лучших антител, отбираемых для клонирования и мутации, $\eta^b = 10$; число лучших клонов, оставляемых после мутации, $\eta_d = 5$.

Результаты работы алгоритма показывают ожидаемую сильную зависимость всех рассматриваемых критериев оптимальности от размерности целевой функции. Так, с увеличением $|X|$ с двух до 10 среднее число итераций t_{end} возрастает примерно в 10 раз, среднее число испытаний η_t — в 5 раз, лучшее достигнутое значение целевой функции f^* ухудшается более чем в 10 раз.

Как инструмент обработки информации искусственная иммунная система — параллельная и распределенная адаптивная система. Она способна к обучению и ассоциативному поиску информации в задачах распознавания и классификации, а также обладает памятью. В частности, она учится распознавать паттерны антигенов, запоминая паттерны, показанные в прошлом. Все эти функции иммунной системы обеспечивают надежность, устойчивость к ошибкам, динамизм и адаптируемость. Именно эти свойства иммунной системы мы будем использовать при моделировании гибридного алгоритма.

3. Описание гибридного алгоритма

Для решения задачи двумерной упаковки был разработан гибридный алгоритм, на основе интеграции модифицированного генетического алгоритма (ГА) [7], алгоритма на основе искусственной иммунной сети (АИИС) и нечеткого логического контроллера (НЛК) [8; 9]. Предлагаемый алгоритм осно-

ван на модели, в которой и антигены, и антитела представлены двоичными строками, и для оценки аффинности (сходства) применяется правило соответствия антиген и антител.

Цель использования иммунного алгоритма — локализация области адаптивных решений в пространстве поиска и увеличение производительности гибридного алгоритма за счет снижения объема вычислений и сравнений ЦФ на каждой итерации алгоритма. Предлагаемый алгоритм применяет генетический алгоритм для глобального оптимизационного поиска. При этом иммунный алгоритм исполняет роль локального поискового механизма, направляющего генетический алгоритм в адаптивную область. ИИС-алгоритм просто сравнивает бинарные строки, что является простой операцией с точки зрения производительности.

Предложенный алгоритм эмулирует процесс распознавания антигенов путем объединения популяций антител для достижения специфичности антигена, с целью научиться определять правильные антитела. Процесс поиска схож с генетическим алгоритмом, предлагаемая схема встраивает эмуляцию искусственной иммунной системы в генетический алгоритм. Это сокращает временную сложность гибридного алгоритма, так как его поиск основан на сравнении строк, а не на вычислении значений ЦФ.

Опишем последовательность шагов гибридного алгоритма.

1. Генерируем случайным образом начальную популяцию решений для модифицированного генетического алгоритма.

2. Начало работы внутреннего иммунного алгоритма. Если начальная популяция состоит из смеси адаптивных и неадаптивных решений, делим популяцию на две группы. Первая группа содержит неадаптивные решения, которые определяются как «антитела», вторая группа содержит адаптивные решения, которые определяются как «антигены»; если ни одно решение не адаптивно (находится вне установленных пределов ЦФ), тогда используем в качестве оценки пригодности решения величину превышения ограничения этого решения. После этого определяем как «антигены» те решения, у которых наименьшее значение этой величины.

3. Случайным образом отбираем количество решений σ.

4. Рассчитываем адаптивность антител как степень сходства с антигенами следующим путем: антиген выбирается из популяции антигенов случайным образом; для каждого антитела в наборе проводим сравнение с выбранным антигеном, степень сравнения выражаем величиной Z, которая представляет собой расстояние (обычно евклидово), измеренное на генотипическом уровне (уровне кодирования хромосомы). Расчет выполняем по формуле

$$Z = \sum_{i=1}^{L} t_i,$$

где $t_i = 1$, если есть соответствие в позиции $i = 1, \ldots, L$, где L — длина хромосомы, или ноль, если соответствие отсутствует.

Чем больше значение Z, тем выше аффинность между строками, следовательно, тем выше значение ЦФ.

5. На основе рассчитанной на предыдущем шаге степени адаптивности популяция антител репродуцируется в модифицированном генетическом алгоритме (с использованием кроссовера и мутации).

6. Процесс повторяется до наступления сходимости (т. е. до момента, когда среднее и максимальное значение ЦФ совпадут с заданной погрешностью) или до достижения максимального числа итераций.

7. Конец работы внутреннего иммунного алгоритма. Управление передается внешнему генетическому алгоритму.

8. Применение оператора селекции.

9. Применение операторов кроссинговера и мутации.

10. Работа блока нечеткого логического контроллера. Оценка и, при необходимости, коррекция значений управляющих параметров генетического алгоритма.

11. Возврат ко второму шагу алгоритма. Цикл повторяется до достижения состояния останова.

4. Результаты вычислительных экспериментов

Гибридный алгоритм был реализован в виде программной системы, разработанной с применением языка программирования C++ и среды разработки Borland C++ Builder для работы в операционных системах Microsoft Windows XP и более поздних версий. Все исследования проводились на тестовом компьютере следующей конфигурации: процессор Intel Core i7-8750H 2.20 GHz; ОЗУ DDR4 16Gbt; операционная система MicrosoftWindows 10 Pro.

В ходе проведения вычислительных экспериментов изучались зависимости основных параметров разработанного алгоритма от времени, числа итераций и т. д.

Вычислительная сложность гибридного алгоритма находится в интервале от $O(nlogn)$ до $O(n^2)$. Исследования показали, что оптимальным размером популяции является число в интервале от 100 до 200 в случае задач небольшой размерности (до 1000 блоков). При этом алгоритм сходится примерно на 30 секунде.

Эффективность гибридного алгоритма для решения задачи двумерной упаковки оценивалась путем сравнения значений целевой функции в трех режимах работы: генетический алгоритм без дополнительных модулей (№ 1); генетический алгоритм с включенным модулем НЛК (№ 2); генетический алгоритм с включенными модулями НЛК и АИИС (№ 3).

Для каждого режима работы проводилась серия из 5 прогонов, с количеством элементов от 25 до 200 и следующими вероятностями применения генетических операторов: 5 % для оператора мутации; 80 % для оператора кроссинговера (табл.).

Анализ эффективности алгоритма

№	Число элементов	Значение ЦФ, тыс.			Δ, %
		№ 1	№ 2	№ 3	
1	25	56	52	48	+14,3
2	50	115	107	99	+13,9
3	100	310	287	274	+11,6
4	150	470	443	426	+8,4
5	200	645	633	621	+3,7
Улучшение значения ЦФ в среднем, %					+10,4

Эффективная работа алгоритма невозможна без точной настройки его параметров. Была проведена серия экспериментов для выявления оптимальных параметров вероятностей операторов мутации и кроссинговера. В ходе первой серии экспериментов вероятность применения оператора кроссинговера менялась с шагом 5 в диапазоне от 50 до 100 %. Вероятность оператора мутации была статичной и равной пяти. Изменение оператора мутации проводилось с шагом 1 в диапазоне от 0 до 10. Количество элементов упаковки оставалось неизменным и равным 100. Результаты исследований показаны на рисунке 1. Исследования показали, что наилучшее значение ЦФ достигается при вероятности применения оператора кроссинговера равной 80 %.

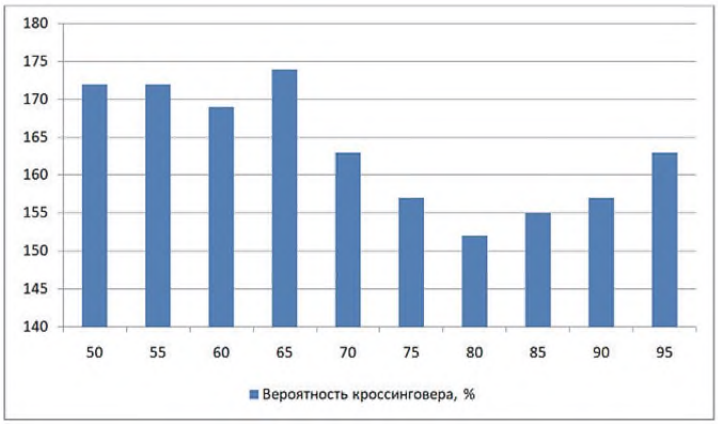


Рис. 1. График зависимости значения ЦФ от значения вероятности ОК

Аналогичные эксперименты проводились для изучения влияния оператора мутации. В ходе серии экспериментов вероятность применения оператора мутации менялась с шагом 1 в диапазоне от одного до 10 %. Вероятность оператора кроссинговера была статичной и равной 80 %. Количество элементов упаковки оставалось неизменным и равным 100. Результаты исследований представлены на рисунке 2.

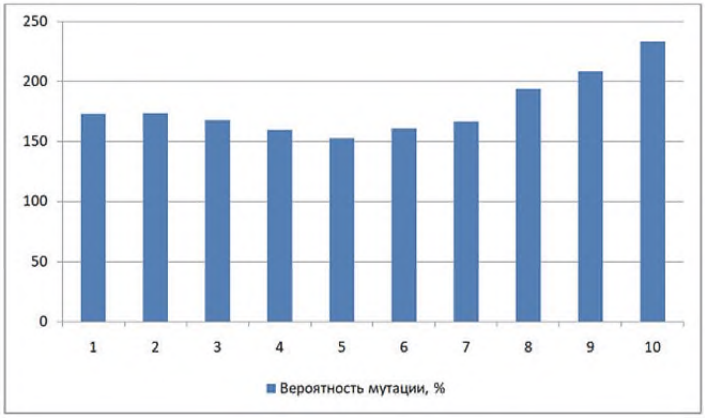


Рис. 2. График зависимости значения ЦФ от значения вероятности ОМ

Заключение

В ходе исследования разработан гибридный алгоритм решения задачи двумерной упаковки. Изучены результаты, в ходе которых оценена эффективность алгоритма и возможности его применения. По результатам полученных данных выявлены оптимальные значения параметров работы алгоритма.

Проведенные исследования доказали эффективность предложенного гибридного алгоритм, выявив улучшение качества решений в среднем на 10,4%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-01054).

Список литературы

1. *Курейчик В.М.* Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. М. : Радио и связь, 1990.

2. *Charles J. Alpert, Dinesh P. Mehta, Sachin S. Sapatnekar.* Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.

3. *Johnson D.S., Garey M.R.* A 71/60 Theorem for Bin Packing // Journal of Complexity. New Jersey. 1985. P. 17—42.

4. *Редько В.Г.* Эволюционная кибернетика. М. : Наука, 2001.

5. *Редько В.Г.* Моделирование когнитивной эволюции: На пути к теории эволюционного происхождения мышления. М. : ЛЕНАНД, 2019.

6. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2016.

7. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. М. : Физматлит, 2010.

8. *Гладков Л.А.* О некоторых подходах к построению гибридных интеллектуальных систем для решения графовых задач // Новости искусственного интеллекта. 2000. №3. С. 171—180.

9. *Гладков Л. А., Гладкова Н. В., Лейба С. Н.* Размещение элементов схем ЭВА на основе гибридных интеллектуальных методов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №4 (165) С. 25—36.

Е. С. Гришин
ООО «Промдиагностика», Калининград, Россия
e-mail: negrshn@mail.ru

МЕТОДЫ ПРЕДИКАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Введение

В статье описывается процесс разработки подсистемы непрерывной диагностики оборудования станов по гибке и сварке труб из нержавеющих и специальных сталей в составе комплексной АСУТП предприятия и формирование логического вывода о его фактическом состоянии, нарастании и развитии дефектов и износа отдельных элементов, предикативного вывода о возможных отказах. Поясняется принцип работы подсистемы — непрерывные обработка и анализ технологической информации АСУТП в рамках разработанной математической модели. Перечисляются элементы оборудования, включаемые в систему АСУТП, приводятся их технические характеристики, обосновывается их выбор и определяются основные правила для предикативного вывода. Описываются задачи, решаемые подсистемой вывода о фактическом состоянии оборудования АСУТП, влияние развития дефектов оборудования на качество выпускаемой готовой продукции.

1. Постановка задачи для разработки подсистемы предиктивного вывода фактического состояния оборудования

Предприятие ООО «Техно трейд» специализируется на производстве сварных нержавеющих труб, в том числе для ответственных применений в химической и атомной промышленности [1]. Технологический процесс обеспечивают трубоэлектросварочные агрегаты (ТЭСА) с системами автоматического управления (САУ) (рис. 1) отдельных участков [2]. Поставлена и решена задача проектирования АСУТП, в том числе с подсистемой непрерывной диагностики оборудования ТЭСА, и формирование логического вывода о его фактическом состоянии, нарастании и развитии дефектов и износа отдельных элементов, предикативного вывода о возможных отказах. Задачи подсистемы — предупреждение отказов, информирование о недопустимом износе, влияющем на качество выпускаемой продукции, передача в систему ТО и Р информации о фактическом состоянии оборудования с целью оптимизации затрат на ТО и Р и формированию планов обслуживания оборудования по фактическому состоянию.

© Гришин Е. С., 2020

Рис. 1. Цех предприятия

2. Разработка подсистемы предиктивного вывода фактического состояния оборудования

Общая структура разработанной подсистемы состоит из источника данных, модуля сбора технологической информации, модуля обработки технологической информации, базы данных, правил диагностики, пользовательского интерфейса (рис. 2).

Рис. 2. Общая структура подсистемы диагностики

Подсистема вывода фактического состояния оборудования построена на основе продукционной модели представления знаний интеллектуальных систем [3]. В данной модели знания представляются в виде правил: «Если (условие [и условие … и условие]), то (действие)».

Для адаптации под поставленные задачи диагностики и удобства использования подсистемы диагностики операторами производственных линий правила расширены до вида: «Если (условие [и условие … и условие]), то (дефект). Рекомендуется: (действие)».

Правила заблаговременно формируются специалистом при внедрении АСУТП. Общий вид продукционной модели:

$$i = < S; L; A \to B; Q; R >,$$

где S — описание класса ситуаций; L — условие активизации продукции; A — ядро продукции; Q — постусловие продукционного правила; R — рекомендации оператору.

Наполнение базы данных правил осуществляется при помощи анализа технической документации и статистической информации по обслуживанию и ремонту диагностируемого оборудования.

За обработку правил отвечает модуль обработки. Для обеспечения технологическими данными модуля обработки был разработан модуль сбора данных, позволяющий их получать различными способами: непосредственным подключением к OPC серверу, или, из соображений безопасности, импортом файлов специального вида, экспортируемых SCADA-системой в папку общего доступа. Данные импортируются в базу данных, используемую подсистемой диагностики с интервалом одна секунда.

Для определения фактического состояния наблюдаемого оборудования автор предлагает использовать анализ тенденций движения значений его параметров технического состояния, характеризующих его работоспособное состояние, к пороговым значениям. Пороговые значения задаются уставками SCADA системы, требованиями нормативной, технической и проектной документациями.

Анализ тенденции движения значения (динамики) наблюдаемых характеристик основывается на анализе абсолютного и среднего абсолютного прироста рядов динамики, а также сумме абсолютных цепных приростов уровней.

Абсолютный прирост показывает скорость изменения ряда и определяется как разность между текущим и базисным уровнями. За базисный уровень берется уровень предшествующего периода.

В данном случае используется абсолютный цепной прирост, который вычисляется по формуле $\Delta = y_i - y_{i\text{-}1}$.

Количество замеров для каждой наблюдаемой характеристики в месяц составляет приблизительно 2,6106. Для снижения вычислительной нагрузки автор предложил редуцировать данные путем квантования анализируемого промежутка времени на равные отрезки по формуле

$$n = \frac{q}{k},$$

где n — шаг квантования; q — глубина выборки; k — регулирующий коэффициент.

Шаг квантования — шаг разбиения выборки глубиной q. Регулирующий коэффициент позволяет регулировать общую сложность алгоритма и погрешность вычислений в частности.

Для получения погрешности вычислений алгоритма анализа остаточного ресурса узла оборудования в 1% эмпирическим путем подобран коэффициент, равный 26280.

Сравнения анализа полного набора технологических данных и редуцированного набора показало, что редукция данных не оказала значимого влияние на результат анализа фактического состояния наблюдаемого оборудования. На рисунке 3 представлены уровни среднего абсолютного прироста для выборки из 100 рядов замеров по 7884000 уровней каждая, что соответствует трем месяцам непрерывного сбора данных со 100 датчиков с интервалом опроса одна секунда.

Для каждого ряда была произведена редукция и вновь посчитан средний абсолютный прирост. Сравнив полученные показатели и их дельты, можно сделать вывод, что дельта имеет значение, отличное от нуля, начиная с 10^{-9} степени, а значимая часть показателей начинается с 10^{-5} степени. Получаем погрешность вычислений порядка 10^{-4} степени для среднего абсолютного роста и порядка 1% для вычисления прироста исходных и редуцированных последовательностей соответственно. Выдержка из полученных результатов представлена в таблице.

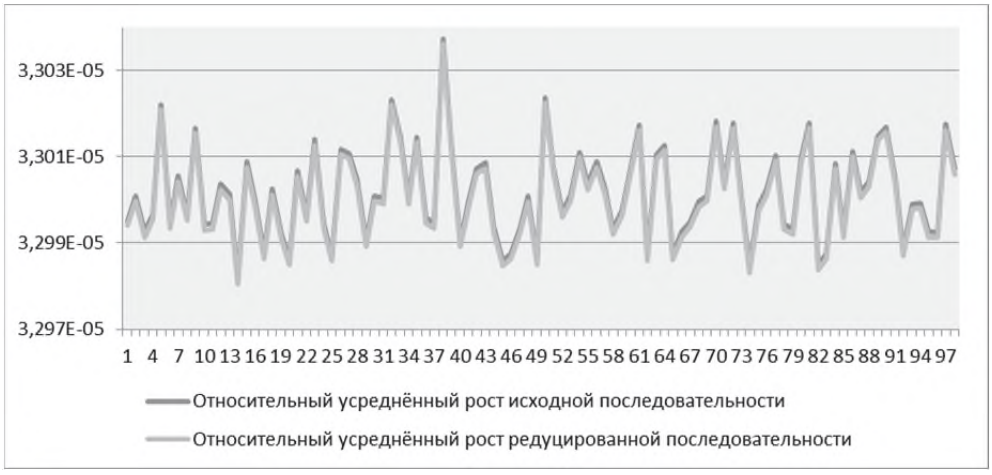


Рис. 3. Уровни среднего абсолютного прироста

Результаты сравнения полного и редуцированного наборов данных о фактическом состоянии наблюдаемого оборудования

Абсолютный усредненный рост исходной последовательности	Абсолютный прирост исходной последовательности	Абсолютный усредненный рост редуцированной последовательности	Абсолютный прирост редуцированной последовательности	Дельта приростов исходной и редуцированной последовательностей	Дельта усредненного роста исходной и редуцированной последовательностей
3,30137E-05	260,280227	3,30125E-05	260,27039	0,009837	1,24772E-09
3,30052E-05	260,212693	3,30039E-05	260,202824	0,009869	1,25178E-09
3,29932E-05	260,118555	3,29921E-05	260,109579	0,008976	1,13851E-09
3,30043E-05	260,205484	3,3003E-05	260,19545	0,010034	1,2727E-09
3,29993E-05	260,166378	3,2998E-05	260,156339	0,010039	1,27334E-09
3,30111E-05	260,259232	3,30097E-05	260,248835	0,010397	1,31875E-09
3,30001E-05	260,173139	3,29988E-05	260,162798	0,010341	1,31164E-09
3,29921E-05	260,109604	3,29908E-05	260,099549	0,010055	1,27537E-09
3,30006E-05	260,17681	3,29993E-05	260,166556	0,010254	1,30061E-09
3,301E-05	260,25099	3,30087E-05	260,240504	0,010486	1,33004E-09
3,30125E-05	260,270248	3,30112E-05	260,260228	0,01002	1,27093E-09
3,30153E-05	260,292949	3,30142E-05	260,283711	0,009238	1,17174E-09
3,30046E-05	260,208047	3,30033E-05	260,198067	0,00998	1,26586E-09
3,30245E-05	260,365018	3,30233E-05	260,355415	0,009603	1,21804E-09
3,29896E-05	260,089893	3,29884E-05	260,080331	0,009562	1,21284E-09
3,29924E-05	260,112381	3,29912E-05	260,102478	0,009903	1,25609E-09
3,29865E-05	260,065168	3,29852E-05	260,05509	0,010078	1,27829E-09
3,30059E-05	260,218426	3,30047E-05	260,208864	0,009562	1,21284E-09
3,30059E-05	260,218275	3,30046E-05	260,208418	0,009857	1,25025E-09
3,29818E-05	260,028606	3,29805E-05	260,018535	0,010071	1,2774E-09

3. Вычисление остаточного ресурса оборудования

Остаточным ресурсом оборудования автор предлагает считать наименьший остаточный ресурс его составных узлов. Расчет остаточного ресурса узла оборудования производить на основе аппроксимации значений его характеристик средним абсолютным ростом до пороговых значений функцией.

$$t = \frac{n-k}{T},$$

где t — остаточный ресурс, часов; n — пороговое значение характеристики; k — текущее значение характеристики; T — средний абсолютный рост значения характеристики в час.

Средний абсолютный прирост показывает среднюю скорость изменения ряда за определенный промежуток времени.

В изученной литературе функция аппроксимации зачастую является линейной. Практически не встречаются примеры со степенной, логарифмической, экспоненциальной функциями [4].

4. Кластеризация оборудования

В работе предлагается кластеризовать состояние оборудования по наивысшей степени износа его составных узлов и остаточному ресурсу и выделяются уровни: начальный — если значение наблюдаемой характеристики находится между нижней и верхней предупредительными уставками при обладании остаточным ресурсом каждого узла более шести месяцев. Считать состояние оборудования штатным или нормальным; средний — если значение наблюдаемой характеристики находится между нижней и верхней предупредительными уставками при обладании остаточным ресурсом каждого узла более трех месяцев. Считать состояние оборудования переходным; предаварийный — если значение наблюдаемой характеристики находится между нижней и верхней предупредительными уставками при обладании остаточным ресурсом каждого узла более одного месяца. Считать состояние оборудования предаварийным.

Для удобства использования подсистемы диагностики оператором автор предложил разделить узлы оборудования по степени критичности на пять уровней: низкий; ниже среднего; средний; выше среднего; высокий.

Для каждого уровня критичности установить промежуток времени: глубину выборки, которая, в свою очередь, определена статистически, путем исследования интервалов обслуживания различного оборудования и их узлов и составляет: 60; 36; 12; 6; 3 месяца.

5. Алгоритм подсистемы предиктивного вывода фактического состояния оборудования с оценкой остаточного ресурса

В общем виде алгоритм анализа динамики характеристики выглядит следующим образом.

1. Редуцирование количества исходных данных для анализа по формуле

$$Y = \left\{ x \in X \mid U_{i=1}^{n} x_{i*k} \right\},$$

где Y — редуцированный ряд; X — исходный ряд; k — коэффициент редуцирования.

2. Определение относительного прироста ряда по формуле

$$\forall y' \in Y : AVG(\Sigma_{i=1}^{n} y_{i+1} - y') = \Delta y'.$$

3. Выявление динамики ряда: если относительный прирост находится в рамках погрешности измерительного прибора, то для данного ряда делается вывод об отсутствии динамики.

4. При наличии динамики ряда определение ее направленности: если знак значения относительного прироста отрицательный, то ряд убывает; если положительный, то ряд возрастает.

6. Результаты

Расчеты показывают, что внедрение обслуживания по фактическому состоянию позволяет: сократить количество обслуживаний на 50 % [5]; уменьшить затраты на обслуживание на 75 % [5]; уменьшить количество отказов на 70 % за первый год работы [5]; снизить издержки вследствие внезапных отказов оборудования [5]; сократить время простоя при поиске неисправности [5].

Внедрение подсистемы предиктивного вывода фактического состояния оборудования в составе системы АСУТП на объекте автоматизации даст следующие положительные результаты: позволит непрерывно контролировать качество производимой продукции; даст возможность контролировать состояние парка используемого промышленного оборудования и оптимизировать затраты на его обслуживание; позволит руководящему персоналу предприятия контролировать ход технологического процесса и его значимые параметры.

7. Проведение испытаний

Подсистема предиктивного вывода фактического состояния оборудования с оценкой остаточного ресурса развернута на объекте и находится на стадии опытно-промышленной эксплуатации (рис 4).

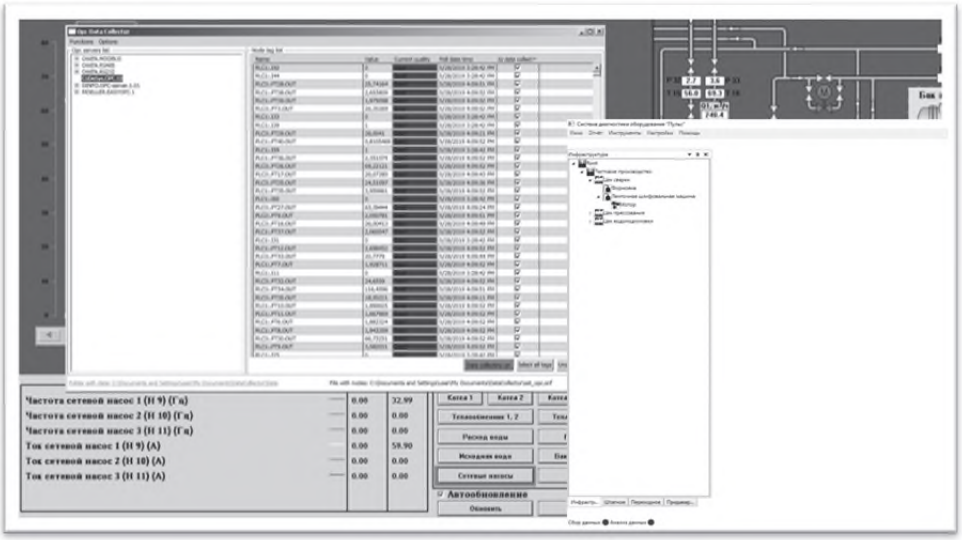


Рис. 4. Снимок экрана АРМ оператора

8. Планируемые усовершенствования

Для удобства администрирования подсистемы разрабатывается прототип системы удаленного администрирования, позволяющий удаленно устанавливать, настраивать и обновлять подсистемы диагностики.

Одновременно с этим ведется разработка прототипа облачного решения и банка знаний по диагностике неисправностей оборудования, который позволит иметь централизованную базу знаний и производить удаленный анализ технологической информации.

Заключение

Сравнение с прямым анализом данных алгоритм с использованием редукционной выборки ускорился в 300 раз, при этом погрешность вычислений составила менее 1 %. Поиск публикаций по теме алгоритмов вывода фактического состояния подобного типа оборудования не дал результатов. Для решения этой задачи был также рассмотрен возможный вариант реализации алгоритма с применением нейронных сетей. Однако такой подход требует полноту входных данных обучения, содержащих множество различных комбинаций трендов характеристик. Еще одним достоинством предложенного автором алгоритма является возможность определять комбинации характеристик непосредственно в правилах диагностики.

Список литературы

1. *ГОСТ* 11068-81 Трубы электросварные из коррозионностойкой стали. Технические условия.

2. *Официальный* сайт АО Guzzetti. URL: http://www.guzzetti.com/en/azienda/ (дата обращения: 27.01.2020).

3. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем : учебник. СПб. : Питер, 2000.

4. *Руководящий* документ 26.260.004-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.

5. *Stephan H., Karl F.* Knowing plant — Decision supporting and planning for engineering design // Intelligent Systems in Design and Manufacturing III. Proc. SPIE. 2000.

А.Е. Колоденкова[1], С.С. Верещагина[2]
Самарский государственный технический университет (СамГТУ), Россия
e-mail: [1]anna82_42@mail.ru, [2]werechaginass@mail.ru

РАЗРАБОТКА НЕОДНОРОДНЫХ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Введение

Диагностирование промышленного оборудования, выполненное согласно нормативным документам, ГОСТам — важный процесс, который регулярно проводится на промышленных предприятиях и позволяет сократить продол-

© Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., 2020

жительность ремонтов оборудования, повысить качество ремонта и устранить вторичные поломки оборудования, а также повысить безопасность эксплуатации оборудования [1—3].

Однако диагностирование технического состояния оборудования сопровождается рядом проблем. Во-первых, на состояние оборудования и его работу влияет множество факторов, во-вторых, факторы могут быть представлены не только количественными переменными, но и качественными переменными. Все это привело к развитию различных типов семантических и когнитивных моделей.

Настоящая работа посвящена разработке и анализу структуры неоднородных когнитивных моделей для диагностирования промышленного оборудования в условиях измерительной и экспертной информации.

1. Разработка неоднородных когнитивных моделей

Предлагается новый тип моделей, условно названный нами неоднородной когнитивной моделью (НКМ), которая естественным образом является частным случаем неоднородной семантической сети [4], введенной Г. С. Осиповым. Однако специфика предложенного типа НКМ заключается в особой процедуре обработки множества вершин и ребер, которая возникает из постановок задач, связанных с диагностированием оборудования.

Под *неоднородной когнитивной моделью* понимается ориентированный взвешенный граф с помеченными вершинами и ребрами (рис.), который получается путем структуризации экспертных знаний главного инженера и дежурного персонала на основе представлений о техническом состоянии оборудования и измерительной и экспертной информации.

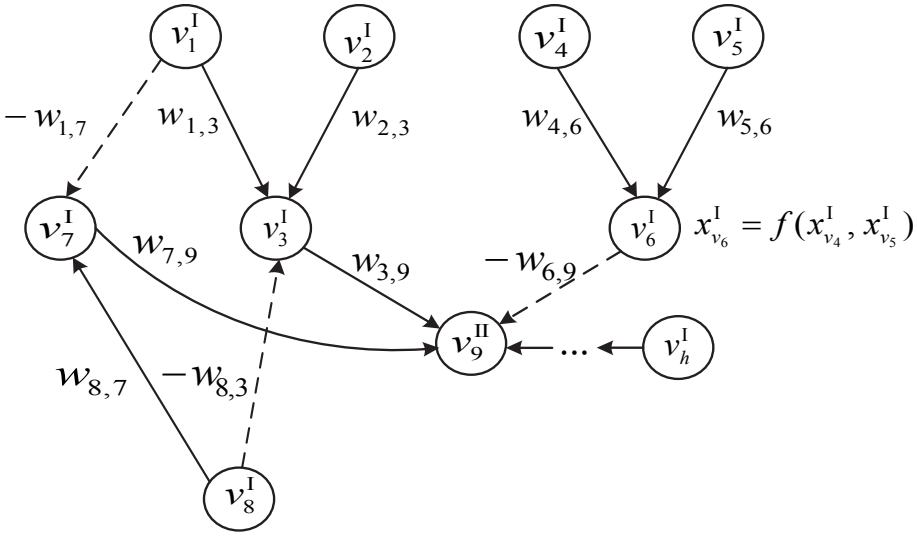


Рис. Фрагмент неоднородной когнитивной модели

Таким образом, НКМ — ориентированный взвешенный граф, вершинами которого являются факторы, влияющие на техническое состояние оборудования, а ребрами — нечеткие причинно-следственные связи между факторами:

$$G_{\text{неод}} = <V, F, W>,$$

где $V = \{v_i\}$ — множество вершин, $v_i \in V$, $i = \overline{1,h}$, h — количество вершин; $X = \{x_{v_i}\}$ — множество значений вершин (каждой вершине ставится один фактор); F — функции, необходимые для вычисления некоторых значений вершин, которые сопоставлены вершинам; W — нечеткие причинно-следственные связи между вершинами v_i и v_j, $i, j = \overline{1,h}$, характеризующие направление и силу влияния между ними [5; 6].

Неоднородность модели обусловлена наличием вершин двух разных типов:

1. V^{I} — управляющие факторы, на которые подается внешнее воздействие (квалификация персонала, погодные условия, показания с приборов и т. п.).

Значения вершин первого типа $x^I_{v_i}$ ($v_1^{\text{II}} - v_8^{\text{II}}, ..., v_h^{\text{II}}$, рис.) могут быть представлены в виде: лингвистических переменных (например, напряжение — «низкое», «норма», «высокое» и т. п.), полученных от дежурного персонала; интервальных значений, взятых из нормативной документации, ГОСТов, паспортных данных на оборудование; числовых значений, полученных от измерительных устройств.

Значения вершин $x^I_{v_i}$ могут определяться не только на основе опыта, но и вычисляться с помощью функций, которые могут зависеть как от единственного *аргумента, так и от нескольких переменных* ($x^I_{v_6} = f(x^I_{v_4}, x^I_{v_5})$, рис.).

2. V^{II} — целевые факторы, которые могут быть получены в перспективе (решения, заключения о состоянии оборудования) (v_9^{II}, рис.).

При этом значения вершин второго типа $x^{\text{II}}_{v_i}$ могут быть представлены только в виде лингвистических переменных (например, состояние оборудования = «исправное»).

2. Анализ структуры неоднородных когнитивных моделей

После разработки НКМ можно провести анализ трех разновидностей.

Анализ структурной устойчивости и устойчивости по возмущению, по начальному значению [7]. Если в НКМ отсутствует нечетное число отрицательных циклов, то модель структурно не устойчива. Это означает, что однажды возросшее негативное влияние со стороны каких-либо факторов, если ничего не предпринимать, будет продолжать неограниченно нарастать. Если критерий устойчивости в теории управления $|M| < 1$, где $|M|$ — максимальное по модулю собственное число (корень характеристического уравнения матрицы отношений НКМ), модель устойчива по возмущению, по начальному значению. Если же $|M| > 1$, модель не устойчива ни по возмущению, ни по начальному значению. Это означает, что НКМ выйдет из равновесного состояния при любом возмущении со стороны.

Прогнозирование технического состояния оборудования осуществляется с использованием методов анализа импульсных процессов [6; 8]. При исследовании динамики поведения НКМ решаются следующие задачи: выделяются управляющие вершины, на которые подается внешнее воздействие; выделяются целевые вершины, состояние которых оценивается в процессе проведения вычислительного эксперимента; строятся графики импульсных процессов с четырьмя вершинами для лучшего восприятия и понимания графика (по оси абсцисс отмечены шаги импульсного процесса t, по оси ординат — изменение значений вершин в процентах). На графиках отображается такое количество шагов t, которое отражает тенденции изменений значений факторов.

Импульсный процесс в НКМ задается следующим образом:

$$x_{v_i}(t+1) = x_{v_i}(t) + \sum_{j=1}^{h} w_{j,i} p_j(t),$$

где $x_{v_i}(t+1)$, $x_{v_i}(t)$ — значения вершины v_i на шаге $t+1$ и t, $t = 1, 2, 3, ...$; $p_j(t)$ — изменение в вершине v_j на шаге t, $p_j(t) = x_{v_j}(t) - x_{v_j}(t-1)$; $w_{i,j}$ — вес ребра между вершинами v_i и v_j.

Топологический анализ структуры НКМ, позволяет главному инженеру правильно выбрать целевые и управляющие вершины модели; рассчитать системные показатели НКМ с применением методологии нечеткого когнитивного моделирования, которые позволят увидеть, какие вершины и как сильно они влияют на НКМ [8].

Заключение

Для диагностирования промышленного оборудования предлагается использовать разработанные авторами неоднородные когнитивные модели. Данные модели учитывают не только измерительную информацию, получаемую от множества приборов, но и экспертную информацию, полученную от дежурного персонала на основе опыта или по результатам опроса. Применение разработанных моделей при диагностировании оборудования дают возможность главному инженеру принять научно обоснованные управленческие решения относительно исправности оборудования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-07-00195, 19-08-00152.

Список литературы

1. *Yuling Yan* Research on electrical equipment's fault diagnosis based on the improved support vector machine and fuzzy clustering // Chemical Engineering Transactions. 2017. Vol. 59. P. 865—870.

2. *Mareček O.* Monitoring and diagnostic system of power plant electrical equipment // Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika). Pilsen, 2016. P. 1—4.

3. *Балобанов Р. Н., Зацаринная Ю. Н.* Особенности диагностирования высоковольтного оборудования с элегазовой изоляцией // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 2. С. 257—258.

4. *Осипов Г. С.* Построение моделей предметных областей. Ч. I. Неоднородные семантические сети // Известия РАН. Техническая кибернетика. 1990. № 5. С. 32—35.

5. *Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С.* Нечеткие модели и сети. М. : Горячая линия — Телеком, 2007.

6. *Ковалев С. М., Колоденкова А. Е.* Построение базы знаний интеллектуальной системы контроля и предупреждения рисковых ситуаций при проектировании сложных технических систем // Онтология проектирования. 2017. Т. 7, № 4 (26). С. 398—409.

7. *Горелова Г. В.* Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3. С. 239—250.

8. *Korobkin V. V., Kolodenkova A. E.* Diagnosis in SEMS based on cognitive models: group interaction // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 174. P. 275—284.

Л. М. Лукьянова
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
e-mail: llm_llm@mail.ru

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ И ЦЕЛЕЙ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ

Введение

Одно из средств повышения качества сложных объектов и эффективности процессов их создания, функционирования и развития в условиях существенной неопределенности ситуаций, возникающих в таких объектах и окружающей среде (проблемные ситуации), — системная методология, называемая системным анализом.

Для практического применения данной методологии разработано немало общих и частных методик (их обзоры имеются, например, в работах [1—3]), которые способствуют уменьшению неопределенности проблем, целей и системы для их достижения (СЦД) и тем самым решению проблем и устранению проблемной ситуации. Способствуют, но (как показывают результаты их применения) не обеспечивают. Ведь большинство методик системного анализа в той или иной мере восходит к системе ПАТТЕРН [1, с. 375—377], в которой используются экспертные методы формирования проблем, целей и СЦД. Такие методы базируются на генетических программах и мышлении (прежде всего практическое, интуитивное, наглядно-образное), реализуемом психическими механизмами экспертов и лиц, принимающих решения (ЛПР), и результатах их работы (здравый смысл, мотивы, интересы, ценностные оценки и т. д.). Именно «человеческий фактор» нередко приводит к некорректности (противоречивость, несогласованность, неполнота) целей, являющихся логи-

© Лукьянова Л. М., 2020

ческим основанием для синтеза систем (А. Д. Холл, 1965). Логическая некорректность и неполнота целей связана также: с незнанием или неверным пониманием экспертами и ЛПР закономерностей систем и регулятивных компонентов (системных принципов и парадигм) системного анализа; с терминологической неточностью понятий «цель», «целеполагание» (ЦП), «анализ целей» (и потому различным толкованием данных терминов членами экспертных коллективов и ЛПР); с неформализованностью лингвистического аспекта целей (сложностью и многозначностью их формулировок и потому возможной ложностью целей); с неформализованностью логического аспекта процессов анализа и полагания целей (и потому возможной логической неправильностью данных процессов и логической некорректностью структуры целей как их результата).

К сожалению, как показал анализ методик системного анализа [2], не только те из них, которые базируются на неформальных методах, но и основывающиеся на формальных и частично формальных методах не обеспечивают требуемого качества результатов системного анализа и системности (полноты, непротиворечивости, согласованности) разработанных для устранения проблемных ситуаций программ и планов [3; 4]. В производственной сфере логическая некорректность, неполнота программ и планов, выявляемая в процессе их реализации и после его завершения, влечет существенные издержки, свидетельствующие о невысокой средней результативности, а в целом эффективности системного анализа [3].

В [4] предложен подход к решению данной проблемы посредством гибридного человекомашинного интеллекта, выполняющего, как показано выше, наиболее важный и слабо формализуемый начальный этап системного анализа — этап анализа целей. В [5] очерчена, а в [6] представлена методология реализации такого интеллекта на основе семиотических методов (логико-лингвистические модели проблем, целей, рассуждений о проблемах и целях и графосемантические модели структур проблем и структур целей).

В статье обсуждается методика анализа проблем и целей, основывающаяся на данной методологии.

1. Основные положения методики анализа проблем и целей

Утверждение о том, что цель есть «отрицание» проблемы (В. Л. Тамбовцев, 1972), подтвержденное результатами проведенного нами эмпирического исследования большого корпуса проблем и целей ряда систем различных сегментов производственной сферы и использованное в методологии [6]: в виде определений DG3 и DH3 и аксиом G_uH_u-D3-логики оценок (А. А. Ивин, 1970), используемых в качестве неизменяемых аксиом логико-лингвистических моделей рассуждений о проблемах и целях, обеспечивающих логическую корректность структуры целей (СЦ) и структуры проблем (СП); при разработке семиотических методов моделирования проблем и их структур (ЛЛМ-П), аналогичных методам моделирования целей (ЛЛМ-Ц), — отражено в следующих положениях методики анализа проблем и целей.

1. Единство проблем и целей для некоторого сегмента производственной сферы определяет семантическая связь соответствующих проблем и целей, выражаемая пересечением лингвистических форм их представления и контрарной противоположностью собственно проблемной и целевой частей логических форм их представления, которая не исключает возможность ложности обоих противоположно ценностно оцененных проблем и целей.

2. Единство и целостность знаний о проблемах и целях для сегмента производственной сферы служит обоснованием аналогичности таких моделей, методов и средств, как: единая модель знаний первого уровня, включающая словари базовых семантических понятий (ролевые предметы и видовые свойства); единая модель знаний второго уровня, включающая определенные на элементах указанных словарей тезаурусы базовых семантических отношений, с именами: «система — аспект системы», «целое — часть», «род — вид», «ранг — субранг», «стадии жизненного цикла (ЖЦ) — стадия ЖЦ» и др.; единая модель знаний третьего уровня, включающая: лингвистические модели формулировки цели и формулировки проблемы и основывающиеся на них частично формальные языки целей и проблем, реализованные как языки представления знаний фреймового типа (специфика предложенного представления состоит в том, что для слотов фрейма разработана КС-грамматика, расширенная правилами частичного учета контекста целевой и проблемной частей формулировок целей и проблем); единый преобразователь форм представления цели и проблемы: лингвистическая форма ↔ логическая форма; единую классификацию ситуаций на целях и проблемах соответственно куста СЦ и куста СП; семиотические модели логико-лингвистического типа рассуждений о целях и проблемах соответственно куста СЦ и куста СП; единая модель знаний четвертого уровня, включающая графосемантические модели представления СЦ и СП как конечных результатов анализа целей и проблем соответственно.

3. Единство семиотических методов анализа проблем и целей для сегмента производственной сферы: единый метод рассуждений о целях и проблемах соответственно в СЦ и СП (логико-лингвистическое моделирование целей и проблем); единый метод графосемантического представления СЦ и СП как результатов соответственно анализа целей и анализа проблем.

В соответствии с этими положениями в методике анализа проблем и целей производственной сферы выделены две группы процедур со следующими буквенно-цифровыми обозначениями (ПЦi, i = 1(1)9): процедуры лингвистического представления знаний о проблемах и целях: ПЦ1 — формирование словарей базовых семантических понятий, предметной области, используемых в формулировках проблем и целей; ПЦ2 — представление формулировок проблем и целей на соответствующих частично формальных языках проблем и целей; процедуры логического представления знаний об анализе проблем и целей: ПЦ3 — формирование тезаурусов базовых семантических отношений, определенных на элементах словарей базовых семантических понятий; ПЦ4 — преобразование проблем и целей из лингвистической формы

представления знаний в логическую и обратно; ПЦ5, …, ПЦ9 — формирование СП и СЦ, заключающаяся в анализе проблемы и формулировании подпроблем и анализе цели и полагании подцелей, логическая правильность которого обеспечивается рассуждениями (логико-лингвистическое моделирование) о проблемах и целях текущего куста СП и СЦ и соответствием формируемых указанным образом структур проблем и структур целей их логически корректным графосемантическим моделям.

2. Схема анализа проблем

Анализ проблем (процедуры П1—П9 [6]) реализуется по следующей схеме: *выявление и предварительный анализ проблем → формирование каталога проблем и анализ «причинно-следственных» связей между проблемами → формирование каузативных структур проблем → анализ каузативных структур проблем и определение главных проблем → анализ главных проблем и формирование структур проблем.*

Выполняемые по данной схеме действия и процедуры рассматриваются в докладе на примерах анализа проблем организационно-технических комплексов производственной сферы.

3. Схемы анализа целей

Анализ целей (процедуры Ц1—Ц9 [6]) реализуется по одной из следующих *СЦ-i*-х схем, $i = 1(1)3$.

СЦ-1: *формирование структуры целей по структуре проблем.*

По данной схеме формируют структуры целей СЦД, если число проблем в структурах проблем невелико и формулировки проблем явно выражают недостатки соответствующего сегмента производственной сферы. При этом получают структуры целей, изоморфные соответствующим структурам проблем, сформированным на этапе их анализа, а проблемы переформулируют в соответствующие цели способом «отрицания» проблем.

СЦ-2: *выдвижение главной цели, исходя из главной проблемы → анализ главной цели и формирование структуры целей.*

По данной схеме формируют структуры целей СЦД, если число проблем в структурах проблем невелико, но формулировки главных целей не могут быть получены способом «отрицания» проблем. В этом случае выдвигают главные цели, достижение которых обеспечит решение главных проблем, и, начиная с главных целей, формируют СЦ путем анализа целей и полагания подцелей.

СЦ-3: *выдвижение и предварительный анализ целей для решения проблем из соответствующей СП →формирование каталога целей и анализ «причинно-следственных» связей между целями → формирование каузативной структуры целей → анализ каузативной структуры целей и определение главной цели →анализ главной цели и формирование структуры целей.*

По данной схеме формируют структуры целей в наиболее сложных и неопределенных ситуациях.

Выполняемые по приведенным схемам действия и процедуры рассматриваются в докладе на примерах анализа целей организационно-технических комплексов производственной сферы.

Заключение

Рассмотренная методика анализа проблем и целей применялась: в управлении федеральным и региональными рыбохозяйственными комплексами [7—9] в проблемной ситуации, вызванной неудовлетворенным спросом на рыбопродукцию и корма для сельского хозяйства (в том числе для аквакультуры), резко обострившейся после введения в 2014 г. западными странами, включая страны ЕС, антироссийских санкций; в управлении водными биоресурсами [10]; в экологическом менеджменте [11; 12].

Методика анализа проблем и целей, внедренная совместно с регулятивными компонентами методологии формирования целей систем производственной сферы (конкретизированные системная парадигма и принципы системного анализа) в учебный процесс по шести направлениям бакалавриата и магистратуры, применяется для развития у студентов системного мышления [13], а результаты, полученные при ее использовании в процессе выполнения магистрантами курсовых работ по дисциплинам «Системный анализ в рыбохозяйственных исследованиях» и «Системный анализ в экологии» опубликованы в [10—12].

Важным преимуществом обсуждаемой методики анализа проблем и целей является возможность ее применения в интеллектуальной технологии, реализуемой с помощью программного средства поддержки анализа и синтеза СЦД [14]. Отметим, что автоматизированное формирование целей реализуется рядом других программных средств (результаты их анализа приведены в [6]). Наиболее мощные из них — интегрированные среды ARIS [15] и «Инталев: Навигатор» [16] = предназначены для формирования целей в процессе стратегического планирования. Однако соответствующие человекомашинные системы и аналогичные им не имеют подсистемы анализа проблем и формализованных логических фильтров, наличие которых в [14] обеспечивает объективирование формируемых экспертами и ЛПР (субъективных) структур проблем и структур целей, гарантируя тем самым их логическую корректность, полноту и согласованность.

Список литературы

1. Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник / под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова М. : Высш. шк., 2004.

2. *Зинько Д.П., Лукьянова Л.М.* Анализ методик выявления и структуризации проблем в сложных организационных системах // Труды XIII Междунар. НПК. «Системный анализ в проектировании и управлении» (СПб., 24—26 июня 2009 г.). СПб. : СПбПУ, 2009. С. 67—73.

3. *Лукьянова Л.М.* Теоретико-методологические основы структурно-целевого анализа и синтеза организационно-технических комплексов / С.-Петерб. ин-т информатики и автоматизации РАН. СПб. : Наука, 2006.

4. *Лукьянова Л.М.* Проблема несистемности решений по организационно-техническому комплексу и средства ее преодоления // Материалы 3-й Всерос. Поспеловской конференции с междунар. участием. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2016. С. 286—294.

5. *Лукьянова Л.М.* Методология автоматизированного формирования систем целей в производственной сфере // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1, № 3 (37). С. 124—129. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1515731972MITVOL37No3PART12017.pdf

6. *Лукьянова Л.М.* Методология автоматизированного формирования систем целей в производственной сфере : монография. Калининград : Изд-во КГТУ, 2017

7. *Лукьянова Л.М.* Аналитический отчет по проблемам и целям рыбохозяйственного комплекса Калининградской области // Проект «Создание университетской информационно-аналитической системы поддержки региональных социально-экономических исследований и ее внедрение в научную, образовательную и инновационную деятельность БФУ им. И. Канта (Этап 1)» Программы развития БФУ им. И. Канта на 2011—2020 годы. Калининград : БФУ им. И. Канта, 2014.

8. Лукьянова Л.М., Осадчий В.М., Саускан В.И. Пути реализации концепции устойчивого развития в рыбохозяйственном комплексе Калининградской области // Балтийский экономический журнал. 2014. № 2 (12). С. 101—112.

9. *Саускан В.И., Осадчий В.М., Лукьянова Л.М.* Пути развития отечественного рыболовства // Рыбное хозяйство. 2015. № 1. С. 3—8.

10. *Weldegiorgish T.K., Lukyanova L.M.* Problems and goals of the researching the population of the blue shark (prionace glauca) in Central Eastern Atlantic // Материалы VII Междунар. Балтийского морского форума [Электронный ресурс] (7—12 окт. 2019 г.). Т. 3. VII МНК «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов». Калининград : Изд-во БГАРФ, 2019. С. 190—197.

11. *Иванова К.В., Лукьянова Л.М.* Анализ проблем загрязнения окружающей среды предприятиями строительной сферы и целей для их решения // Балтийский экономический журнал. 2018. № 3 (23). С. 101—110.

12. *Лукьянова Л.М.* Анализ проблем и целей системы водоснабжения и водоотведения городского округа «Город Калининград» // Балтийский экономический журнал. 2018. № 4 (24). С. 115—128.

13. *Лукьянова Л.М.* Опыт разработки и использования технологии системного обучения в техническом университете // Известия БГАРФ. 2014. № 1 (10). С. 18—23.

14. *Лукьянова Л.М.* Программное средство «Анализ и синтез систем целедостижения»: свидетельство № ГР 2008614503 от 19.09.2008 [заявитель и правообладатель Л.М. Лукьянова] // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» : в 2 ч. М., 2008. Ч. 2, № 4 (65). С. 312.

15. *Инструментальное* средство стратегического планирования ARIS BSC // Интегрированная среда ARIS; официальный сайт компании IDS Sheer. URL: http://www.idsscheer.com/interna-tional/en.

16. *Программно-методический* комплекс автоматизации управления в организациях «Инталев: Навигатор» : электронный ресурс // Официальный сайт группы компаний «Инталев». URL: http://www.intalevna-vigator.ru/

Я. А. Неудахина[1], В. Б. Трофимов[2]
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия
e-mail: [1]yananeu@bk.ru, [2]trofimov_vbt@mail.ru

О ПРИМЕНЕНИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ

Введение

Задача прогнозирования — одна из самых актуальных в современной энергетике. От точности прогноза электропотребления объектов теплоснабжения зависит успешность деятельности энергетических компаний, которые заинтересованы в составлении достоверной заявки на потребление электроэнергии для осуществления экономически целесообразного расчета с поставщиками электроэнергии. Для прогнозирования временных рядов, представленных показаниями многотарифных электросчетчиков, предлагается использование искусственных нейронных сетей.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача прогнозирования объемов потребления электроэнергии на основе данных одной из московских теплоснабжающих организаций. Прогноз электропотребления для центральных тепловых пунктов (ЦТП), оснащенных автоматизированной системой коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), предлагается составлять с помощью нейросетевой модели прогнозирования временных рядов с учетом такого метеорологического фактора, как температура воздуха. Входные данные модели: помесячные показания приборов учета электроэнергии и соответствующая среднемесячная температура в Москве.

2. Описание системы учета электроэнергии

Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии представляет собой двухуровневую систему с выделенными распределенными функциями для каждого уровня (рис. 1).

Информационно-измерительный комплекс (ИИК) включает: многотарифные счетчики электрической энергии с возможностью хранения профиля нагрузки и журналов событий; трансформаторы тока и напряжения с соответствующим классом точности; каналообразующее оборудование (GSM-модем).

Преобразователь интерфейсов и реле времени встроены в модем с целью упрощения схемы организации канала передачи данных и снижения эксплуатационных затрат.

© Неудахина Я. А., Трофимов В. Б., 2020

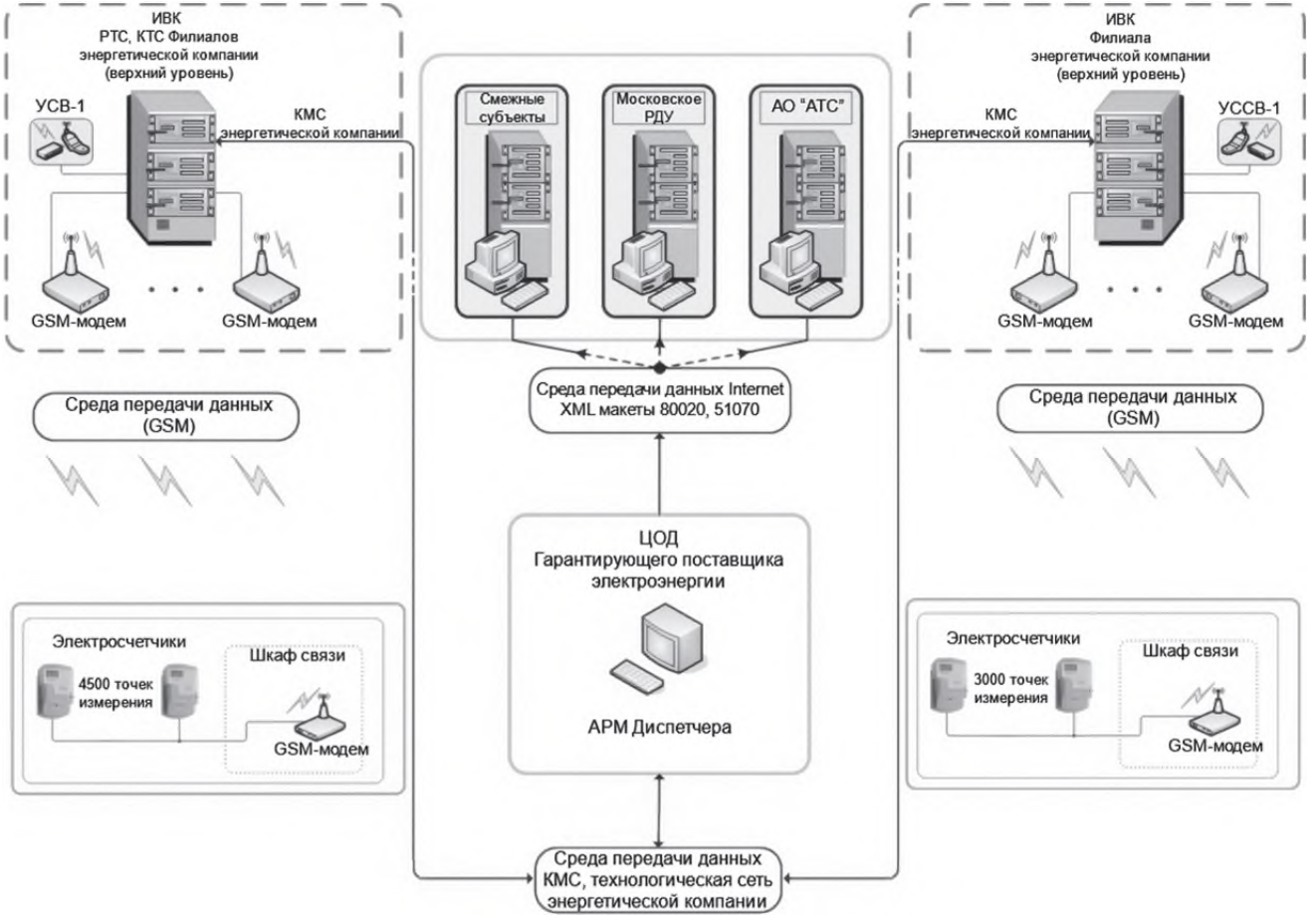


Рис. 1. Схема АСКУЭ

Информационно-вычислительный комплекс (ИВК) включает: сервера сбора, обработки и хранения данных АСКУЭ теплоэнергетических объектов теплоснабжающей организации; автоматизированное рабочее место (АРМ) для ежесуточного формирования и отправки данных коммерческому оператору, системному оператору (АО «СО ЕЭС») и смежным субъектам оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ); систему обеспечения единого времени (СОЕВ) вышеупомянутых АСКУЭ.

3. Типовые графики электропотребления

Электропотребление ЦТП имеет сезонный характер. Из графиков на рисунке 2 видно, что количество потребляемой тепловыми пунктами электроэнергии возрастает в зимний период, а спадает в летний сезон.

Рис. 2. Первичные данные, имеющие сезонный характер

На рисунке 3 приведены графики, не имеющие сезонного характера, но являющиеся близкими по структуре.

Рис. 3. Первичные данные, имеющие «ступенчатую» форму

Графики с резким скачком электропотребления представлены на рисунке 4.

Рис. 4. Первичные данные, имеющие скачок

Такие отклонения графиков потребления электроэнергии могут быть обусловлены колебаниями метеофакторов [1—4], а также аномалиями в работе оборудования ЦТП (рис. 4, 5).

Рис. 5. Первичные данные, имеющие равномерный тренд

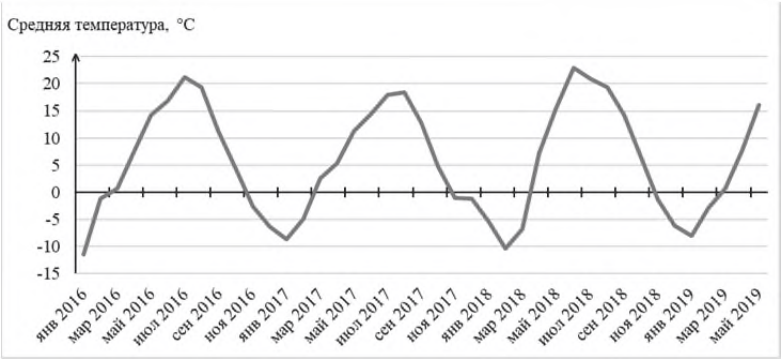


Рис. 6. Среднемесячная температура в Москве (внешний фактор)

4. Формирование обучающей выборки

Для временных рядов ЦТП с сезонной составляющей электропотребления формируются обучающие выборки для «зимнего» (октябрь — апрель) и «летнего» (май — сентябрь) периодов следующим способом: в табличном процессоре MS Excel в первый столбец таблицы вносятся значения исходного временного ряда данных, определяющего количество потребленной ЦТП электроэнергии по месяцам «зимнего» («летнего») периода; во второй столбец записываются средние температуры месяцев соответствующего года; значения электропотребления из первого столбца копируются в следующий столбец; в полученном третьем столбце производится сдвиг значений на k ячеек вверх (в работе $k = 1$, так как прогноз составляется на один месяц вперед); удаляются последние элементы каждого (кроме последнего) столбца, соответствующие строкам с пустыми ячейками (рис. 7).

	A	B	C	D
1	ЦТП №9274			
2	*Зимний сезон*	input		output
3	Month	Actual consumptio	Average temp	Forecast
4	янв 2016	10,504	-11,41	9,825
5	фев 2016	9,825	-1,18	10,501
6	мар 2016	10,501	0,65	10,158
7	апр 2016	10,158	7,54	10,429
8	окт 2016	10,429	4,2	10,225
9	ноя 2016	10,225	-2,57	10,518
10	дек 2016	10,518	-6,24	10,461

Рис. 7. Фрагмент обучающей выборки для «зимнего» сезона

В качестве входных переменных выступают текущие показания электропотребления и средние температуры соответствующих месяцев, а целевой вектор, представляющий собой требуемый выход — это значения фактического потребления электроэнергии в следующем месяце.

5. Выбор архитектуры ИНС

С помощью нейросетевого программного пакета «STATISTICA Neural Networks» построена нейросетевая модель — многослойный перцептрон (MLP), структура которого представлена на рисунке 8.

Предложенная модель состоит из двух входных нейронов, распределяющих входные сигналы на входы нейронов промежуточного слоя сети, пяти нейронов скрытого (промежуточного) слоя, выполняющих обработку входных сигналов, и одного выходного нейрона, который формирует отклик сети на входное воздействие, т. е. выдает прогноз.

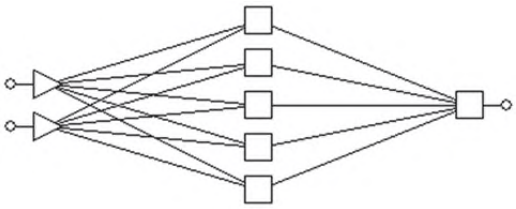


Рис. 8. Структура MLP

В качестве функции активации нейронов сети выбрана униполярная (логистическая) функция, область значений которой (0, 1). Вид функции:

$$f(v_i) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta v_i)},$$

где v_i — постсинаптический потенциал нейрона; β — настроечный параметр ($\beta = 1$).

6. Результаты

После настройки многослойного перцептрона на данных из обучающей выборки «зимнего» сезона по методу обратного распространения ошибки получена нейросетевая прогнозная модель, качество которой оценили по диаграмме рассеяния (рис. 9).

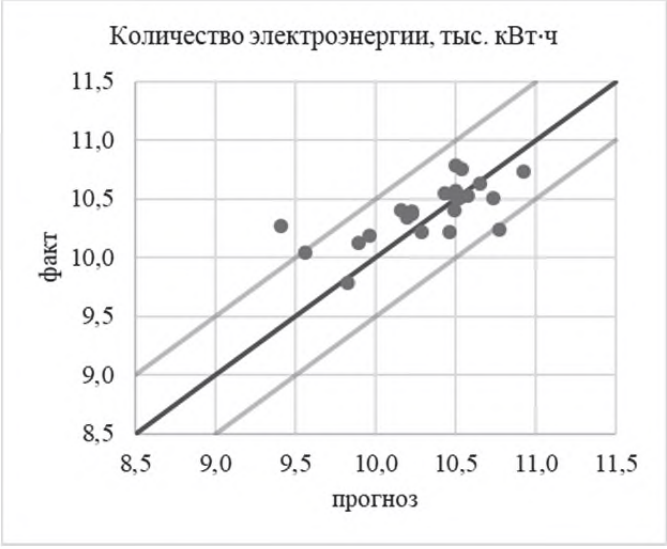


Рис. 9. Диаграмма рассеяния обученной нейросети

Из диаграммы видно, что почти все отклонения прогнозных значений от измеренных значений временного ряда находятся внутри доверительного интервала.

Прогнозные и измеренные значения потребления электроэнергии представлены на рисунке 10.

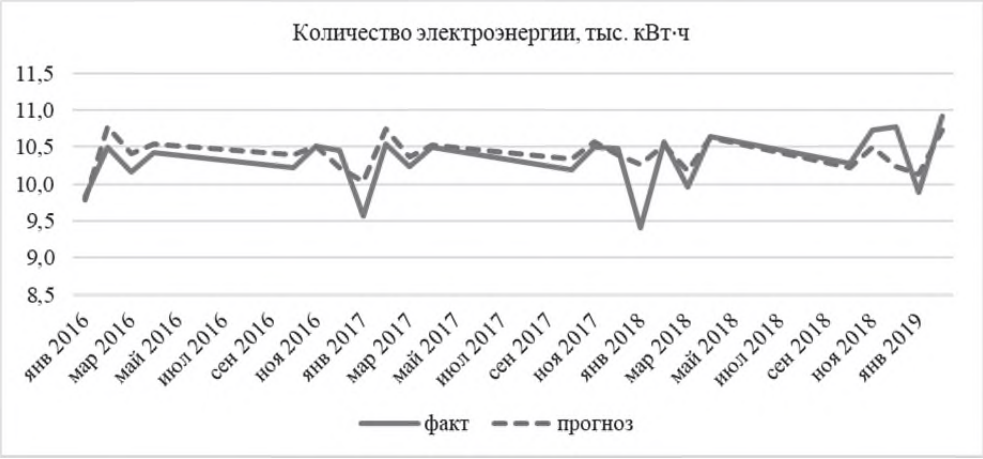


Рис. 10. Прогнозные и измеренные значения потребления электроэнергии

Визуальный анализ совмещенных графиков реального временного ряда и временного ряда, сформированного моделью, позволяет сделать вывод о высокой аппроксимирующей способности полученной нейросетевой модели.

Для исследования созданной модели сеть была настроена на обучающей выборке, проверена на верификационной выборке. Training Error Graph приведен на рисунке 11.

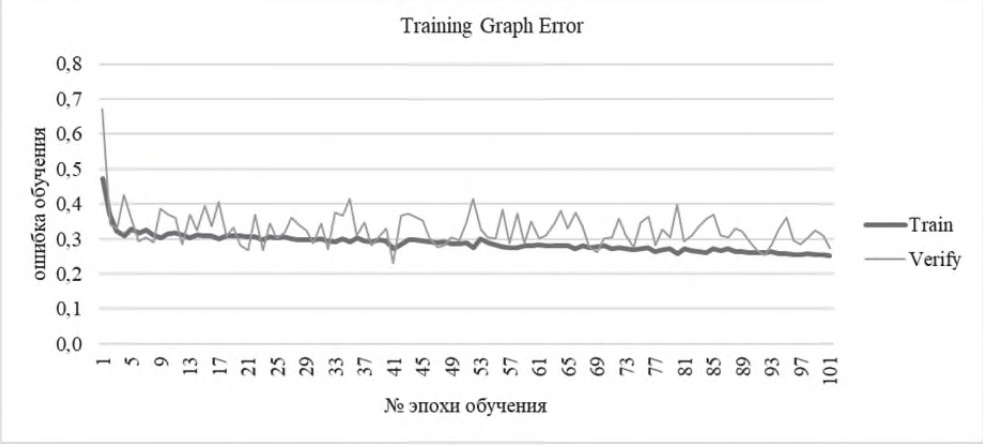


Рис. 11. Training Error Graph

Для разработки многовариантного прогнозатора [6; 7] было сделано три копии многослойного перцептрона, каждая из которых обучена с разными начальными условиями (первоначальные значения весовых коэффициентов генерировались случайным образом). Многовариантный прогноз потребления электроэнергии ЦТП № 9274 на апрель 2019 г. представлен на рисунке 12, *а*, а усредненный — на рисунке 12, *б*.

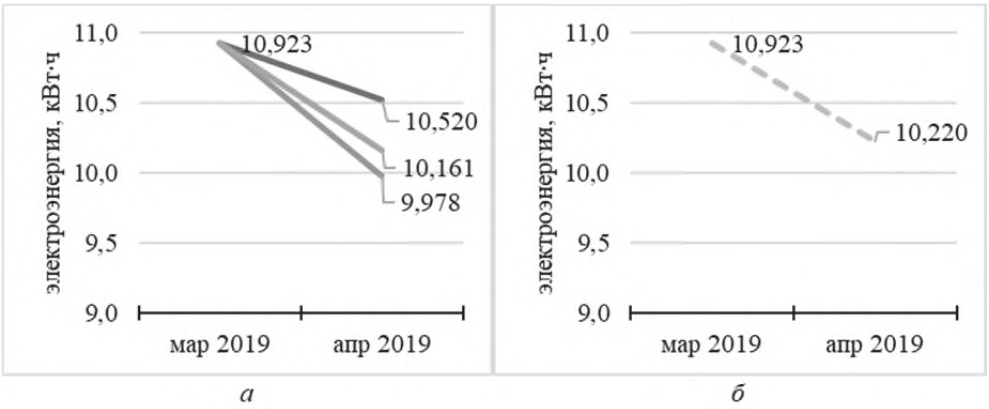


Рис. 12. Результат многовариантного прогноза (*а*) и усредненный прогноз (*б*)

Для повышения точности прогнозирования рекомендуется также учитывать предысторию первичных данных.

Заключение

Искусственные нейронные сети обладают большим потенциалом для применения их как средства прогнозирования в энергетической отрасли. Среди достоинств ИНС могут быть названы [8; 9]: 1) большое количество входных элементов для учета внешних воздействий нестационарных процессов; 2) способность к самообучению; 3) способность к воссозданию нелинейных и сложных зависимостей; 4) способность к обобщению; 5) высокая надежность; 6) хорошая работа с временными рядами, где невелик интервал наблюдений; 7) отсутствие ограничений на входные переменные (например, как они должны быть распределены).

Список литературы

1. *Кирпичникова И.М., Саплин Л.А., Соломахо К.Л.* Прогнозирование объемов потребления электроэнергии. URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/handle/0001.74/4942

2. *Соловьева И.А., Дзюба А.П.* Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды // Научный диалог. 2013. № 7 (19). С. 97—113. URL: http://nauka-dialog.ru/assets/userfiles/1579/Solov'eva_Dzyuba.pdf

3. *Биятто Е.В., Шарманова Г.Ю., Привалихина К.К.* Зависимость электропотребления от влияния различных факторов. Анализ потребления электроэнергии по ОЭС и энергосистемам 2012—2014 гг. // Молодой ученый. 2015. №6. С. 126—129.

4. *Томбасова А.А.* Оценка зависимости режима электропотребления от влияния различных факторов // Молодежь и наука: сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию первого полета человека в космос. Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2011. URL: http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/5142.

5. *Kazakidis, Stelios & Kokkosis, Apostolos & Moustris, Kostas & Paliatsos, Athanasios*. Electricity Consumption Prognosis with the Combination of Smart Metering and Artificial Neural Networks. IET Conference Publications. 2012.

6. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. М. : Горячая линия — Телеком, 2017.

7. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. М. : Финансы и статистика, 2003.

8. *Кулаков С.М., Бондарь Н.Ф., Трофимов В.Б.* Принцип управления с прогнозированием: подходы к реализации и структуры систем: препринт. Новокузнецк : СибГИУ, 2005.

9. *Трофимов В.Б., Кулаков С.М.* Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами : учебно-практическое пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2016.

М.А. Никитина
ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Москва, Россия
e-mail: nikitinama@yandex.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ МЯСНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АГЕНТНЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Введение

Проблемы повышения конкурентоспособности и гарантированного обеспечения качества и безопасности отечественных продуктов питания в настоящее время выходят на первый план. Трудность решения этих проблем обусловлена тем, что большинство выпускаемых пищевых продуктов представляют собой сложные и неоднородные многокомпонентные смеси, состояние и возможность идентификации компонентов которых зависит от многих факторов (качества сырья, режимов работы оборудования, физико-химических, структурно-механических, реологических свойств и т.д.). Следует отметить и высокую динамику изменения показателей состава и качества поступающего в переработку сырья. В этих условиях традиционные подходы к входному контролю на предприятиях пищевой промышленности неэффективны.

Интеллектуальные системы — ключевые технологии XXI века и применяются во всех социально значимых областях человеческой деятельности, поскольку их качественно новые возможности позволяют значительно повы-

© Никитина М.А., 2020

сить эффективность использования вычислительной техники в традиционных сферах ее применения за счет решения новых классов задач с применением методов и средств искусственного интеллекта.

Важное свойство нейронных сетей при решении прикладных задач — способность к обучению и к обобщению полученных знаний [1]. Натренированная на ограниченном множестве обучающих выборок нейронная сеть обобщает накопленную информацию и вырабатывает ожидаемую реакцию применительно к данным, не обрабатывавшимся в процессе обучения. На сегодняшний день аппараты искусственных НС и методы их применения активно развиваются и совершенствуются.

Одно из наиболее распространенных применений нейросетевых технологий в настоящее время — обработка изображений в медицине. Так, например, разработчики Стэнфордского университета (www.stanford.edu) — коллектив ученых факультетов информатики, медицинского и радиологии представили крупномасштабную базу данных скелетно-мышечных рентгенограмм — MURA [10], содержащую более 40 тысяч рентгеновских снимков поврежденных конечностей, полученных в ходе 14982 исследований, где результат каждого исследования был вручную помечен радиологами как «нормальный» или «ненормальный (паталогический)». На основе этого набора данных обучена 169-слойная сверточная нейронная сеть для выявления и локализации аномалии. Другой пример: компания Verily Life Sciences (холдинг Alphabet) разработала алгоритм, который определяет возраст, пол и различные медицинские показания (например, уровень артериального давления или индекс массы тела) пациентов по анализу их сетчатки [9]. Такой метод диагностики может помочь в прогнозировании сердечно-сосудистых заболеваний. Для обучения алгоритма ученые использовали 284335 изображений сетчатки, соотнесенных с несколькими показателями: пол, возраст, артериальное давление, индекс массы тела и гликированный гемоглобин — биохимический показатель, отражающий среднее содержание глюкозы в крови за длительный период (до трех мес). Также использовали данные курит ли человек и данные о развитии сердечно-сосудистых заболеваний в течение пяти лет после первоначального сбора данных. Разработанный классификатор протестировали на двух независимых базах данных (12026 и 999 участников). Ученым удалось эффективно предсказать биологические показатели участников и определить риск развития сердечно-сосудистых заболеваний с точностью в 70 %.

Разработка и внедрение нейросетевой технологии позволит в реальном времени контролировать микроструктурные показатели качества перерабатываемого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции (как при экспертизе контролирующими организациями, так и на предприятиях), увеличить в десятки раз объемы проводимых исследований, а следовательно, обеспечить стабильность производства пищевой продукции; существенно уменьшить уровень брака и фальсификаций, снизить потери рабочего времени, сырья и энергии и повысить качество готовой продукции.

Цель настоящей работы — показать методологию разработки самообучающего интеллектуального агента, способного идентифицировать текущую

ситуацию при неполной и нечеткой информации и принимать адекватные решения по их нормализации в реальном времени в оценке основных микроструктурных характеристик.

Материалы и методы

Материалом послужили гистологические препараты растительных компонентов белковой и углеводной природы, а также образцы мясного сырья и готовых мясных продуктов. Изображения получались с применением системы анализа изображений «AxioVision 4.7.1.0» (Carl Zeiss, Германия) с помощью подключенной видеокамеры «AxioCam MRc 5».

1. Агентно-ориентированная ситуационная модель мясной системы в условиях неопределенности

Идентификация состояния сложной мясной системы[1] в реальном времени в условиях неопределенности и риска принятия решения, при недостаточной и нечеткой информации требует интеллектуализации *микроструктурного анализа* на основе методов искусственного интеллекта с использованием агентных и нейросетевых технологий.

При этом интеллектуальная функция обучающегося интеллектуального агента (ИА) и нейросетевого модуля заключается в уточнении и коррекции первоначально установленных характеристик связей между контролируемыми параметрами состояния и цели, а также распознавании и классификации аномальных ситуаций в системе с накоплением достоверных количественных и качественных оценок, по которым формируется *ситуационный классификатор* (*продукционные правила идентификации неизвестного объекта в гистологическом срезе*) и база знаний системы.

Для нахождения основных микроструктурных характеристик (параметры классификации/ситуационный классификатор) идентификации, на примере растительных компонентов в составе мясного сырья и готовых продуктов была разработана структура единой информационной базы данных (БД) гистологических срезов различного вида мясного сырья [7; 8].

В данной предметной области Сущность — компонент белковой или растительной природы, например соевый изолированный белок, соевый концентрат и т. д. Атрибут — данные, описывающие свойства/признаки Сущности: форма частиц, размер, наличие фрагментов боба сои, тинкториальные свойства.

Как известно, в ИНС применяется парадигма параллельных вычислений при реализации механизма логического вывода < *if* X, *then* Y, *else* Y > предполагает использование различных моделей приближенных рассуждений. Взаимодействие правил в продукционной системе — фундаментальное понятие параллельной обработки.

[1] Мясная система – это сложная система, комплекс тканей и клеток, различающихся структурой, химическим составом или функциональностью.

В связи с этим составлены продукционные правила идентификации неизвестного объекта на гистологическом препарате (рис. 1). Например, *если* частицы округлые, с отверстиями внутри, имеют гомогенную стенку, форму бублика, гантели или цветка, *то* — соевый изолированный белок.

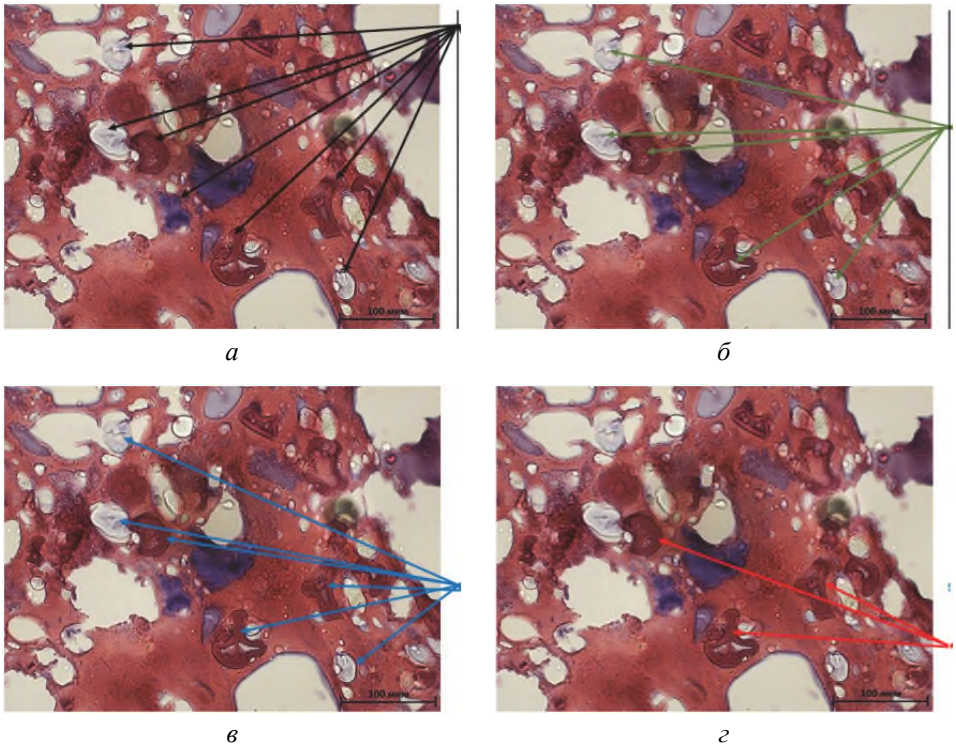


Рис. 1. Идентификации неизвестного объекта на гистологическом препарате:
а — частицы округлые/форма бублика/гантели, из них *б* — имеют отверстия внутри частиц из них *в* — имеют размер 10—110 мкм, из них *г* — окраска в розовый/красный цвет

Обучаемые и самообучающиеся интеллектуальные агенты, способны накапливать знания на основе текущих данных и онтологии событий в процессе взаимодействия с другими агентами и окружающей средой, адаптироваться к ситуации, выбирать стратегию достижения выбранной цели и оценивать степень ее достижения.

Общий алгоритм поведения интеллектуального агента [6; 12; 13] включает идентификацию ситуации, оценку собственного состояния и коррекцию цели с последующей рефлексивной реакцией или осмысленным (интеллектуальным) принятием решения в направлении достижения цели.

Параметрическое описание агента включает базу знаний и множество целей в определенной области, векторы переменных его состояния; описание связей между агентами и влияния внешней среды, банк моделей и стратегий поведения агентов.

Алгоритм идентификации при малом размере обучающей выборки с декларируемым множеством контролируемых параметров описывает распознавание агентом текущего состояния мясной системы в реальном времени с предварительной классификацией ситуаций на основе предъявления текущих состояний системы по принадлежности к определенным кластерам принятия решения.

Для этого предлагается разновидность архитектуры сверточной нейросети (ИНС) [2; 3], так как они обеспечивают частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и прочим искажениям.

2. Алгоритм нейросетевого обучения агента распознаванию ситуаций

Задача обучения агента распознаванию ситуаций на основе обучающей выборки с предъявлением входных векторов переменных состояния системы (образов) в ситуациях, относящихся к определенным кластерам, связана с построением разделяющей функции $y = f(x_1,...,x_n)$, где $\{x_1,...,x_n\}$ — n-мерный параметрический вектор ситуации, а y — величина, принадлежности к определенному кластеру.

Обучающие выборки составляются из параметрических векторов аномальных ситуаций на основе структурно-параметрической ситуационной модели системы (СПСМ) и алгоритма причинно-следственной идентификации в условиях определенности [4].

Нейросетевая структура обучения интеллектуального агента в упрощенном варианте с входным, скрытым и выходным слоями показана на рисунке 2.

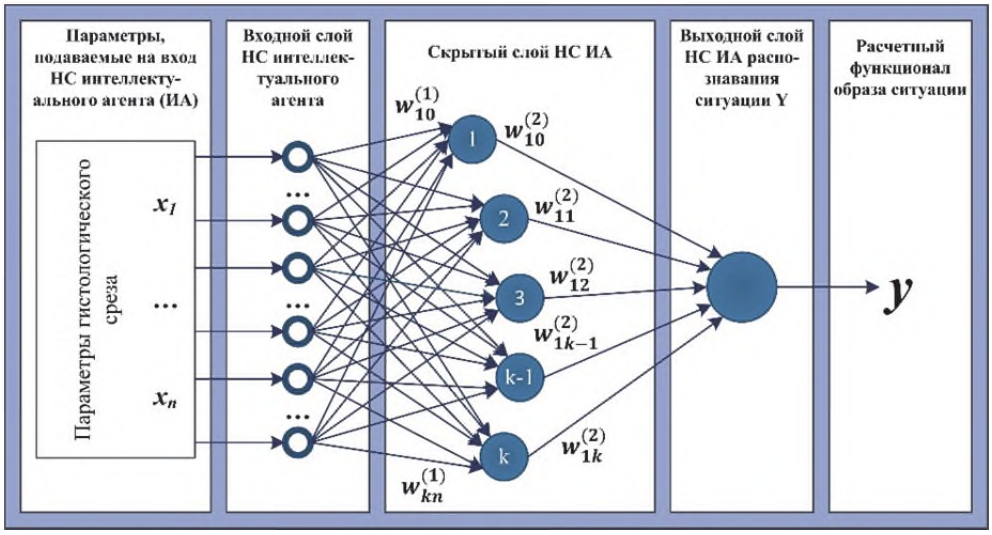


Рис. 2. Нейросетевая структура обучения интеллектуального агента

На входы сети поступают значения *n* компонентов вектора текущей ситуации $x_1,...,x_n$, и задача сети заключается в итерационном подборе значений весов $w_{1j}^{(1)}$ и $w_{ij}^{(2)}$ для элементов всех слоев сети так, чтобы при заданном входном векторе параметров $\{x_1,...,x_n\}$ сигнал на выходе сети с приемлемой точностью совпадал с тестовым вектором *y* по критерию наименьших квадратов разностей между входным и эталонным векторами обучающих выборок.

В восприятии агента выходной сигнал *i*-го нейрона сверточного слоя имеет вид

$$y_k^{(i,j)} = b_k + \sum_{s=1}^{K}\sum_{t=1}^{K} w_{kst} x^{((i-1)+s,(j+t))},$$

где $y_k^{(i,j)}$ — нейрон *k*-й плоскости сверточного слоя; b_k — нейронное смещение *k*-й плоскости; *K* — размер рецептивной области нейрона; w_{kst} — матрица синаптических коэффициентов; *x* — выходы нейронов предыдущего слоя.

Формула функционирования нейрона подвыборочного слоя

$$y_k^{(i,j)} = b_k + \frac{1}{4} w_k \sum_{s=1}^{2}\sum_{t=1}^{2} x^{((i,j)+s,(i,j))}.$$

Применяется стандартный для нейронных сетей алгоритм обратного распространения ошибки. Для измерения качества распознавания использовалась функция среднеквадратической ошибки:

$$E_p = \frac{1}{2}\sum_j \left(t_{pj} - o_{pj}\right)^2,$$

где E_p — величина функции ошибки для объекта *p*; t_{pj} — желаемый выход нейрона *j* для объекта *p*; o_{pj} — действительный выход нейрона *j* для объекта *p*.

Окончательная коррекция синаптических коэффициентов происходит по формуле

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta\delta_{pj}o_{pj},$$

где η — коэффициент пропорциональности, влияющий на скорость обучения.

На каждой итерации алгоритм обратного распространения ошибки рассчитывается для всего обучающего набора данных, чтобы вычислить средний и истинный градиент.

Полный алгоритм нейросетевого обучения интеллектуального агента состоит из следующих этапов.

1. Агент в режиме наблюдения воспринимает вектор сигналов текущей ситуации в одном из возможных образов и рассчитывает значения *i*-го выхода *n*-го слоя.

2. Вычисление ошибки $\delta^{(N)}$ в оценке образа текущей *k*-й ситуации *Y* в выходном, *N*-м слое своей НС по формуле

$$\delta_l^{(N)} = (Y - d_k)\frac{dY}{dy_i^{(n-1)}}$$

с коррекцией весов его входов $w^{(N-1)}$ как

$$w_i^{(N-1)} = w_i^{(N-1)} + \Delta w_i^{(N-1)},$$

где $\Delta w_{1i}^{(N-1)} = -\eta\delta_l^{(2)} y_i$; η — коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

3. Если ошибка существенна, следует возврат к первому шагу, в противном случае агент может считаться обученным.

Обученная сеть перед началом функционирования проверяется на качество обучения с проверкой на допустимую погрешность при подаче на вход сети выборки с заранее известными значениями выходных параметров, но отличной от обучающей выборки. Обучение интеллектуального агента, основанное на работе ИНС, позволяет обеспечить необходимую точность в оценке влияния каждого параметра микроструктуры на качество мясной системы и принятие решения в реальном времени.

3. Агентная технология ситуационного моделирования мясных систем в условиях неопределенности

Практическая реализация агентных технологий связана с описанием переменных состояний агента и динамики его поведения на специализированном агентно-ориентированном языке в имитационной системе со средой экспериментирования, комплексом программ имитации и программными средствами организации эксперимента [5; 11].

Общий алгоритм поведения интеллектуального агента включает идентификацию ситуации, оценку собственного состояния и коррекцию цели с последующей рефлексией реакций или осмысленным (интеллектуальным) принятием решения в направлении достижения цели. Критерием интеллектуальности агента является степень полноты и глубины априорных знаний, стратегий обучения и алгоритмов принятия решения в условиях неопределенности, риска и конфликта.

Каждой операции соответствует свой алгоритмический и программный модуль, обеспечивающий: восприятие информации и накопление знаний об окружающей среде и среде взаимодействия или конфликта (сенсорный модуль); механизм взаимодействия и обработки данных от контрагентов; анализ собственного состояния и состояния контрагентов с выбором или коррекцией целевых функций (интеллектуальный модуль); принятие автономных решений и выбор стратегий.

Поведение агента можно представить некоторой рекурсивной формой, описывающей нахождение и выбор на очередном шаге функции перехода от исходного состояния к новому состоянию в направлении улучшения целевой функции.

Подобная задача в отдельных случаях может быть решена методом математического программирования с коррекцией целевой функции и индивидуальных ограничений на очередном шаге изменения состояния агента в зависимости от ситуации и приближения к цели в условиях неопределенности и нечеткой информации.

Заключение

Разработана многоагентная методология ситуационного моделирования мясных систем в условиях неопределенности при создании интеллектуальных систем на перерабатывающих предприятиях агропромышленного комплекса. Методология посредством интеграции на концептуальном уровне обеспечивает сокращение длительности цикла «входной контроль качества сырья» за счет минимизации потерь при работе специалиста-гистолога, а также повысит объективность получаемых результатов, качество и эргономику работы.

Статья опубликована в рамках выполнения темы НИР № 0585-2019-0007 государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Список литературы

1. *Горбань А. Н.* Нейроинформатика: кто мы, куда мы идем, как путь наш измерить // Вычислительные технологии. 2000. № 4. С. 10—14.

2. *Еремин Д. М., Гарцев И. Б.* Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления. М. : МИРЭА, 2004.

3. *Yu N., Notkin B. S., Sedov V. A.* Neuro-iterative algorithm of tomographic reconstruction of the distributed physical fields in the fibreoptic measuring system // Computer optic. 2009. Vol. 33 (4). P. 446—455.

4. *Ивашкин Ю. А.* Структурно-параметрическое моделирование и идентификация аномальных ситуаций в сложных технологических системах // Проблемы управления. 2004. № 3. С. 39—42.

5. *Карпов Ю. Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб. : БХВ-С.-Петербург, 2005.

6. *Kennedy W. G.* Modelling Human Behaviour in Agent-Based Models // Agent-based Models of Geographical Systems. Springer, New York, NY. 2011.

7. *Никитина М. А., Чернуха И. М., Пчелкина В. А.* Интеллектуальные решения при анализе видеоизображений // Все о мясе. 2019. № 4. С. 52—56.

8. *Nikitina M. A., Chernukha, I. M., Pchelkina V. A.* Artificial neural network technologies as a tool to histological preparation analysis // 60th International Meat Industry Conference, MEATCON 2019. Mt. Kopaonik, Serbia 22—25 September 2019. Код 153290. Vol. 333. Iss. 1.

9. *Poplin R. et al.* Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning // Nature Biomedical Engineering. 2018. no. 2. P. 158—164.

10. *Rajpurkar P. et al.* MURA: Large Dataset for Abnormality Detection in Musculoskeletal Radiographs // 1st Conference on Medical Imaging with Deep Learning. 2018. 4—6 July. Amsterdam. Netherlands. arXiv:1712.06957v4 22 May 2018.

11. *Schmidt B.* The Art of Modelling and Simulation. SCS-Europe BVBA, Chent : Belgium, 2001.

12. *Schmidt B.* A The Modelling of Human Behaviour: The PECS Reference Model // Proceedings 14th European Simulation Symposium. 2002. 23—26 October. Dresden. Germany.

13. *Stanilov K.* Space in Agent-Based Models // Agent-based Models of Geographical Systems. Springer, New York, NY. 2012.

В.В. Ничепорчук

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия

e-mail: valera@icm.krasn.ru

РЕСУРСЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Введение

Один из ожидаемых результатов политики цифровизации экономики России — повышение защищенности населения и территорий, создание системы управления рисками на основе современных технологий интеллектуальной поддержки управления [1]. Эти технологии активно встраиваются в аппаратно-программные комплексы, такие как «Безопасный город», Центры обеспечения вызовов экстренных служб, автоматизированные системы управления технологическими процессами промышленных предприятий [2]. Такие системы, формирующие большие данные, становятся ядром ситуационных центров управления органов власти и крупных корпораций.

Профессором Г.Г. Малинецким (ИПМ РАН им. Келдыша) с соавторами предложена концепция распределенных ситуационных центров, основанная на интеграции междисциплинарных исследований и информационных систем различных уровней управления для обеспечения национальной безопасности и стратегического планирования [3]. Предусмотрена возможность коллективного формирования и согласования решений, планов, в том числе в авральном режиме, на основе технологий коллективного интеллекта, дополненной и виртуальной реальности, комплексного мониторинга по широкому спектру факторов. Парадигма когнитивной семантики прорывных ситуационных решений позволяет помимо нивелирования угроз сделать акцент на выявлении внешних возможностей, умножении их сильных сторон, поиске неожиданных и оригинальных решений. Авторы считают, что для этого необходима пере-

© Ничепорчук В.В., 2020

ориентация с анализа данных на задачи синтеза решений, преодоление фрагментарности распределенного информационного фонда. Создание инструментальной среды включает логико-аналитическую обработку компьютерных массивов данных, включая аспекты статистики, BigData анализа, инженерию знаний; человеко-машинное взаимодействие с учетом мыследеятельности человека.

Решению задач формализации процессов принятия решений в чрезвычайных ситуациях посвящено значительное количество работ. И. У. Ямаловым на примере химических аварий апробировано использование нечетких когнитивных карт [4]. Профессор В. В. Кульба с соавторами [5] предложили описание развития ЧС с использованием сетей Петри.

Процессы подготовки и принятия решений в органах управления МЧС России регламентируются приказами и методическими рекомендациями [6]. Состав донесений и распоряжений ориентирован на максимально детальное описание события или складывающейся обстановки. При этом форма представления и структура документов допускают неоднозначную интерпретацию, что способствует росту объемов неформализованных данных. Неформализованный вид описаний характеристик объектов и событий, ранее принятых решений и их результатов затрудняет автоматизацию информационной поддержки управления обеспечением природно-техногенной безопасности, снижает эффективность функционирования территориальных управляющих систем.

Анализ программных продуктов, реализующих ситуационное управление, обработку данных мониторинга опасностей показывает актуальность разработки интеллектуальных систем полномасштабной поддержки управления. Изучение опыта управления ликвидацией ЧС показывает, что, несмотря на их уникальность, возможно детерминированное описание действий всех участников и сохранение описаний проведения аварийно-спасательных работ и сопутствующих мероприятий в формализованном виде.

Модель информационной поддержки управления

Создание тиражируемых прикладных информационно-аналитических систем формирования решений предваряется разработкой системной модели поддержки управления природно-техногенной безопасностью [7]. Представим модель M в виде

$$M = <T, H, R, IT, Y>,$$

где T — задачи управления; H — виды опасных ситуаций; R — информационные ресурсы; IT — информационные технологии; Y — представления решений для поддержки управления. Перечисленные элементы модели детализируются в виде множеств.

Множество задач управления безопасностью $T=\{t_1,.., t_5\}$ включает: t_1 — оперативная идентификация опасностей и угроз, t_2 — формирование возмож-

ных сценариев опасных ситуаций, t_3 — ликвидация опасных ситуаций, t_4 — проведение мероприятий защиты, t_5 — комплексное оценивание рисков территорий.

Информационные ресурсы R в модели описываются двумя подмножествами S, D, где S — виды информационных ресурсов, применяющихся для информационной поддержки управления природно-техногенной безопасностью территорий, отражающие понятийный аппарат лиц, принимающих решения (сведения); D — виды информационных ресурсов, использующихся при построении информационно-аналитических систем поддержки управления (данные). Множество $S = O_1 \cup O_2 \cup O_3 \cup E$, где O_1 — характеристики потенциальных источников опасностей, используемые в качестве входных параметров расчетных методик, O_2 — защищаемые объекты, O_3 — объекты управления (характеристики формирований, техники и ресурсов), E — характеристики опасных событий, используемые при формировании сценариев ситуаций. Данное разделение условно и может изменяться при моделировании конкретной ситуации. Множество $D = \{d_1, \ldots, d_5\}$, где d_1 — системообразующие элементы (справочники, классификаторы); d_2 — данные мониторинга обстановки; d_3 — характеристики объектов, изменяющих состояние в опасной ситуации; d_4 — пространственные данные; d_5 — базы знаний, на основании которых формируются сценарии ситуаций. Типовая структура элементов множеств S, D разработана с использованием нотаций UML. На основе описания структуры информационных ресурсов спроектировано и наполнено хранилище данных интеллектуальной системы.

Остановимся подробнее на описании баз знаний. Их структура в обобщенном виде отражает представление многоуровневой агрегированной модели знаний, применяющейся в процессе решения задач управления и описанной в [8; 9]. Базы знаний представлены множеством $d_5 = <$ *frames, rules, models, solver, interfaces, thesaurus, decisions* $>$, где *frames* — база фреймов, представляющих возможные сценарии развития и ликвидации ЧС; *rules* — база правил типа «condition-action-rules»; *models* — библиотека расчетных моделей развития ЧС; *solver* — решатель — машина логического вывода; *interfaces* — библиотека интерфейсов базы знаний; *thesaurus* — словарь, описывающий фактовые переменные и их свойства; *decisions* — база проектов решений. Фреймы используются для представления сценариев возникновения и развития ситуаций; правила представляют события, действия и условия их выполнения. Правила могут использоваться в качестве присоединенных процедур во фреймах. Решатель выполняет интерпретацию расчетных и интерфейсных процедур и реализует стратегию вывода путем выбора по заданным критериям предпочтительного правила или процедуры из числа применимых в текущей ситуации. Реализация структуры d_5 в хранилище представлена в виде логически связанных таблиц.

Сложность и многообразие задач информационной поддержки управления T приводит к необходимости использования различных информационных

технологий $IT = \{it_1, \ldots, it_6\}$, где it_1 — технология хранилищ данных; it_2 — технология ведения справочников и классификаторов; it_3 — геоинформационная технология; it_4 — технологии аналитической обработки данных, it_5 — интеллектуальные технологии, it_6 — веб-технологии.

Интеграция перечисленных технологий в управляющих системах позволяет синтезировать решения, согласующие действия специалистов, работу технических средств, относящихся к различных ведомствам, строить логистические схемы обеспечения материальными ресурсами. Актуализированные информационные ресурсы повышают содержательную эффективность решений в условиях дефицита времени, наличия неполной и нечеткой исходной информации, большой стоимости ошибок. Проектирование типовых сценариев развития ситуаций, планирование предпочтительных действий с привлечением экспертов разных сфер способствует выявлению слабых мест и неясностей в организации работ по ликвидации опасных ситуаций и проведению мероприятий защиты населения. Апробация сценариев ситуаций в ходе учений, учет влияния всех факторов ситуации в процессе «отладки» сценариев позволит упорядочить процесс подготовки к реагированию на ЧС.

Решения, формируемые в процессе функционирования интеллектуальной системы, можно представить в виде $Y = \{C, A, G, K\}$, где C — тексты рекомендаций; A — таблицы; G — графические представления; K — динамические карты, визуализирующие ситуации или распределение опасностей на контролируемой территории.

Элементы множеств системной модели могут дополняться по мере появления новых технологий обработки данных, видов информационных ресурсов, а также задач территориального управления.

Архитектура интеллектуальной системы

На основе системной модели поддержки управления природно-техногенной безопасностью территорий разработана обобщенная архитектура, позволяющая создавать мультизадачные проблемно ориентированные интеллектуальные системы. С этой целью выполнена декомпозиция задач управления T в виде функциональных диаграмм, позволившая детально описать процессы трансформации информационных ресурсов с помощью технологий IT. Архитектура конкретизирует системную модель в виде описаний источников данных, блока консолидации информационных ресурсов, подсистем и сервисов обработки данных, человеко-машинных интерфейсов (рис.).

Источники данных и процессы консолидации описываются в соответствии с классификацией информационных ресурсов и информационных технологий, введенных в системной модели. Использование системообразующих ресурсов d_1 для обогащения данных мониторинга в процессе консолидации в хранилище дало возможность реализовать различные технологии аналитической обработки, такие как OLAP Data Mining и другие [10].

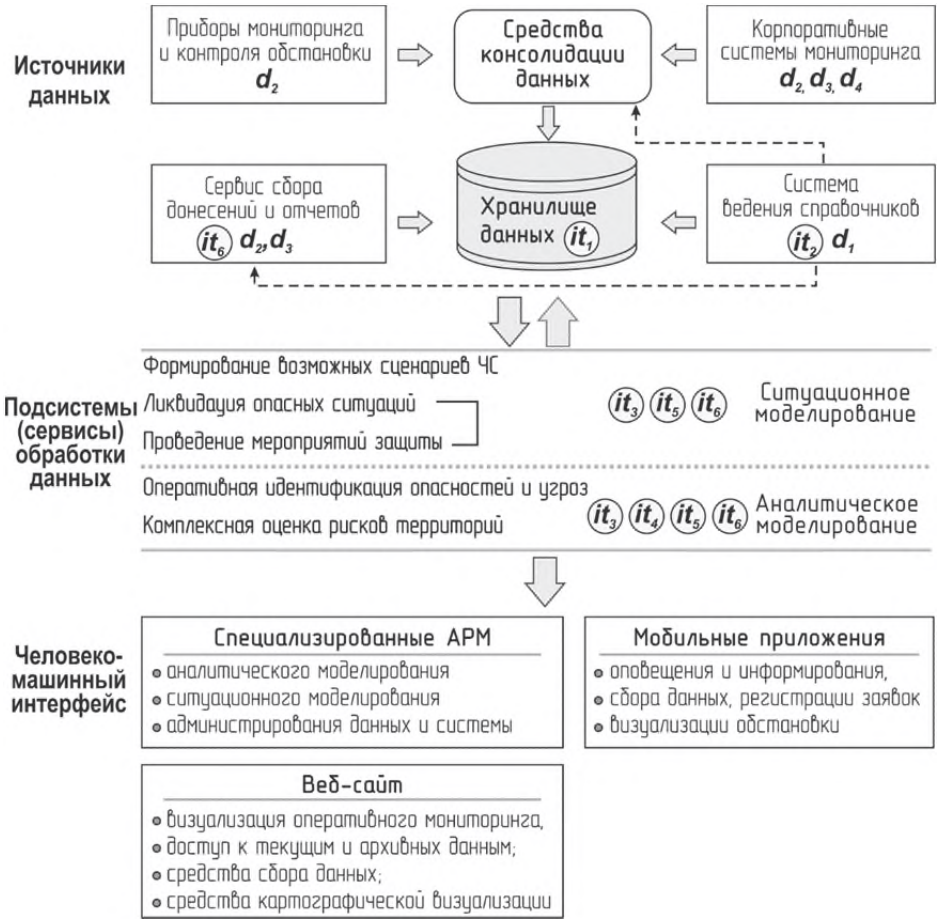


Рис. Архитектура интеллектуальной системы

Функционирование подсистем и сервисов обработки данных реализует два вида моделирования с динамической визуализацией результатов. *Аналитическое моделирование* применяется для решения задач оперативной идентификации опасностей и угроз t_1 и интегрального оценивания рисков территорий t_5. Построены OLAP-модели комплексной аналитической обработки для контроля состояния безопасности территорий, разработаны критерии обнаружения угроз, позволяющие реализовать метод раннего обнаружения предпосылок ЧС. Базы знаний d_5 используются для последующего формирования текстов оповещения и информирования руководящего состава и населения. Аналитические модели оценивания рисков описывают логические связи факторов опасностей O_1, их проявлений E, характеристики защищаемых объектов O_2 с содержанием и объемом предупредительных мероприятий. Значимость факторов рисков и приоритеты выполнения мероприятий определены путем опроса экспертов [11].

Ситуационное моделирование основывается на применении интеллектуальной технологии it_5, управляющей программными модулями и потоками данных в процессе логического вывода. Результаты моделирования отображаются на динамической оперативной карте K с помощью геоинформационной технологии it_3, а сопутствующая информация (элементы C, A, G) — с использованием веб-технологии it_6. Продукционно-фреймовый подход к организации баз знаний d_5 позволяет описать сценарии возникновения и развития ситуаций в объеме, необходимом и достаточном для руководства аварийно-спасательными формированиями. Получаемые рекомендации описывают выполнение мероприятий по ликвидации опасных факторов t_4 и проведение мероприятий защиты t_4, реализующихся параллельно. Создавать многоэтапные сценарии действий в ЧС t_2 предлагается с применением метода графического представления динамики ситуаций и их последствий, позволяющего как формировать новые сценарии действий, так и реконструировать уже произошедшие ЧС с последующем сохранением в базах знаний r_5 [12].

Человеко-машинные интерфейсы включают всё разнообразие доступа к информации для лиц, формирующих и принимающих управленческие решения, — настольные программные комплексы, веб-сайты и мобильные приложения.

Архитектура дает возможность определить функционал синтезируемой интеллектуальной системы и обосновать выбор программных компонентов и рациональных способов комплексного решения задач управления. Предусмотрена возможность масштабирования архитектуры, включая необходимые информационные ресурсы, технологии и программные модули, что позволяет адаптировать системы для разных уровней и задач управления. Конкретизация системной архитектуры для определенного вида опасных ситуаций дает возможность определить перечень информационных ресурсов, программных модулей, реализующих технологии аналитического и ситуационного моделирования для частных задач управления, а также средства визуализации, позволяющие представить описание ситуаций в объеме, необходимом в конкретный момент каждому специалисту, принимающему решения, от руководителя операции в целом до ответственного за отдельный участок работ.

Особенности использования интеллектуальной системы

Предложенные системная модель и обобщенная архитектура реализованы при построении интегрированной системы поддержки управления «ЭСПЛА-ПРО» [13]. Система используется в спасательных службах экстренного реагирования Красноярского края для *информационной поддержки управления*. Как показал опыт эксплуатации, узким местом остается актуализация информационных ресурсов, в том числе с использованием межведомственного информационного обмена. Если каталог чрезвычайных ситуаций и происшествий E и база данных сил и средств экстренного реагирования O_3 ведутся в

органах управления, обеспечивающих природно-техногенную безопасность территорий, то поддержание в актуализированном состоянии массивов сведений о защищаемых объектах O_2 возможно лишь с применением технологий распределенных реестров, облачного хранения данных, консолидирующих информацию отраслевых систем [14; 15].

После решения проблем поддержания информационных ресурсов с детализацией, достаточной для решения задач управления на местном и объектовом уровнях, возможен переход к массовому формированию информационных ресурсов более высокого порядка — баз знаний. Трансформация всех формализованных описаний динамики опасных ситуаций, действий по ликвидации и защите населения, опыт ликвидации которых может быть использован в будущем, должна реализовываться с применением дружелюбного интерфейса. В этом случае рост интеллектуализации решений, принимаемых в автоматизированном режиме, можно обеспечить не только эпизодической работой экспертов и инженеров по знаниям, но и формированием большой «обучающей» выборки, описывающей особенности действий в ЧС с учетом влияния негативных и благоприятных факторов. Формат хранения баз знаний r_5 должен позволять формировать решения по оперативному управлению на основе ситуации-аналога, использовать другие интеллектуальные технологии, например нейронные сети.

Применение интеллектуальных технологий в стратегическом управлении безопасностью территорий дает возможность сформировать несколько альтернативных решений с ранжированием их по приоритетам. Для решения этой задачи при участии автора разработана и эксплуатируется региональная система комплексного оперативного мониторинга, автоматизирующая процессы сбора, верификации и аналитической обработки данных о возможных угрозах опасных ситуаций, характеристиках объектов защиты и управления. Созданы региональные атласы рисков ЧС природного и техногенного характера, ведется работа по переводу их на геоинформационный веб-сервер.

Заключение

Предложен метод создания интеллектуальной системы поддержки управления природно-техногенной безопасностью территорий, основанный на интеграции различных информационных ресурсов и технологий. Теоретической основой метода являются системная модель информационной поддержки управления безопасностью территорий и обобщенная архитектура. Сценарный подход и формируемые с его использованием базы знаний планируется применять при разработке «динамических» планов действий по ликвидации ЧС с организацией взаимодействия формирований различных ведомств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций — РСЧС. Интеграция интеллектуальных систем поддержки управления с сервисами комплексного мониторинга способствует повышению оперативности и достоверности решений по предупреждению и ликвидации ЧС различного характера.

Список литературы

1. *Москвичёв В.В., Бычков И.В., Потапов В.П. и др.* Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью // Вестник РАН. 2017. Т. 87, № 8. С. 696—705.

2. *Перри Ли*. Архитектура интернета вещей. М. : ДМК-Пресс, 2019.

3. *Бауэр В.П., Зацаринный А.А., Ильин Н.И. и др.* Прорывное ситуационное управление // Проблемы управления. 2018. № 5. С. 31—38.

4. *Ямалов И.У.* Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. М. : Лаборатория базовых знаний, 2013.

5. *Архипова Н.И., Кульба В.В.* Управление в чрезвычайных ситуациях : учеб. пособие. М. : РГГУ, 2008.

6. *Справочное* пособие по организации выполнения мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и проведению аварийно-спасательных работ силами и средствами органов государственной власти, органов местного самоуправления в мирное и военное время. МЧС России. М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2014.

7. *Ничепорчук В.В., Ноженков А.И.* Архитектура территориальной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций // Информатизация и связь. 2018. № 2. С. 35—41.

8. *Ноженкова Л.Ф.* Гибридные информационные технологии: направления развития и применения // Вестник КрасГУ. 2004. № 3. С. 99—106.

9. *Вильчик С.И.* Формирование баз знаний для интеллектуальной системы по предупреждению и ликвидации ЧС на промышленном предприятии : автореф. дис. … канд. тех. наук. Красноярск, 2003.

10. *Penkova T., Nicheporchuk V., Metus A.* Comprehensive Operational Control of the Natural and Anthropogenic Territory Safety Based on Analytical Indicators // International Joint Conference, IJCRS 2017. Olsztyn, Poland, July 3—7, 2017. Proceedings, Part I. P. 263—270.

11. *Ничепорчук В.В., Пенькова Т.Г.* Комплексный анализ факторов территориальных рисков // Проблемы анализа риска. 2019. Т. 16, № 4. С. 52—62.

12. *Ничепорчук В.В., Яровой А.В., Кожемякин Н.Л.* Метод проектирования сценариев действий в опасных ситуациях // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, 25 октября 2019 года, г. Железногорск. Изд-во : ФБГОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. С. 47—58.

13. *Ноженков А.И., Ноженкова Л.Ф., Ничепорчук В.В., Пенькова Т.Г., Коробко А.В., Марков А.А., Метус А.М.* Информационно-аналитическая система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций — ЭСПЛА-М. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018661879 от 20.09.2018 г.

14. *Жирков П.А., Иванов А.В., Раевская М.Г.* О правовом регулировании функционирования и развития информационно-технологической основы межведомственного информационного взаимодействия // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. № 6. С. 14—25.

15. *Полотнюк И.С.* Межведомственная интеграция: пути оптимизации // Информационные ресурсы России. 2006. № 5. С. 10—12.

А.В. Павлов
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: pavlov@phoi.ifmo.ru

К ВОПРОСУ КЛАССИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ КВАНТОВО-ПОДОБНЫХ КОГНИТИВНЫХ ФЕНОМЕНОВ: ДИЛЕММА ЗАКЛЮЧЕННОГО

Введение

В последние годы вновь возрос интерес к старому вопросу о наличии квантовой природы у мозга, интеллекта и сознания [1—6]. Стимулом для нового витка дискуссий послужил успех в применении формального аппарата квантовых логики и вероятности [3—6] к описанию ряда экспериментально наблюдаемых фактов, демонстрирующих нарушение законов классических логики и вероятности в рассуждениях [7—9]. Но формальное описание не проясняет сам механизм феноменов, а без ответа на этот вопрос гипотеза об их квантовой природе лишается физических и биологических оснований [1].

В статьях [10; 11] показано, что один из квантово-подобных когнитивных феноменов — «Линда» — может иметь вполне классический механизм, обусловленный нелинейностью чувствительности синаптических контактов, характерной для биологических нейронных структур [12]. В настоящем докладе на примере антагонистической игры «дилемма заключенного» показано, что другой квантово-подобный феномен, заключающийся в нарушении закона полной вероятности для дизъюнкции, также имеет классический механизм: редуцирование когнитивного диссонанса на логике с исключением.

1. Анализ проблемы и подход к задаче

1.1. Описание проблемы

«Дилемма заключенного» относится к некооперативным играм, суть игры в принятии одним из двух игроков (попавших в полицию злоумышленников A и B) одной из взаимоисключающих стратегий: D (defect — предать подельника, пойдя на сделку со следствием) или C (cooperate — сотрудничать с подельником, т. е. молчать на допросе), повлиять на чужое решение игрок не может. В опытах [8] игроку B предлагалось принять решение в ситуациях: a) ему известно, что игрок A принял решение D (сделка со следствием); b) ему известно, что игрок A принял решение C (молчит на допросе); c) решение игрока A игроку B не известно.

Результаты опроса группы респондентов были обработаны и получены следующие вероятности решений D_B (игрок B предает) для этих ситуаций [8]:

$$Pr\left(D_B \middle| D_A\right) = 0{,}97; \quad Pr\left(D_B \middle| C_A\right) = 0{,}84; \quad Pr\left(D_B\right) = 0{,}63\,,$$

© Павлов А. В., 2020

где нижние индексы указывают игрока. Эксперименты повторялись другими исследователями [13—16]: цифры отличались, но порядок был тот же. Аналогичные результаты получены и для других двухстадийных игр [8].

Проблема виделась в том, что данный порядок противоречит: принципу определенности Сэвиджа [17]: если ЛПР B в ситуации C_A принимает решение D, и в ситуации $\overline{C_A}$, где $\overline{C_A}$ — дополнение C_A до полного набора ситуаций, то же D, то B всегда принимает решение D; классической теории вероятности: согласно формуле полной вероятности, частным случаем которой и является принцип определенности Сэвиджа, вероятность решения B предать при отсутствии информации о действиях подельника $Pr(D_B) = Pr\left(D_B \middle| \left(C_A \vee D_A\right)\right)$ должна лежать в интервале между условными вероятностями $Pr\left(D_B \middle| C_A\right)$ (ситуация «a») и $Pr\left(D_B \middle| D_A\right)$ («b»).

Подход, использованный в указанных работах, заключался в вычислении вероятности принятия игроком B решения D при отсутствии информации о решении игрока A на основании полученных в экспериментах условных вероятностей решений $Pr\left(D_B \middle| D_A\right)$ и $Pr\left(D_B \middle| C_A\right)$ с последующим сравнением расчетных и экспериментально полученных оценок $P(D_B)$. Вопрос формулировался так: почему $Pr(D_B) < \min\left(Pr\left(D_B \middle| C_A\right), Pr\left(D_B \middle| D_A\right)\right)$? Иными словами, внимание фокусировалось на поведении именно полной вероятности $Pr(D_B)$, а оценки $Pr\left(D_B \middle| C_A\right)$ и $Pr\left(D_B \middle| D_A\right)$ рассматривались как данность.

В поисках ответа на этот вопрос авторы квантово-логического описания [3] учли в модели следующие факторы, характерные для реальной ситуации: 1) игрок B ведет себя сугубо прагматически, стремясь к равновесию Нэша; 2) при восприятии информации о молчании A у B возникает когнитивный диссонанс, динамика его редуцирования имеет вид затухающих колебаний; 3) решение принимается быстро, времени на раздумья не отводится [18].

1.2. Подход к проблеме: формулировка ключевого вопроса

Изменим подход к проблеме, взглянем на нее с иной точки зрения и инвертируем ключевой вопрос следующим образом: почему оценка решения «предать» при наличии информации о молчании подельника выше, чем оценка «предать» при отсутствии информации о действиях A? То есть сфокусируемся на механизме формирования условной вероятности $Pr\left(D_B \middle| C_A\right)$.

1.3. Подход к решению проблемы

В рамках монотонной логики «рациональное» поведение игрока может быть описано правилом вывода Modus Ponens, связывающим две шкалы: шкалу действий «молчать — предать» и шкалу оценок «невыгодно — выгодно»

$$\forall pl\left(D\left(pl\right)\to P\left(pl\right)\right), \tag{1}$$

где pl — игрок; P — значение «выгодно» переменной «оценка действия»; терм-множество этой переменной имеет еще значение: «невыгодно» $U=\overline{P}$, дополняющее значение «правильно» до полного набора, других термов нет.

Принятие решения при наличии информации «подельник предал» вписывается в эту логику, так как она подтверждает и усиливает исходное правило (1):

$$\forall pl\left(D\left(pl\right)\wedge D\left(\overline{pl}\right)\to vP\left(pl\right)\right), \tag{2}$$

где $\overline{pl}$ — второй игрок, v — модификатор «очень», реализуемый дообучением.

Учет информации о том, что подельник молчит, в рамках монотонной логики может быть представлено ослаблением правила (1):

$$D\left(pl\right)\wedge\neg D\left(\overline{pl}\right)\to wP\left(pl\right), \tag{3}$$

где w — модификатор ослабления, в нашем случае: $wP\left(pl\right)=\overline{P}\left(pl\right)=U\left(pl\right)$.

Но такая логика не только не адекватна экспериментальным данным [8; 13—16], но и не моделирует такой важный атрибут процесса, как когнитивный диссонанс и его редуцирование; последний манифестирует затухающими колебаниями оценки решения [3]. Поэтому используем результаты [19—21], в которых показано, что РКД моделируется логикой с исключением.

2. Модель

Определим логику как алгебру $\left\langle \mathfrak{F}\left(X\right),\cdot,*,F,\delta,\cup,T\right\rangle$, где $\mathfrak{F}$ — множество элементов модели, определяемое $\mathfrak{F}\left(X\right)=\left\{\mu\middle|\mu\colon X\to C\right\}$; X — универсум, C — поле комплексных чисел такое, что $\forall c\in C\colon \mathrm{Re}\left(c\right)\in\left[0.1\right]$, $\cdot$ и $*$ — операции алгебраического произведения и свертки, соответственно дуальность которых задает удовлетворяющее аксиоматическому определению операции, задающей дуальность определяющих модель операций, преобразование Фурье:

$$\begin{gathered} F\left(A\left(x\right)\right)=F\left(\nu\right)=\int\limits_{x_{min}}^{x_{max}}A\left(x\right)\exp\left(-j2\pi\nu x\right)dx\colon \\ \forall A,B\in\mathfrak{F}\left(X\right);\begin{cases}F\left(A\right)\cdot F\left(B\right)=F\left(A*B\right)\\ F\left(A\right)*F\left(B\right)=F\left(A\cdot B\right)\end{cases} \end{gathered}, \tag{4}$$

где δ и $\cup$ — специальные константы: минимальный и максимальный (нейтральные по сложению и умножению, соответственно) элементы; T — истинностное отображение $T\colon\mathfrak{F}\left(X\right)\to\left[\delta,\cup\right]$. В рамках нейросетевого подхода универсальное множество представляет координаты элементов образов — пикселей для изображений или нейронов в нейронном ансамбле (НА).

Операция корреляции реализует в алгебре вычитание, определяемое как сложение с аддитивно-противоположным элементом [21]:

$$A(x) \ominus B(x) = A(x) * B^{*}(-x) = A(x) \otimes B(x) \ , \tag{5}$$

где астериск — символ комплексного сопряжения.

Смысл значения логического заключения в рамках нейросетевого подхода представлен НА, он должен удовлетворять критерию однозначности интерпретации, а для этого НА логического заключения должен описываться унимодальным распределением (подмножеством). Операция вычитания (5) необходима именно потому, что требование на унимодальность НА заключения выполняется при реализации логического вывода на основе вычитания.

Согласно правилу Борна, в квантовой физике вероятность события $B_{x,y}$ определяется как скалярное произведение, т. е. квадратичная норма его волновой функции или амплитуды вероятности ψ [23]:

$$Pr_{\psi}\left(B_{x,y}\right) = \psi(x,y)\psi^{*}(x,y). \tag{6}$$

В качестве меры на алгебре возьмем площадь корреляции (альфа-срез (5)), для изотропного поля $s_{\alpha} = \pi r_{\alpha}^{2}$, где r_{α} — длина (радиус) корреляции по уровню α. Можно видеть, что определенная таким образом квадратичная мера удовлетворяет аксиоматическому определению меры на решетке $\mathfrak{F}(X)$:

$$\begin{aligned} &s\colon \mathfrak{F}(X) \to R^{+}, \\ &s(\delta) = 0, \\ &\forall a,b \in \mathfrak{F}(X); s(a \oplus b) \bullet s(a \odot b) = s(a) \bullet s(b) \\ &a \subset b \ \Leftrightarrow \ s(a) \le s(b), \end{aligned} \tag{7}$$

где $\bullet$ — монотонно неубывающая операция, имеющая тот же аддитивный генератор, что и операция, задающая дуальность [24]. Таким образом, вероятность *Pr* и площадь корреляции *s* как меры математически эквивалентны.

Логика на алгебре фурье-дуальных операций по определению нечетко-значимая: если исходные элементы модели четкие, то уже однократное применение операций преобразования Фурье, свертки или корреляции дает нечеткое по определению подмножество.

Операцию исключения определим посредством операций, задающей дуальность: преобразования Фурье (4) [19]. В модели должно храниться два, связанных преобразованием Фурье, правила: «Обобщенный Modus Ponens», представленный весами межнейронных связей в пространстве Фурье:

$$W^{GMP}(\nu) = \eta^{GMP}\left(F^{*}\left(C(x)\right)\right), \tag{8}$$

где $C(x)$ — эталонный НА, представляющий значение входной переменной «молчать»; x — координата в плоскости репрезентации переменных «решение»; ν — частота (координата в пространстве Фурье).

Правило исключения хранится в весах:

$$W^E(\zeta) = F\left(C(\chi)\right)\left(P^{GMP}(\zeta)\right)^*, \tag{9}$$

где $P^{GMP}(\zeta)$ — НА, представляющий значение оценки «правильно», полученный по правилу монотонной логики «Обобщенный Modus Ponens».

Можно видеть, что эта алгебра удовлетворяет критерию биологической мотивированности в силу того, что нейронные структуры зрительной системы человека и высших животных реализуют преобразование Фурье [25].

Принципиальная схема нейросети, реализующей модель, дана на рисунке 1.

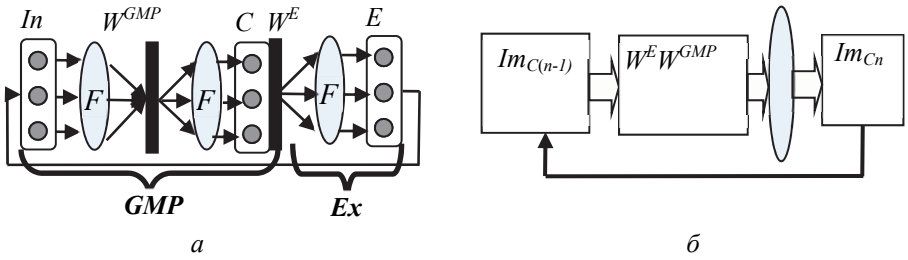


Рис. 1. Принципиальная схема нейросети, реализующей модель:
а — трехслойная нейросеть, порождающая логику с исключением:
In, *C*, *E* — слои репрезентаций: входной, заключения монотонной логики и исключения,
W^{GMP} и W^E — матрицы весов (6) и (7), *F* — фурье-преобразующие элементы;
GMP и *Ex* — каскады монотонной логики и исключения, соответственно;
б — блок-схема трехслойной нейросети: W^{GMP} и W^E — матрицы весов связей монотонной логики (правила «Обобщенный Modus Ponens») и исключения, формирующие составную матрицу весов связей

Данная архитектура актуальна в задаче в силу того, что, как показано в [20], она моделирует такой существенный атрибут рассуждений в условиях информации о молчании подельника, как когнитивный диссонанс [3; 18].

3. Моделирование

Моделировалась работа трехслойной НС резонансной архитектуры (рис. 1), порождающей логику с фурье-дуальным исключением. Согласно [3; 18] рассмотрены первые стадии возникновения и редуцирования когнитивного диссонанса как этапы восприятия информации о действиях *A* и оценки ситуации по критерию индивидуальной выгоды игрока *B*: нулевая итерация: информация о действиях игрока *A* отсутствует, и *B* руководствуется монотонной логикой «предать — выгодно, молчать — плохо»; первая итерация логики с исключением: поступает информация о том, что игрок *A* молчит, на этой итерации игрок *B* оценивает действия *A*; вторая итерация логики с исключением: теперь игрок *B* должен принять решение о своих действиях, т. е. оценить свои возможные решения с учетом информации о действиях *A*.

Исследовалась зависимость квадратичной меры решения (площади корреляции (5), представляющей распределение нейронной активности в слое логического заключения, по уровню 0,606 максимального значения) от отношения полуширин спектров амплитуд образов V_{In}, представляющих эталонное значение связки при обучении нейросети по правилу монотонной логики «молчать — неправильно» и входного образа «предать». Это отношение есть оценка различения игроком анализируемого решения «предать» от эталона при обучении монотонной логики «молчать». Образы решений (репрезентирующие их НА) представлены реализациями стационарного случайного процесса со спектром амплитуд, описываемым функцией Гаусса и случайным, нормально распределенным с дисперсией 2π, спектром фаз.

На рисунке 2 представлены зависимости оценок решений «предать» и «молчать», в качестве которого использована характеристика r_α (радиус корреляции) от оценки отличия от эталона монотонной логики: образа при обучении исключению V и/или анализируемого решения V_{In}, которые определены как отношение полуширин спектров амплитуд соответствующих образов по заданному уровню (α-срезу). Поскольку моделировались образы с гауссовыми спектрами, то взят уровень $\alpha = 0{,}606$. На рисунке 2 приведены не квадратичные, как того требует модель, а линейные меры из соображений наглядности — для легкости визуального различения кривых. Для удобства на осях даны также значения соответствующих лингвистических переменных.

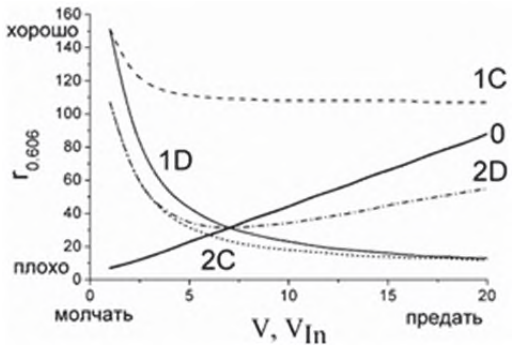


Рис. 2. Зависимости оценок решений от оценки отличия анализируемого решения от эталона «молчать»: 0 — на нулевой итерации согласно правилу монотонной логики; 1C и 1D — решений «молчать» и «предать» на первой итерации; 2C и 2D — решений «молчать» и «предать» на итерации 2 соответственно

Оценки приводятся для нулевой, первой и второй итераций: на нулевой итерации по правилу монотонной логики производится оценка собственного решения «предать» при отсутствии информации о действиях подельника; на первой итерации согласно правилу логики с исключением производится оценка решений подельника «молчать» (моделируется при значении $V_{In} = 1$, меняется значение V) или «предать» (моделируется $V = V_{In} > 1$); на второй итерации согласно правилу логики с исключением производится оценка собственных возможных решений «молчать» ($V_{In} = 1$, меняется значение V) или «предать» ($V = V_{In} > 1$).

На рисунке 2 в контексте поставленной задачи обращает на себя внимание то, что в диапазоне значений $V_{In} \le 7$ кривая 2D, т. е. оценка собственного

решения «предать» при наличии информации о том, что подельник молчит, идет выше кривой 0, представляющей оценку решения «предать» при отсутствии информации, что и является сутью моделируемой проблемы.

На рисунке 3 представлена ключевая в свете проблемы зависимость отношения

$$\Omega(V_{In}) = \frac{Pr(D_B)}{Pr(D_B|C_A)} \tag{10}$$

от значения V_{In}, горизонтальными линиями показаны экспериментально полученные значения этого отношения, цифры в квадратных скобках справа от линий указывают номер соответствующей ссылки в списке литературы.

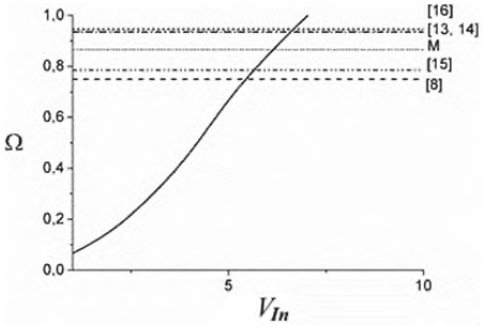


Рис. 3. Зависимости отношений оценок собственного решения «предать» при отсутствии информации о действиях подельника к оценке при информации о молчании подельника от оценки V_{In}:
сплошная кривая — даваемая моделью;
горизонтальные линии — экспериментальные данные с указанием ссылок;
M — среднее по экспериментальным данным

Как видно из рисунков 2 и 3, в диапазоне $V_{In} \le 7$ имеем порядок, нарушающий классическую формулу полной вероятности: $Pr(D_B|(C_A)) < Pr(D_B|(C_A \vee D_A))$, при этом в диапазоне $V_{In} \in [5.5,7]$ даваемые моделью результаты совпадают с экспериментальными данными [8; 13—16].

Заключение

Таким образом, феномен устойчивого нарушения классической формулы полной вероятности при дизъюнкции на примере принятия решений в некооперативных играх может иметь вполне классический механизм редуцирования когнитивного диссонанса на логике с исключением, не требующий для своего описания обращения к формализму квантовых логики и вероятности.

Из представленных результатов следует, что причиной различия в экспериментально полученных разными исследователями оценках [8; 13—16] могут быть субъективные особенности групп респондентов, описываемые в модели физически измеримой оценкой различения решений «предать» и «молчать» V — различия спектральных характеристик НА их внутренних репрезентаций.

Работа поддержана РФФИ, грант 18-01-00676-а.

Список литературы

1. *Жёлтиков А. М.* Критика квантового разума: измерение, сознание, отложенный выбор и утраченная когерентность // УФН. 2018. Т. 188, № 10. С. 1119—1128.

2. *Менский Б. М.* Концепция сознания в контексте квантовой механики // УФН. 2005. Т. 175, № 4. С. 413—435.

3. *Pothos E. M., Busemeyer J. R.* A quantum probability explanation for violations of «rational» decision theory // Proc. R. Soc. B. 2009. 276, 2171—2178 first published online 25 March 2009.

4. *Busemeyer J. R., Pothos E., Franco R. et al.* A quantum theoretical explanation for probability judgment «errors» // Psychological Review 2011. Vol. 118, № 2. P. 193—218.

5. *Trueblood J. S., Pothos E. M., Busemeyer J. R.* Quantum probability theory as a common framework for reasoning and similarity // Front. in Psychol. 11 April 2014.

6. *Moreira C., Wichert A.* Quantum Probabilistic Models Revisited: The Case of Disjunction Effects in Cognition // Front. in Physics. 2016. Vol. 4.

7. *Tversky A., Kahneman D.* Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment // Psychological Review. 1983. 90(4). P. 293—315.

8. *Shafir E., Tversky A.* Thinking through uncertainty: nonconsequential reasoning and choice // Cognitive Psychology. 1992. 24:449—74.

9. *Tversky A., Shafir E.* The disjunction effect in choice under uncertainty // J. Psychol. Sci. 1992. 3:305—9.

10. *Павлов А. В., Орлов В. В.* Моделирование механизмов квантовой логики методом наложенных голограмм Фурье, основанным на нелинейности экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 3. С. 246—252.

11. *Павлов А. В.* Моделирование квантовой логики при линейной записи наложенных голограмм Фурье: феномен Линда // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 8. С. 777—778.

12. *Орлов Р. С.* Нормальная физиология. 2-е изд. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010.

13. *Crosson R.* The disjunction effect and reason-based choice in games // Organ. Behav. Hum. Decis. Process. 1999. Vol. 80. P. 118—133.

14. *Li S., Taplin J.* Examining whether there is a disjunction effect in Prisoner's Dilemma games // Chin. J. Psychol. 2002. Vol. 44. P. 25—46. URL: http://hdl.handle.net/2440/3240

15. *Busemeyer J. R., Matthew M., Wang Z. A.* Quantum game theory explanation of disjunction effects // In Proc. 28th Annual Conf. of the Cognitive Science Society, eds.: Sun R., Miyake N. 2006. P. 131—135. Mahwah, NJ: Erlbaum.

16. *Hristova E., Grinberg M.* Disjunction effect in prisonner's dilemma: evidences from an eye-tracking study. In: Proceedings of the 30th Annual Conference of the Cognitive Science Society. Washington, DC (2008).

17. *Leonard J. Savage* The Foundations of Statistics. Dover Publ. Inc., N. Y., 1972.

18. *Diederich A., Busemeyer J. R.* Modeling the effects of payoffs on response bias in a perceptual discrimination task: threshold bound, drift rate change, or two stage processing hypothesis // Percept. Psychophys. 2006. Vol. 97. P. 51—72.

19. *Павлов А. В.* Алгебра фурье-дуальных операций: логика с исключением // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 3. С. 26—38.

20. *Павлов А.В.* Логика с исключением на алгебре фурье-дуальных операций: нейросетевой механизм редуцирования когнитивного диссонанса // Научно-технический вестник инф. технологий, механики и оптики. 2014. Т. 89, № 1. С. 17—25.

21. *Павлов А.В.* Влияние условий записи голограмм и нелинейности регистрирующих сред на динамические характеристики схемы голографии Фурье резонансной архитектуры // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119, № 1. С. 151—159.

22. *Dubois D., Prade H.* Fuzzy numbers: an overview // ed. by J.C. Bezdek, Analysis of Fuzzy Information. Boca Raton, FL, 1987. Vol. 1. P. 3—39.

23. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. М. : Мир, 1965. Вып. 8.

24. *Трильяс Э., Альсина К., Вальверде А.* Нужны ли в теории нечетких множеств операции MAX, MIN и 1-j? // Нечеткие множества и теория возможностей / под ред. Р.Р. Ягера. М. : Радио и связь, 1986. С. 199—228.

25. *Глезер В.Д.* Согласованная фильтрация в зрительной системе // Оптический журнал. 1999. Т. 66, № 10. С. 10—14.

Б.В. Палюх[1], А.Н. Ветров[2], А.А. Мальков, Д.С. Александрова
Тверской государственный технический университет, Россия
e-mail: [1]pboris@tstu.tver.ru, [2]vetrov_48@mail.ru

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Введение

В настоящее время существует фундаментальная проблема создания методов и средств обеспечения устойчивости технологических процессов, подверженных случайным флуктуациям. Существующий теоретический и методический аппарат не позволяет промышленным предприятиям в ряде случаев эффективно решать задачи обеспечения безопасности и управления технологическим процессом. В статье рассматриваются вопросы создания методов и средств построения гибридных экспертных систем для управления эволюцией непрерывных многостадийных процессов в условиях динамической неопределенности.

В [1—5] описана экспертная система управления эволюцией непрерывных многостадийных процессов ExpSystem. При ее разработке использован подход к созданию гибридных ЭС [6], при котором применяются как формализованные, так и неформальные знания и процедуры. Особое внимание при разработке диагностических систем было уделено вопросам учета неопределенности технологической информации при принятии диагностических решений.

© Палюх Б.В., Ветров А.Н., Мальков А.А., Александрова Д.С., 2020

Рассматриваемая ЭС имеет иерархическую структуру, которая обусловлена стратегией диагностирования и функционально-потоковой декомпозицией непрерывного многостадийного производства.

На первом уровне иерархии осуществляется параметрическая диагностика, основанная на измерении и обработке диагностических показателей в процессе эксплуатации технологического оборудования. Технологический процесс характеризуется измеряемыми входными и выходными переменными. Они образуют вектор диагностических переменных $Y(t) = \left(y_i(t) \right)$, где $y_i(t)$ — значение i-й диагностической переменной в момент времени t.

По результатам измерений определяются значения вектора диагностических переменных в реальном масштабе времени, которые сравниваются с нормативными значениями. Отклонение текущих значений диагностических переменных от нормативных служит основой для детектирования бифуркаций многомерных случайных процессов в производственной системе.

На втором уровне иерархии определяются технологические узлы и связи, подозреваемые в наличие неисправного элемента. Вывод о наличии или вероятности отказа в одной или нескольких технологических связях делается на основе анализа состояния диагностических переменных и экспертных оценок.

На третьем уровне иерархии производится более подробный анализ технологических подсистем, в отношении которых существует подозрение на неисправность, с целью выявления первичной неисправности, приведшей к нарушению технологического режима или созданию кризисной ситуации.

1. Детектирования бифуркаций многомерных случайных процессов в динамических экспертных системах

Измеренные значения диагностических переменных, поступающие от сенсоров, образуют многомерный информационных поток, описывающий состояние технологического процесса.

Постоянное поступление информации в виде быстрых, изменяющихся, непредсказуемых и неограниченных потоков создают необходимость применения инкрементальных подходов, которые могут обрабатывать информацию, как только она становится доступной, и производить над ней вычисления в режиме реального времени.

Обнаружение аномалий в потоковых данных относится к проблеме определения закономерностей в данных аудита, полученных на основе мониторинга деятельности технологической системы, которая не работает соответственно ожидаемому поведению. Эти неадекватные паттерны относят к аномалиям. Подход к выявлению нерегулярностей в данных заключается в выделении их групп, которые отклоняются от общих статистических свойств распределения. Диагностические переменные отображаются в виде временных

рядов, использующих результаты неполных и зашумленных измерений. Обработка значений временного ряда позволяет определять закономерности аномальной динамики и извлекать прекурсоры (предвестников) опасности. Поскольку данные содержат шум, который может быть похож на аномальное поведение, необходимо выявлять границу между нормальным и аномальным поведением, учитывая динамику изменений.

Детекторы обнаружения аномалий должны устанавливать, является ли наблюдаемый процесс стационарным или нет. Методы выявления аномалий во временных рядах должны определять показатели хаотичности и выявлять особые состояния системы и нестационарность исследуемого процесса на любых частотно-временных масштабах, а значит, получать как качественные, так и количественные характеристики нестационарности.

Детектирование аномалий в мультисенсорной распределенной системе предполагает объединение результатов, получаемых от отдельных датчиков для того, чтобы сделать выводы о возможном переходе технологического процесса в критическое состояние.

Методы объединения позволяют сделать правильный вывод только в том случае, если все полученные оценки аномалии независимы. Но когда они коррелируют между собой, можно получить неправильный вывод.

Общую основу для описания и вывода причинно-следственных связей обеспечивают Гауссовы графические модели (GGM). Нахождение корреляции в данных преобразуется в нахождение условной независимости среди случайных переменных в GGM. Матрица точности кодирует все условно независимые или зависимые отношения между всеми случайными величинами.

Метод проверки корреляции оценок аномалии, полученных от разных сенсоров, используется для оценки матрицы точности и определения зависимости или независимости случайных величин. В случае, если есть зависимость между двумя или более переменными, выбирается переменная с самым большим весом.

Для объединения свидетельств об аномалии применяется подход, который рассматривает процедуру объединения свидетельств как механизм рассуждения в условиях неопределенности. Методы комбинации свидетельств имеют возможность добавлять понятия неопределенности и незнания в системе и количественное измерение доверия и правдоподобия результатов обнаружения аномалий.

Мультисенсорные распределенные системы детектирования предполагают комбинирование данных от нескольких разнообразных датчиков или источников для того, чтобы сделать вывод об аномалиях. Поскольку сенсоры имеют различные характеристики по точности измерения, по задержкам в каналах связи и т. п., их показания имеют разную важность на момент получения свидетельств. Метод использует взвешенное правило комбинации, чтобы объединить все свидетельства. Затем генерируется общее значение вероятности аномалии для каждой гипотезы.

2. Методы сужение пространства поиска

Формально задача первого уровня заключается в выборе элемента $c_j \in C$, где $C = \{c_j\}$ — множество технологических связей на основе регистрируемого подмножества значений множества $Y(t) = \left(y_i(t)\right)\}$ — диагностических переменных. Факт выхода значения диагностической переменной будем обозначать как НДП. Обозначим $P = \{p(y_i)\}$ — множество логических переменных. Появлению НДП по i-й диагностической переменной соответствует значение логической переменной $p(y_i) = 1$, отсутствию НДП соответствует $p(y_i) = 0$.

Каждое НДП свидетельствует о неисправности в одной или нескольких технологических цепях. С учетом принятых обозначений исходные данные для поиска неисправности технологического оборудования можно представить диагностической матрицей $M = \left(\mu_{ij}\right)$, где μ_{ij} определяет степень влияния i-й переменной на работоспособность j-й технологической связи, определяемую экспертным путем. Каждое значение логической переменной $p(y_i) = 1$ индуцирует экспертно-определенное множество технологических связей C_i

$$C_i = \{(c_j, \mu_i(c_j) \neq 0)\},\ c_j \in C,\ \ C_i \subset C,\ \ C_i \neq \varnothing .$$

Здесь c_j — связи, неисправности в которых могли бы вызвать нарушение ограничений по *i*-й диагностической переменной; $\mu_{ij}(c_j)$ — степень принадлежности элемента c_j множеству C_i (соответствует приведенной к диапазону [0; 1] степени уверенности эксперта в наличии источника НДП по *j*-й переменной в связи c_j). Задача распознавания на втором этапе заключается в определении соответствия между значениями диагностических переменных и неисправной или не эффективно работающей стадией технологического процесса (технологической связи).

Использование теории Демпстера-Шефера (DST) позволяет закрепить общую меру вероятности за подмножествами множества неисправных технологических цепей [7, 8, 10]. Это необходимо по следующим причинам. Во-первых, из-за неоднозначности решения задачи экспертной классификации, когда эксперт не может выявить степень характерности данного НДП для одной, отдельно взятой цепи. Во-вторых, в случае неточности результатов определения самого факта НДП. В-третьих, при назначении общего уровня доверия для всех диагностических процедур. Обозначим через A некоторое подмножество множества C, включая пустое множество $\varnothing$ и само множе-

ство C. Множество всех подмножеств определим как $\{A \mid A \subseteq C\}$. Каждому множеству A можно поставить в соответствие действительное число $m(A)$, называемое базовой вероятностью. В DST рассматриваются не все подмножества фрейма различения [8], а только те, которые имеют не нулевые базовые вероятности — так называемые фокальные элементы функции доверия Bel. Таким образом, любое множество C_i, индуцируемое логической переменной $p(y_i)=1$ — фокальный элемент. Любое подмножество $Bel(A_i)$ множества C_i — фокальный элемент, если оно имеет ненулевую базовую вероятность. Для множества A_i функция доверия $Bel(A_i)$ вычисляется как сумма всех базовых вероятностей элементов, образующих множество A_i.

Как правило, при возникновении потенциально-опасной ситуации фиксируется некоторое множество НДП $P^* = \{p(y_i) \mid p(y_i)=1\}$. В этом случае факты регистрации различных НДП рассматриваются как независимые свидетельства о неполадках в технологическом процессе. Для объединения различных свидетельств следует вычислить ортогональные суммы базовых вероятностей определенных для каждого из свидетельств. Для этого используется правило Демпстера [9], в соответствии с которым ортогональные суммы определяются следующим выражением:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{1-m(\varnothing)} * \sum_{Y \cap Z = A} m_1(Y) * m_2(Z),$$

где Y и Z два фокальных элемента, распределенных на фрейме доверия, порожденных различными свидетельствами. Мера вероятности, приходящаяся на пустое множество

$$m(\varnothing) = \sum_{Y \cap Z = \varnothing} m_1(Y) * m_2(Z).$$

Правило Демпстера ассоциативно и коммутативно, что позволяет объединять аналогичным образом и большее число свидетельств.

На основе новых базисных вероятностей вычисляются функции доверия и правдоподобия для всех рассматриваемых гипотез. Это позволяет использовать всю доступную информацию в процессе поиска неисправных или неэффективно работающих технологических связей и сузить количество подозреваемых объектов, отсеяв часть из них и перераспределить оценки возможного наличия неисправности для отдельной технологической связи или.

3. Описание механизма поиска первичной неисправности

Разработанный прототип экспертной системы реализует механизм обработки неопределенности, позволяя эксперту-технологу принимать решение об устранении дефектов оборудования.

Диагностическая процедура поиска первичной неисправности в дефектной цепи основана на использовании набора продукционных правил и работает по принципу «вопрос-ответ». Набор правил зависит от выполнения условий, которые, в свою очередь, активируются фактами. Для успешной работы ЭС необходимо наличие фактов и продукционных правил. Для поиска первопричины аномального состояния процесса составляется причинно-следственный граф, описывающий связи между элементами множества возможных состояний технологического оборудования на каждой стадии производственного процесса. На основе диагностического графа строятся правила продукции ЭС. Для этой цели в ЭС ExpSystem разработан редактор базы правил, позволяющий формировать БЗ системы на основе причинно-следственного графа.

4. Распределенная мультисенсорная система обработки первичной информации

Многомерный информационный поток, поступающий от сенсоров в режиме реального времени, содержит большие объемы обрабатываемых данных. С учетом ограниченных возможностей оборудования можно говорить об распределенной обработке данных на некотором множестве серверов приложений (Server App) первой ступени. При этом каждый из Server App будет обрабатывать лишь некоторую порцию показаний части сенсоров. После обработки данных каждый Server App должен передать свою часть данных на сервер баз данных (Server BD) и главный Server App, где должен быть произведен окончательный анализ данных, поступивших с Server App первой ступени. Схема взаимодействия компонент системы обработки первичной информации (ОПИ) представлена на следующем рисунке.

Рис. Схема взаимодействия компонент системы ОПИ

Промежуточным звеном при передаче показаний сенсоров необходимо являются некоторые устройства, способные переводить электрические импульсы, поступающие от сенсоров, в числовую форму, которая станет удобной с точки зрения обработки данных на Server App первой ступени. В качестве таких устройств предлагается использовать неплохо зарекомендовавшие себя при решении подобных задач одноплатные компьютеры Raspberry Pi с низкоуровневым интерфейсом GPIO (General Purpose Iinput/Outputs), к выводам которого можно подключать всевозможные сенсоры. При этом возможно использование как датчиков с однопроводной шиной для передачи данных (1-Wire), так и многопроводной шиной (I2C, стандарт SPI). Операционные системы, устанавливаемые на Raspberry Pi, могут быть как просто многозадачные (разновидности Linux, Windows 10 IoT), так и ОС реального времени (RTLinux).

Представленная на рисунке архитектура предполагает следующее взаимодействие компонент. Процесс получения показаний сенсоров состоит из двух тактов: такт измерения данных и такт снятия данных. Все команды инициируются ведущим устройством Raspberry Pi, которое в итоге, получив показания датчика в виде электрических импульсов, преобразует их в числовую форму и пересылает на Server App по сети Modbus RTU для дальнейшей обработки. Данные от сенсоров через определенные промежутки времени поступают на Raspberry Pi и передаются по сети на Server App первой ступени. На последних устанавливаются приложения, представляющие из себя службы ОС. Таким образом, минимизируется время на обработку первичных данных. Server App второй ступени производит финальную обработку данных и предоставляет их для анализа в СППР на терминал эксперта-технолога по протоколу HTTP. На сервере Server App второй ступени включен Firewall, который в случае необходимости заблокирует несанкционированный доступ к серверу. Кроме серверов Server App и клиентов Raspberry Pi в ИСАУ включены Server BD MySQL для хранения данных. Всё оборудование объединено в сеть Modbus RTU при помощи маршрутизаторов.

Таким образом, представленная архитектура дает возможность своевременно производить анализ технологических данных (показаний сенсоров) и в случае необходимости воздействовать должным образом (в случае неисправности) на технологический процесс эксперту-технологу в режиме реального времени.

Заключение

В статье представлено описание гибридной экспертной системы для управления эволюцией непрерывных многостадийных производственных процессов в режиме реального времени, рассмотрены методы и средства построения подобных систем. Разработанный прототип ЭС ExpSystem — универсальное программное средство для построения экспертных систем для любого непрерывного многостадийного процесса. Адаптивность ЭС ExpSys-

tem достигается за счет наличия в системе редакторов, позволяющих настроить ее на любой конкретный процесс указанного класса. Система опробована и получила положительные отзывы специалистов. Дальнейшая работа направлена на совершенствование систем ОПИ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-07-00199.

Список литературы

1. *Палюх Б.В., Ветров А.Н., Хабаров А.Р.* Применение синергетического подхода при эволюционном управлении многостадийными процессами // Современные сложные системы управления: HTCS'2017 : материалы XII междунар. науч.-практ. конф., 25—27 октября 2017 г : в 2 ч. / Липецкий государственный технический университет. Липецк, 2017. Ч. 2. С. 281—285.

2. *Палюх Б.В., Ветров А.Н., Емельянова И.И., Мальков А.А.* Оценка неопределенности в экспертной системе эволюционного управления многостадийным технологическим процессом // Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018 (24—27 сентября 2018 г., г. Москва, Россия) 2018. Т. 2. С. 230—237.

3. *Paliukh B.V., Vetrov A.N., Emelyanova I.I.* Uncertainty Evaluation in the Expert System of Evolutionary Management of a Multistage Technological Process Fuzzy Technologies in the Industry // FTI 2018 Ceur Workshop Proceedings (CEUR-WS. org) 2018. P. 197—202.

4. *Шабанов Б., Сотников А., Палюх Б., Ветров А., Александрова Д.* Expert System for Managing Policy of Technological Security in Uncertainty Conditions: Architectural, Algorithmic, and Computing Aspects // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) January 28—30. 2019. P. 1716—1721.

5. *Палюх Б.В., Ветров А.Н., Александрова Д.С.* Идентификация критических состояний при управлении эволюцией многостадийного производства в условиях неопределенности // Международный симпозиум по информатике, цифровой экономике и интеллектуальным системам (CSDEIS2019). Переславль-Залесский : Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019. С. 231—240.

6. *Рыбина Г.А.* Теория и технология построения интегрированных экспертных систем : монография. М : Научтехлитиздат, 2008.

7. *Ronald R. Yager, Liping Liu.* Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions. Springer, 2008.

8. *Dempster A.P.* Belief functions in the 21st century: A statistical perspective // Proceedings of Institute for Operations Research and Management Science Annual meeting, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

9. *Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P.* Belief functions combination and conflict management // Information Fusion. 2002. Vol. 3(2).

10. *Palyukh B.V., Ivanov V.K., Sotnikov A.N.* Evidence Theory for Complex Engineering System Analyses // Proceedings of the Third International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'18) 2018, Springer International Publishing. Vol. 1. P. 70—79.

П.В. Силев[1], О.В. Толстель[2], А.Г. Дупленко[3]
БФУ им. И. Канта, ИФМНиИТ, Калининград, Россия
e-mail: [1]psilev97@mail.ru, [2]tolstel.oleg@mail.ru, [3]dvplenko@gmail.com

РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО РЕЧИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Введение

Современная психология рассматривает эмоции как осознаваемые психофизиологические состояния, возникающие в качестве реакции на внешние и внутренние раздражители и имеющие различные внешние проявления, в том числе в речевой деятельности [1]. Эмоции — неотъемлемая составляющая любого человека, которые в значительной степени обогащают нашу жизнь [2].

Исследование В. Х. Манерова [3] идентификации эмоций по речи показало, что основной признак, используемый человеком при слуховом восприятии эмоционально обусловленных изменений речи, — степень речевого возбуждения. Эмоции других людей распознаются по их внешним проявлениям: изменению речи и голоса, поведению, ответной реакции. Учитываются также антецеденты, т. е. то, что предшествует эмоции и выступает ее причиной: ситуация в ее взаимодействии с имеющейся у человека целью [4].

Распознавание эмоционального состояния человека представляет огромный интерес. Созданы программы для определения эмоций по выражению лица. Так, например, ученые из Университета короля Хуана Карлоса (Испания) разработали систему, способную различать выражения лиц в режиме реального времени. На скорости 30 кадров в секунду программа анализирует выражение лица человека и классифицирует его в соответствии с шестью заложенными в нее шаблонами: гнев, отвращение, страх, счастье, печаль и удивление. Анализироваться может как лицо целиком, так и его часть. Для идентификации выражения лица система использует базу данных Cohn-Kanade, содержащую 333 варианта выражения лиц различных людей. Вероятность совпадения с базой — 89 процентов [5]. Система может работать и в неблагоприятных условиях, на нее не влияет ни изменение освещенности, ни движение пользователя.

Также проводятся работы по компьютерному детектору эмоций по голосу (Voice-StressAnalysis) на основе анализа стресса. Современные системы (ComputerVoiceStressAnalysis) в США находят применение в государственных и правоохранительных органах [6].

В данной статье предоставлен алгоритм распознавания эмоционального состояния человека по аудиозаписи его голоса.

Работа типовой системы эмоционального распознавания по речи включает: подачу на вход звукового аналогового сигнала; аналогово-цифровое пре-

© Силев П.В., Толстель О.В., Дупленко А.Г., 2020

образование входного сигнала с целью получения его спектральных составляющих с использованием алгоритма дискретного преобразования Фурье, а в некоторых случаях — алгоритма быстрого преобразования Фурье для повышения быстродействия системы; сглаживание спектра сигнала с помощью оконных фильтров и оконной функцией Хэмминга [7]; разбиение спектра сигнала на кадры; вычисление признаков кадров и значимых характеристик; распознавание эмоций на основе значимых характеристик кадра.

На этапе выбора алгоритма для решения данной задачи рассмотрены такие варианты, как сверточная нейронная сеть (CNN), LSTM (Long-ShortTimeMemory) и MLP (Multi-LayerPerceptron).

Вид эмоции, переживаемой говорящим, определяется слушающим менее успешно, чем степень эмоционального возбуждения. Наиболее точно опознаются базовые эмоции, затем удивление и неуверенность и хуже всего — презрение и отвращение.

На точность опознавания влияет способность говорящего передавать в речи эмоциональные состояния. Выявлена тенденция лучшего распознавания положительных эмоций по сравнению с индефферентными и отрицательными.

Цель исследования — создание и изучение модели искусственной нейронной сети, способной распознать эмоциональное состояние человека по его речи.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: рассмотреть задачу распознавания эмоций; выбрать лучший алгоритм построения модели, наиболее подходящий для решения данной задачи; исследовать точность работы модели в разных условиях; проверить работоспособность модели.

1. Технологии и инструменты

Модель создана средствами языка программирования Python и его библиотек: Tensorflow — открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия; Keras — открытая нейросетевая библиотека, написанная на языке Python, — надстройка над фреймворками Deeplearning4j, TensorFlow и Theano; Librosa — пакет Python для анализа музыки и аудио, обеспечивающий строительные блоки для создания музыкальных информационно-поисковых систем и способный выделять мелкепстральные признаки; NumPy — библиотека с открытым исходным кодом для Python и работы с многомерными массивами.

Для обучения модели использован предварительно загруженный набор аудиоданных с примерно 2000 аудиофайлами в формате wav. Каждый аудиофайл имел уникальный идентификатор в шестой позиции имени файла, при-

меняемый для определения эмоции, изображенной в аудиофайле. В наборе данных имеется пять разных эмоций: спокойствие, радость, грусть, злость и страх.

Для обработки и извлечения функций из аудиофайлов использовалась библиотека Librosa для извлечения признаков MFCC (MelFrequencyCepstral Coefficient). Посредством идентификаторов [6] разделены мужские и женские голоса. Из каждого аудиофайла получены признаки, представленные в виде массива многих значений. Эти функции добавлены с помощью меток (label), созданных на предыдущем шаге. Далее устранены отсутствующие функции для некоторых аудиофайлов, которые оказались короче по длине. Чтобы получить уникальные признаки каждой эмоциональной речи, в два раза увеличена частота дискретизации. Большее увеличение не имело смысла, так как появлялся риск сбора шума и снижения точности результатов. Далее: пересортировка данных, разделение их на тренировочные и тестовые, построение модели для обучения.

2. Выбор модели

Модель многослойного персептрона MLP (англ. — multilayerperceptron) показала низкую точность, около 25%, с восемью слоями, функцией softmax на выходе, размером просмотра обучающей последовательности 32 и 550 эпох (рис. 1).

```
In [105]: plt.plot(history.history['acc'])
          plt.plot(history.history['val_acc'])
          plt.title('model accuracy')
          plt.ylabel('accuracy')
          plt.xlabel('epoch')
          plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')
          plt.show()
```

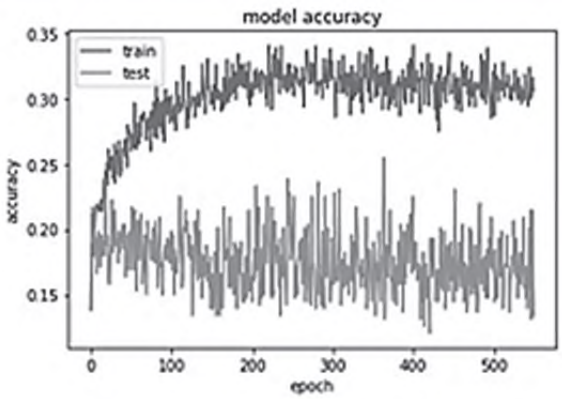


Рис. 1. Сравнение результатов тренировочной и тестовой выборок модели MLP (вверху — листинг программы, внизу график зависимости точности от числа эпох)

Модель долгой краткосрочной памяти LSTM (англ. — long short-term memory) имела самую низкую точность обучения — около 15 % с пятью слоями, функцией tanh, размером просмотра обучающей последовательности 32 и 50 эпох (рис. 2).

```
In [91]: plt.plot(lstmhistory.history['acc'])
         plt.plot(lstmhistory.history['val_acc'])
         plt.title('model accuracy')
         plt.ylabel('accuracy')
         plt.xlabel('epoch')
         plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')
         plt.show()
```

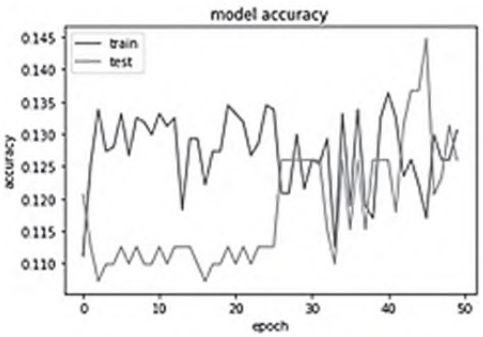


Рис. 2. Сравнение результатов тренировочной и тестовой выборок модели LSTM (вверху — листинг программы, внизу — график зависимости точности от числа эпох)

Модель сверточной нейронной сети CNN (англ. — convolutional neural network). По результатам исследования трех моделей получена лучшая точность 60 % с 18 слоями, функцией активации softmax, функцией активации rmsprop, размером просмотра обучающей последовательности 32 и 1000 эпох (рис. 3).

```
In [110]: #sigmoid
          plt.plot(cnnhistory.history['acc'])
          plt.plot(cnnhistory.history['val_acc'])
          plt.title('model accuracy')
          plt.ylabel('accuracy')
          plt.xlabel('epoch')
          plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')
          plt.show()
```

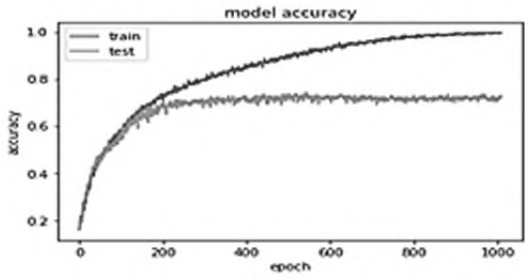


Рис. 3. Сравнение результатов тренировочной и тестовой выборок модели *CNN* (вверху— листинг программы, внизу график зависимости точности от числа эпох)

4. Результаты экспериментов

Пробное обучение для более чем 1000 эпох заняло много машинного времени. В этой связи количество эпох при обучении изменено до 300 (рис. 4) со снижением точности до 49,69 %.

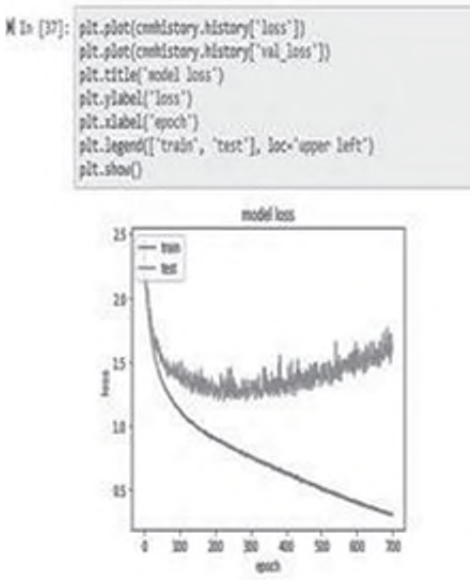


Рис. 4. Сравнение результатов тренировочной и тестовой выборок модели CNN при ограничении числа эпох до 300
(вверху— листинг программы, внизу график зависимости точности от числа эпох)

Желательно обучать модель на голосах профессиональных актеров. Чаще всего сеть ошибалась в отнесении голосов мужчин в класс «спокойный», поскольку мужской голос менее эмоционально выразителен, чем женский. *CNN*-сеть, обученная на 1012 образцах голосов, точно различает мужские и женские голоса.

Список литературы

1. *Седых А.П.* Природа эмоций и их классификация в гуманитарных науках и языкознании // Научные ведомости. Серия Гуманитарные науки. Вып. 13. Белгород : Издательский дом «Белгород», 2012. № 6 (125). С. 112.

2. *Джеймс В.* Психология. СПб. : Академический проект, 2011. Ч. 2.

3. *Манёров В.Х., Шнейдер Е.М.* Автоматическое распознавание эмоций по спектральным и интонационным признакам // Материалы доклада и сообщения 5-го Всесоюзного совещания-симпозиума цикла «Акустика речи и слуха». Одесса, 1989.

4. *Frijda N.H.* The emotions. Cambridge : Cambridge University Press, New York, Dell publishing, 1986.

5. *Бобе А. С., Конышев Д. В., Воротников С. А.* Система распознавания базовых эмоций на основе анализа двигательных единиц лица. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.

6. *Официальный* сайт Computervoicestressanalyser. URL: https://www.cvsa1.com/ (дата обращения: 10.05.2019).

7. *Брановицкий А. А.* Распознавание эмоций по голосу на основе машинного обучения // 54-я научная конференция аспирантов, магистров и студентов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, 2018. С. 52.

А. С. Сысоев
Липецкий государственный технический университет, Россия
e-mail: sysoev_as@stu.lipetsk.ru

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРАХ

Введение

Рассматривается задача построения гибридной интеллектуальной системы управления транспортными потоками в высокоскоростных транспортных коридорах для беспилотных и пилотируемых транспортных средств. В случае пилотируемого транспорта система передает указания участникам через интерактивные табло и посредством мобильного информирования. Для беспилотных (подключаемых) транспортных средств предусмотрен модуль передачи управляющих воздействий бортовым компьютерам. В исследовании представлена концептуальная схема регионального модуля интеллектуальной транспортной системы, описана модель участка транспортного коридора и алгоритма допуска к нему транспортных средств, обеспечивающего поиск минимального времени ожидания и движения всех участников в некотором участке системы, представлена концепция описания пропускной способности участка транспортного коридора и выбора наиболее значимых параметров, управление которыми может быть использовано для повышения уровня качества функционирования системы, а также описан механизм распознавания внештатных ситуаций, возникающих в коридоре, посредством анализа потокового видео.

1. Структурная модель регионального модуля интеллектуальной транспортной системы

В связи со значительным числом роста личного автомобильного транспорта населения и увеличивающимся объемом грузоперевозок с применением автотранспортных коридоров актуальной становится задача использования имеющегося транспортного потенциала России для создания системы управления дорожным движением, обеспечивающей оптимальное применение существующей инфраструктуры с минимальными затратами для ее модификации.

© Сысоев А. С., 2020

Одна из частных задач, представленная в стратегии национальной технологической инициативы [1], — создание высокоскоростных транспортных коридоров для пилотируемых и беспилотных транспортных средств, которые будут обеспечивать связанность территорий Российской Федерации и могут быть использованы для транзита между европейскими и азиатскими партнерами России. Исследование направлено на решение задачи построения концептуальной схемы регионального модуля интеллектуальной транспортной системы управления потоками транспортных средств в высокоскоростных коридорах.

В исследовании [2] представлен обзор имеющихся успешных проектов по реализации интеллектуальных транспортных систем в мире. Однако стоит заметить, что существующие частные решения, в том числе и построенные с применением методов искусственного интеллекта, могут быть рассмотрены как структурные элементы интеллектуальных транспортных систем. На рисунке 1 приведена концептуальная схема региональной интеллектуальной транспортной системы.

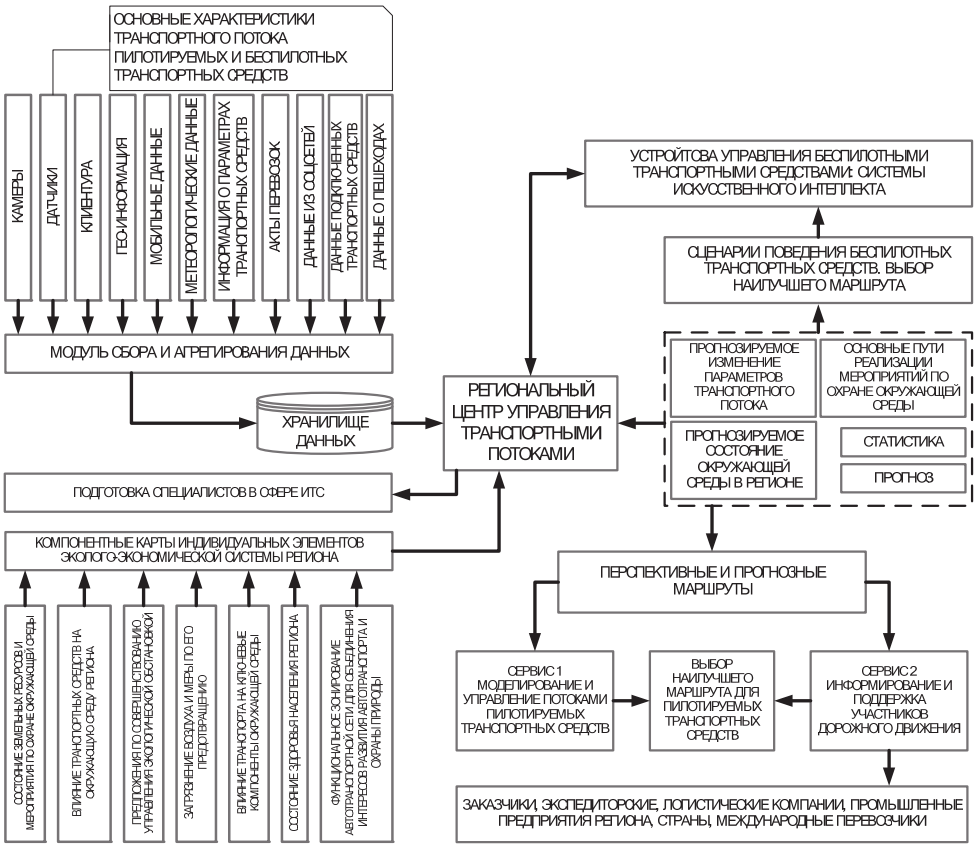


Рис. 1. Концептуальная схема региональной интеллектуальной транспортной системы

Региональный центр управления транспортными потоками наделен следующими функциями: сбор информации об условиях дорожного движения и актах единичных перевозок, обработка, анализ и хранение больших объемов данных, а также подготовка и переподготовка специалистов в области разработки и обслуживания интеллектуальных транспортных систем. Для принятия быстрых и эффективных решений задач управления система оперирует данными, полученными в режиме реального времени, — на основе зафиксированных значений ряда факторов находится решение задачи оптимизации некоторого критерия (критерия скорости или времени, критерия передвижения, критерия экологичности или некоторый агрегированный показатель).

Рассматриваемая гибридная модель интеллектуальной транспортной системы включает в себя комплекс алгоритмов описания параметров транспортных систем и управления ими для обеспечения заданного уровня функционирования.

2. Модель участка транспортного коридора и алгоритм управления доступом к нему

Рассмотрим участок транспортного коридора, который оборудован системой контроля доступа транспортных средств. Управление доступом в таких системах может быть построено несколькими способами (описание возможных стратегий представлено в исследованиях [3]). В зависимости от различных факторов, эта система может быть активна или нет. Для определения ее оптимальных параметров далее предложена формулировка и численное решение оптимизационной задачи, доставляющее глобальный минимум времени, требуемого для преодоления всего участка автомагистрали с учетом задержек на заездах (использован критерий минимального времени нахождения транспортных средств в системе).

На рисунке 2 представлена структура части транспортного коридора с съездом и заездом. Предлагается при формулировке и решении задачи рассматривать секции участка дороги двух типов. Разделение основывается на расположении точки конфликта транспортных потоков (заезда). В секциях первого типа (I) сначала располагается съезд с автомагистрали. Секции второго типа (II) более важны с позиции оптимизации, так как, управляя потоком именно здесь, можно добиться повышения качества функционирования системы в целом.

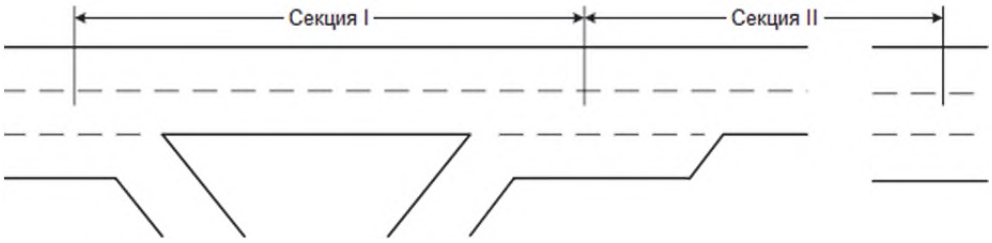


Рис. 2. Структура участка транспортного коридора

В секциях обоих типов рассматривается время, необходимое для преодоления участка пути, которое рассчитывается на основе данных, полученных в режиме реального времени. На подходах к объектам светофорной сигнализации, контролирующим доступ на основную дорогу, возникают транспортные задержки, вызванные характеристиками потоков и/или параметрами системы. Эти задержки, согласно условиям, указанным выше, относятся только к секциям типа II.

Для оценки времени движения по основной дороге использован подход, предложенный в [4], который определяет время как:

$$t = \begin{cases} \dfrac{L}{v(q)} \cdot q \cdot \Delta & \text{для ситуации ненасыщенного (без затора) потока,} \\ \dfrac{L}{v_{crit}} \cdot q \cdot \Delta + t_{loss} & \text{для ситуации насыщенного (затор) потока,} \end{cases} \quad (1)$$

где t — время движения по основной дороге, прив.авт.·ч; L — длина сегмента, км; $v(q)$ — скорость, км/ч; q — интенсивность транспортного потока, прив.авт/ч; Δ — длительность исследуемого временного интервала, ч; v_{crit} — критическая скорость, при которой достигается порог пропускной способности, км/ч; t_{loss} — временные потери, вызванные перенасыщением транспортного потока (пробкой), прив.авт.·ч.

Для определения скорости движения транспортных средств по основной полосе автомагистрали используется следующее соотношение [5]:

$$v(q) = \frac{v_0}{1 + \dfrac{v_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}},$$

где $v(q)$ — скорость, км/ч; q — интенсивность транспортного потока, прив.авт/ч; v_0, L_0, C_0 — параметры используемой модели.

Для оценки транспортной задержки на съезде на автомагистраль, вызванной большим количеством транспортных средств на основной дороге и/или наличием светофорного регулирования, применяется следующий подход [6]:

$$d(q) = \frac{0.5 \cdot C \cdot \left(1 - \dfrac{g}{C}\right)^2}{1 - \min\left(1, \dfrac{q}{c}\right) \cdot \dfrac{g}{C}} + 900 \cdot T \cdot \left(\frac{q}{c} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q}{c} - 1\right)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot \dfrac{q}{c}}{c \cdot T}} \right), \quad (2)$$

где $d(q)$ — среднее время задержки, с; C — время цикла регулирования, с; g — время разрешающей фазы цикла, с; q — интенсивность транспортного потока на подходе, прив.авт/ч; c — пропускная способность подхода, прив. авт/ч; T — длительность исследуемого периода, ч; k, I — параметры используемой модели (установлены в значения 1,1 и 0,5 соответственно).

Основываясь на результатах исследования [4], транспортные потери на основной дороге, вызванные перенасыщением транспортного потока, могут быть определены при помощи следующей модели:

$$t_{loss}(x) = A \cdot (x - 0{,}9)^B, \tag{3}$$

где t_{loss} — транспортные потери на основной дороге, вызванные перенасыщением транспортного потока, прив.авт.·ч, x — отношение интенсивности к пропускной способности ($x = v/c$); A, B — параметры модели.

Задача, далее сформулированная, — нелинейная многомерная задача глобальной оптимизации с ограничениями различного рода. В общем виде она имеет следующую постановку: найти

$$\min_{x \in R^n} \sum_{j=1}^{m} (t_j(x) + d_j(x)) \tag{4}$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} x^{\min} \le x \le x^{\max}, \\ g(x) \le 0, \\ h(x) = 0, \end{cases} \tag{5}$$

где $t_j(x)$ — общее время, необходимое для преодоления сегмента j, прив.авт.·ч; $d_j(x)$ — задержка на подходе к заезду на автомагистраль в сегменте j, прив.авт.·ч; x — искомый вектор оптимальных параметров, с; $x^{\min}$, $x^{\max}$ — набор ограничений для оптимальных параметров, с; $h(x)$, $g(x)$ — ограничения типа равенства и неравенства соответственно.

Решение поставленной задачи (4) при ограничениях (5) осуществлялось численно с применением алгоритма дифференциальной эволюции [7]. В исследовании [8] представлены численные результаты, которые показывают, что применение стратегии управления локальным доступом транспортных средств к высокоскоростному транспортному коридору — эффективный метод снижения загруженности коридора в часы пик.

3. Модель пропускной способности участка автомагистрали

При анализе высокоскоростных транспортных коридоров необходимо уделять внимание большому количеству параметров, один из самых важных среди которых — пропускная способность. Современные подходы предлагают ее стохастический характер. В таком случае рассматриваемый участок автомагистрали представляется системой массового обслуживания D/D/1 типа, где все доступные данные о пропускной способности разделены на два типа и предполагается использование концепции цензурирования данных. Временной интервал называется нецензурированным, если он содержит

наблюдаемое значение пропускной способности (такое возможно в случае транспортного затора, когда находящееся количество транспортных средств на участке транспортного коридора в точности совпадает с пропускной способностью), т. е. интервал i — нецензурированный, если наблюдаемое значение объема транспортного потока q_i вызывает транспортный затор в интервале времени $i + 1$. Однако если движение потока в интервале $i + 1$ свободное, то он называется цензурированным. Непараметрический подход, который позволяет идентифицировать функцию распределения пропускной способности в таком случае, — это метод Каплана-Майера. Применяя его к реальным данным о заторах в транспортных коридорах, возможно определить параметры найденной функции распределения Вейбулла

$$F_c(q) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{q}{b}\right)^a\right), \tag{6}$$

где $F_c(q)$ — значение функции распределения для определенного объема транспортного потока q, прив.авт./ч; a,b — параметры распределения.

Принимая во внимание доступные данные о пропускной способности в нецензурированных интервалах, а также оцененные с помощью модели (6) значения, используя теоретические знания о зависимости пропускной способности от ряда параметров, предлагается применять нейросетевую модель для получения значения пропускной способности в транспортном коридоре. Указанная модель имеет один скрытый слой, состоящий из восьми нейронов. В исследовании [9] приведен анализ чувствительности такой модели, построенный на использовании методов анализа конечных изменений [10].

В результате проведенного анализа выявлено, что наиболее значимыми факторами модели являются: количество полос движения (параметр транспортной системы, который может быть изменен путем использования полос для реверсивного движения), процент тяжелых транспортных средств (возможно ограничение на проезд таких средств по участкам транспортного коридора в определенное время суток).

В [11] предлагается концепция построения базы продукционных правил для выработки управляющих воздействий на участок транспортного коридора.

4. Модель распознавания происшествий в транспортном потоке

Одна из важных задач при качественном управлении транспортным коридором — распознавание внештатных ситуаций и скорейшее реагирование на них. Одним из путей решения поставленной задачи является применение нейронной сети глубокого обучения для оценки вероятности возникновения автомобильной аварии в потоковом видео с участков транспортного коридора. В [12] содержится описание такой нейросетевой структуры. На фундаментальном уровне выделено две основные части нейросети: сверточная основа и

полносвязный классификатор. Основа представлена одной известной архитектурой CNN-VGG16. Это сверточная сеть, заранее обученная более чем на 1,4 млн экземпляров, способная распознавать 1000 классов различных изображений.

Подобная архитектура разработана в 2014 г., однако существуют и другие реализации CNN. Стоит отметить, что данная модель не самая удобная и быстрая, однако ее эффективность оправдывает выбор. В сети при обучении использовано 100 эпох и 35 стеков слоев. Согласно источникам такое количество слоев — оптимально для своих групп.

Ключевым фактором при построении модели стала точность распознавания объектов. Основных методов, благодаря которым удалось значительно повысить эффективность всей сети, несколько: использование заранее обученной нейросети, выделение признаков с расширением данных и дообучение полносвязного классификатора.

Масштаб обучения и обобщенность данных, примененных при обучении VGG16, позволяет использовать полученную в результате обучения сети пространственную иерархию признаков. Так как VGG16 не хранит информации о классе автотранспортных происшествий, то имеет смысл переобучить и последний блок сверточной основы. После определения основы было решено применить метод выделения признаков с расширением данных. Этот метод — часть глобального метода дообучения.

Для проведения работы была использована выборка, предложенная авторами работы Anticipating accidents in dashcam videos, состоящая из множества различных видео, представляющих из себя записи с видеорегистраторов. Выборка содержит записи как и с моментами происшествий, так и без них. Весь набор состоит из 1730 видео, поделенных случайным образом на тренировочную и проверочную часть.

Таким образом, тренировочная часть — это 1284 видео, среди которых 455 положительных и 829 отрицательных экземпляров. Проверочная часть содержит 466 отрезков, поделенных на 165 положительных и 301 отрицательный образец соответственно. В дополнение к этому проверочная часть разделена пополам, чтобы сформировать тестовую выборку, на которой проверялось бы качество распознавания обученной нейросети. Также в тестовую выборку вошли видеозаписи из сводок новостей местных информационных порталов. Результаты, полученные в результате работы нейросети, составляют 97% на тренировочной выборке и 60% на тестовой. Данный результат можно считать достойным. Стоит также отметить, что это не лучший результат. Если переобучить сеть, то можно улучшить точность на тестовых данных на несколько процентов, а возможно, даже и больше.

Заключение

В работе представлен комплекс моделей и алгоритмов, возникающих при построении интеллектуальной транспортной системы, предполагающей управ-

ление высокоскоростными транспортными коридорами за счет построения маршрутов следования транспортных средств и средств специальной техники для устранения последствий внештатных ситуаций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10034).

Список литературы

1. *Национальная* технологическая инициатива (НТИ) // НТИ2035. URL : http:// nti2035.ru, 2019.

2. *Sysoev A. et al*. Conceptual scheme of regional module for intelligent transportation and logistics system // Proceedings of the Fourth International Conference on Traffic and Transport Engineering ICTTE, September 27—28th, 2018 Belgrade, Serbia. P. 139—146.

3. *Sysoev A., Hohmann S., Geistefeldt J*. Differential Evolution Approach to Calculate Optimal Metering Rates (Differential Evolution als Ansatz für die koordinierte Steuerung von Zuflussregelungsanlagen). Tagungsdokumentation zur HEUREKA'17 — Optimierung in Verkehr und Transport. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2017.

4. *Geistefeldt J., Hohmann S*. Model-Based Estimation of Congestion-Related Travel Time Losses on Freeways // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014. No. 2470.

5. *FGSV*. Handbuch fuer die Bemessung von Strassenverkehrsan lagen (German Highway Capacity Manual, HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV Verlag GmbH, Koeln, 2014.

6. *TRB*. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 2010.

7. *Storn R., Price K*. Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces // Journal of Global Optimization 11(4): 341—359.

8. *Sysoev A., Hohmann S., Geistefeldt J*. Differential Evolution Approach to Calculate Optimal Ramp Metering Rates // International Journal for Traffic and Transport Engineering. 2017. Vol. 7, iss. 1.

9. *Sysoev A., Voronin N*. Approach to Sensitivity Analysis of Stochastic Freeway Capacity Model Based on Applying Analysis of Finite Fluctuations // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2019. P. 621—626.

10. *Sysoev A. et al*. Sensitivity Analysis of Neural Network Models: Applying Methods of Analysis of Finite Fluctuations // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2019. Vol. 63, iss. 4. P. 306—311.

11. *Сысоев А.С., Хабибуллина Е.Л.* Функциональная модель экспертной системы управления потоками транспорта в высокоскоростных транспортных коридорах // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11—13 ноября 2019 г. Воронеж : Научно-исследовательские публикации, 2019. С. 1114—1120.

12. *Найденов А.А., Сысоев А.С.* Разработка системы детектирования автотранспортных происшествий на основе данных видеофиксации и методов машинного обучения // Управление большими системами : сборник трудов XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых. 2019. С. 373—378.

О. А. Тягунов
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия
e-mail: tyagunov@mirea.ru

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Введение

Рассмотрена постановка задачи многокритериального выбора параметров управляющих устройств систем управления и предложен алгоритм решения задачи, основанный на зондировании многомерного пространства параметров с последующим построением приближенной границы точек Парето. Приведен численный пример, демонстрирующий эффективность предложенного алгоритма.

Важная особенность как классических, так и современных [1; 2] методов синтеза систем управления — выбор того или иного варианта структуры и параметров управляющего устройства происходит по одному критерию эффективности. Однако для большинства задач синтеза выбор управляющего устройства должен производиться по нескольким, часто противоречивым, критериям. Например, для хорошо известной задачи синтеза регулятора следящей системы в качестве критериев могут использоваться: установившиеся значения позиционной и скоростной ошибки, время регулирования, перерегулирование и т. д. В этом случае более корректно говорить о задачах многокритериального синтеза управляющих устройств.

Проблема выбора решения в случае нескольких критериев, или проблема векторной (многокритериальной) оптимизации, впервые возникла при решении задач исследования операций. Для них характерна противоречивость критериев и необходимость использования некоторой схемы разумного компромисса, позволяющей повышать качество решения по всем локальным (частным) критериям. Решению задач многокритериальной оптимизации в общей постановке посвящено очень большое число работ, из которых отметим [3; 4].

Следует заметить, что задачам многокритериальной оптимизации динамических систем уделялось существенно меньшее внимание. Можно отметить цикл исследований, выполненных М. Е. Салуквадзе [5], в которых рассматривались многокритериальные аналоги принципа максимума Понтрягина и метода аналитического конструирования регулятора, а также работы по многокритериальным статическим и динамическим задачам в условиях неполной информации [6; 7]. Отметим работы [8; 9], в которых предложен принцип рациональной организации, заключающийся в том, что ограниченные ресурсы в системе подобраны так, чтобы различные схемы компромисса при-

© Тягунов О. А., 2020

водили к близким результатам. При этом удается аналитически вычислить оптимизирующий векторный функционал, являющийся нелинейной сверткой специального вида. Наконец, обратим внимание на работу [10], в которой обсуждалась задача многокритериального выбора регуляторов систем управления.

Настоящая работа посвящена рассмотрению особенностей решения задачи многокритериального выбора параметров управляющих устройств систем управления.

1. Постановка задачи многокритериального выбора параметров управляющих устройств в линейных системах управления

Пусть математическая модель системы управления задана либо в виде структурных схем, передаточных функций и частотных характеристик, либо в пространстве состояния. В целом в распоряжении исследователя должна быть возможность вычисления по заданной структуре и параметрам математической модели системы управления значений совокупности (множества) критериев качества, по которым можно объективно оценивать эффективность выбранного решения.

Как известно, множество критериев качества может быть разбито на две группы. Первая группа описывает свойства системы в установившемся (статическом) режиме — это прежде всего ошибки системы после этапа завершения переходных процессов. Вторая группа показателей предназначена для описания динамических свойств (свойств системы в переходном процессе).

Группа динамических показателей делится на прямые и косвенные. Прямые показатели определяются непосредственно по кривой переходного процесса в системе при выбранном варианте типового входного воздействия (единичный скачок и т. д.). К прямым показателям обычно относят время регулирования t_p, перерегулирование σ и т. д.

Косвенные показатели носят, как правило, характер экспресс-оценок и вычисляются по тем или иным характеристикам системы. Среди косвенных показателей обычно рассматривают интегральные (интегральные квадратические и обобщенные квадратические оценки), частотные (запасы устойчивости по амплитуде и по фазе) и корневые оценки (степень устойчивости и колебательность). В целом число критериев (размерность вектора показателей) может достигать величины порядка 10. К сожалению, несмотря на большое число публикаций, посвященных задачам синтеза, практически отсутствуют работы, в которых решалась бы задача обоснованного выбора состава группы критериев качества в задачах синтеза регуляторов для систем управления. Тогда можно дать следующее определение:

Пусть структура управляющего устройства (регулятора) известна; необходимо определить значения параметров (настроек) регулятора, обеспечивающих экстремум каждого из выбранных критериев качества системы.

2. Метод построения эффективных точек Парето в задаче многокритериального выбора параметров управляющих устройств в линейных системах управления

Следует заметить, что в подавляющем число работ, посвященных многокритериальным задачам, основное внимание уделяется этапу выбора принципов нахождения компромисса, позволяющего находить решение по всем локальным (частным) критериям с учетом их противоречивого характера, а важнейшему этапу решения многокритериальных задач (нахождению эффективных точек Парето) — существенно меньшее внимание. Не будем давать строгое определение точек Парето, с которым можно ознакомиться в [3], заметим лишь, что в общем случае множество точек Парето имеет достаточно сложную структуру и при решении практических задач приходится пользоваться численными методами.

Рассмотрим метод построения приближенных точек Парето, основанный на применении процедуры сканирования области допустимых значений пространства параметров управляющего устройства с последующей операцией построения границы области критериального пространства, которой и принадлежат, как известно, точки Парето [3; 4]. Впервые этот метод предложен И. М. Соболем и развит в работах И. М. Соболя и Р. Б. Статникова [11; 12].

Отметим основные особенности метода.

1. Производится случайное зондирование многомерного пространства параметров и с помощью имитационной системы вычисляются значения вектора критериев оптимизации исследуемой системы, причем в качестве пробных точек в пространстве параметров используются точки равномерно распределенных последовательностей. Для этой цели используются ЛП$_\tau$ -последовательности, введенные И. М. Соболем и обладающих наилучшими характеристиками равномерности среди всех известных в настоящее время равномерно распределенных последовательностей. В итоге строится матрица (таблица) испытаний.

2. После выполнения операций сортировки столбцов таблицы удается в многомерном пространстве параметров построить область, в которой содержатся искомые решения.

3. Данные п. 2 позволяют в пространстве критериев (критериальном пространстве) построить многомерную поверхность эффективных (неулучшаемых) точек (точек Парето), среди которых и следует выбирать устраивающее исследователя (лицо, принимающее решение (ЛПР)) решение.

4. Среди множества эффективных точек с применением принятой ЛПР схемы выбора компромисса выделяются устраивающие ЛПР одно или несколько решений.

Отметим основные достоинства предложенного метода.

1. Метод обладает свойством глобальности, так как использование на первом этапе режима многомерного зондирования пространства параметров

равномерно распределенными последовательностями позволяет выделить область допустимых решений и практически исключить возможность пропуска точек локального минимума.

2. Применение в процессе поиска решения активного диалога с ЛПР в сочетании с хорошо известными локальными методами оптимизации позволяет находить решения, действительно устраивающие ЛПР. Идея использования диалоговых алгоритмов выделения компромиссных точек разрабатывалась также А. С. Рыковым [4].

3. Размерность решаемых задач может быть достаточно большой, в частности размерность пространства параметров может достигать нескольких десятков, а размерность критериального пространства — 10÷15.

4. Метод позволяет решать достаточно важную задачу выделения значимых критериев оптимальности: среди вводимых ЛПР критериев оптимальности имеются зависимые друг от друга критерии. Метод дает возможность получать количественные оценки зависимости (корреляции) критериев и, как следствие, выделять действительно значимые критерии оптимальности.

3. Программная реализация метода построения эффективных точек Парето в задаче многокритериального выбора параметров управляющих устройств в линейных системах управления

Рассмотренный метод реализован в качестве модуля многопараметрической оптимизации программного комплекса «Анализ систем», предназначенного для решения задач моделирования и исследования широкого класса систем автоматического управления и удобного для изучения основных разделов теории автоматического управления студентами различных специальностей [13]. В существующей версии программного комплекса, модернизированной А. А. Кормилкиным, в качестве критериев оптимизации могут использоваться: интегральная квадратическая ошибка; время регулирования; коэффициент перерегулирования; время нарастания переходного процесса; декремент затухания; степень устойчивости; колебательность; комплексный критерий.

В последнем случае формирование комплексного критерия производится в виде линейной формы перечисленных выше критериев с положительными коэффициентами, задаваемыми пользователем и отражающими значимость каждого из частных критериев. В случае двух задаваемых критериев на плоскости критериального пространства имеется возможность выделения точек Парето.

Рассмотрим пример использования рассмотренного метода при решении следующего примера. Пусть линейный объект управления описывается передаточной функцией следующего вида:

$$W_{об}(s) = \frac{k}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)(1+T_3 s)s^2}. \qquad (1)$$

С помощью (1) задается динамика бокового движения транспортного робота с двумя ведущими и двумя парами опорных колес, расположенных на продольной оси симметрии платформы тележки спереди и сзади на одинаковом расстоянии от центра с учетом динамических характеристик исполнительных двигателей [14].

С помощью режима «Синтез» программного комплекса «Анализ систем» находим передаточную функцию регулятора в виде

$$W_p(s) = k_n + k_\partial s + k_{\partial\partial} s^2 . \qquad (2)$$

Выберем в качестве критериев оптимальности степень устойчивости и колебательность. В соответствии с требованиями [1] настройки регулятора (2) должны обеспечить максимум степени устойчивости и минимум колебательности. На рисунке 1 представлено распределение значений критериев на плоскости критериального пространства, причем ломаной линией показана приближенная кривая Парето. Следует заметить, что в программе для достижения максимума степени устойчивости отыскивается минимум обратной ей величины.

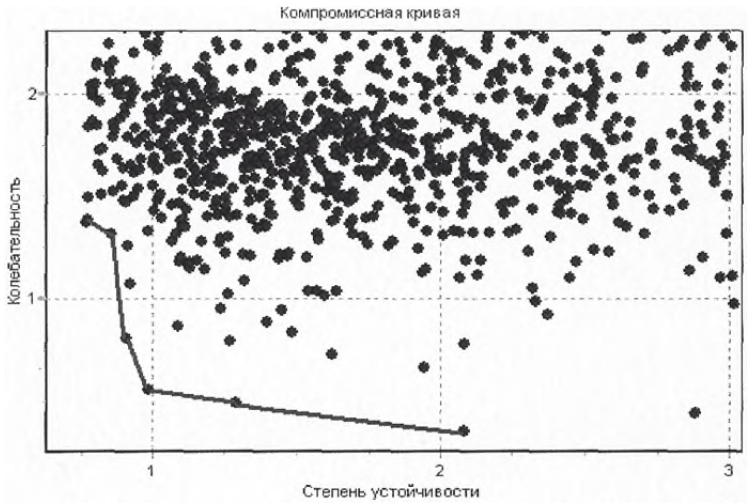


Рис. 1 Распределение значений критериев
на плоскости критериального пространства

На рисунке 2 и 3 приведены графики переходного процесса для наилучших значений критериев «степень устойчивости» и «колебательность» соответственно. На рисунке 4 — график переходного процесса для ошибки для одного из возможных вариантов (компромиссного варианта по Парето). Как известно, среди точек, лежащих на кривой Парето, проектировщику и следует выбирать устраивающий его вариант настроек регулятора.

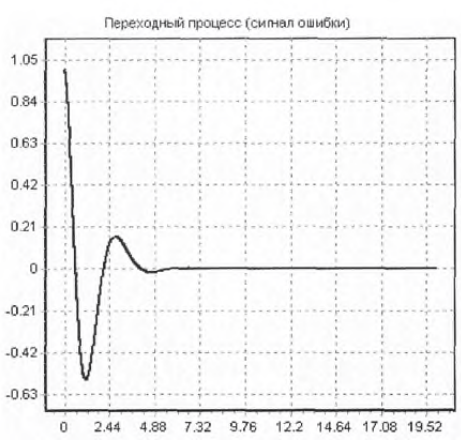


Рис. 2. График переходного процесса для наилучшего значения критерия «степень устойчивости»

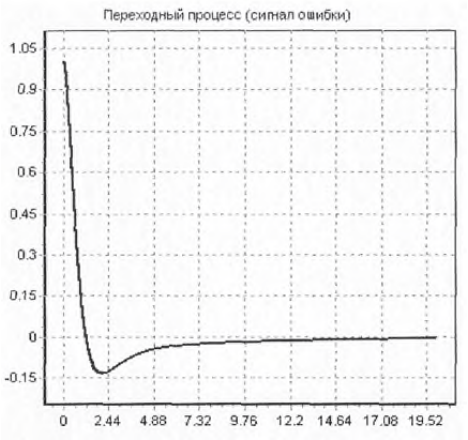


Рис. 3. График переходного процесса для наилучшего значения критерия «колебательность»

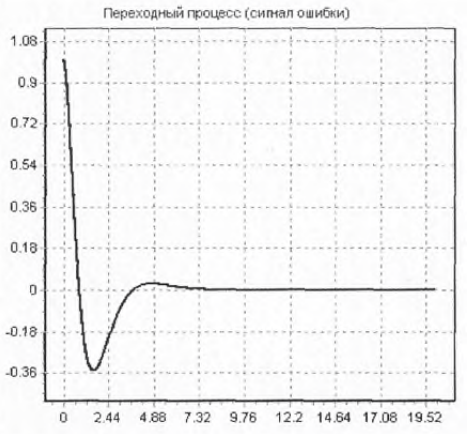


Рис. 4. График переходного процесса для ошибки для компромиссного варианта решения по Парето

Заключение

Комплекс программных средств «Анализ систем» применялся в качестве базового средства при изучении студентами ряда вузов Российской Федерации теории автоматического управления и других смежных дисциплин, в том числе и в дистанционном режиме с использованием сети Интернет; в частности, он включен в состав работы, отмеченной премией Правительства Российской Федерации за 2000 год за создание учебно-лабораторных комплексов и программно-алгоритмического обеспечения для подготовки специалистов по робототехнике, мехатронике и автоматизации производства для технических высших учебных заведений.

Список литературы

1. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. М. : Физматлит, 2003. Т. 1.
2. *Поляк Б. Т., Щербаков П. С.* Робастная устойчивость и управление. М. : Наука, 2002.
3. *Подиновский В. В., Ногин В. Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М. : Наука, 1982.
4. *Рыков А. С.* Методы системного анализа: многокритериальная и нечеткая оптимизация, моделирование и экспертные оценки. М. : Экономика, 1999.
5. *Салуквадзе М. Е.* Задачи векторной оптимизации в теории управления. Тбилиси : Мецниереба, 1975
6. *Жуковский В. И., Салуквадзе М. Е.* Оптимизация гарантий в многокритериальных задачах управления. Тбилиси : Мецниереба, 1996.
7. *Жуковский В. И., Салуквадзе М. Е.* Риски и исходы в многокритериальных задачах управления. Тбилиси : Интелекти, 2004.
8. *Воронин А. Н.* Принцип рациональной организации в многокритериальных задачах управления // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. 1979. №10.
9. *Колесников А. А., Гельфгат А. Г.* Проектирование многокритериальных систем управления промышленными объектами. М. : Энергоатомиздат, 1993.
10. *Зотов М. Г.* Многокритериальное конструирование систем автоматического управления. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
11. *Соболь И. М.* Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. М. : Наука, 1969.
12. *Соболь И. М., Статников Р. Б.* Постановка некоторых задач оптимального проектирования при помощи ЭВМ. Препринт №24. М. : Ин-т прикладной математики АН СССР, 1977.
13. *Евстигнеев Д. В., Тягунов О. А.* Программный комплекс для исследования систем автоматического управления // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : сб. тр. Междунар. науч.-техн. семинара. М. : МАИ, 1998.
14. *Мосяков Д. Е., Тягунов О. А.* Моделирование роботов : учеб. пособие. М. : МИРЭА, 1997.

О. В. Федоров
НГТУ им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия,
e-mail: fov52@mail.ru

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИДОВОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Введение

Ключевой момент при представлении любой сложной системы — переход от организмоцентрического мышления к популяционному и широкое использование понятия «ценоз», введенное К. Мебиусом для естественных систем.

© Федоров О. В., 2020

В настоящее время широкое распространение получили ценозы искусственного происхождения: ценозы технических изделий (техноценозы), информационные ценозы (информценозы), социальные (социоценозы), ценозы экономических сфер общества (экоценозы). Излагаемый подход к созданию и управлению ценозами искусственного происхождения опирается, с одной стороны, на изучение ценозов и классификацию, оперирующую понятиями: «особь»; «популяция»; «вид»; «семейство»; «каста», с другой — развивает теоретические представления А. А. Ляпунова.

Индивидуальность каждого ценоза объясняется его построением на основе постулатов, не сводимых к фундаментальным постулатам классической физики. Например, биоценоз образован различными видами, в том числе и по времени происхождения. Применительно к технике как аналогу биологии назовем асортицей явление комплектования любых ценозов искусственного происхождения разнотипными изделиями с низкой общей повторяемостью и из нескольких поколений, а вариофикацией — явление роста числа видов, выпускаемых и эксплуатируемых на предприятиях изделий (оборудования). Так как видообразование в технике происходит быстрее, то исследование верификации полезно для вычисления общих закономерностей эволюции в технике. Любой ценоз состоит из «свободно» выбранных видов с практически бесконечным, математически счетным, числом элементов-особей. Устойчивость структуры ценозов проявляется в медленном росте числа видов при увеличении выборки, в отсутствии зависимости характера распределения от выбранного для исследования семейства, от времени создания или географического местоположения. Для любого ценоза идентичны математические модели структуры распределения популяций по численности образующих их особей. Но механизм отбора определяется физической сущностью элементов-особей: для биоэволюции действует физический отбор; для эволюции систем искусственного происхождения — информационный.

Следует отметить, что закон естественного отбора используется лишь для формализованного описания информационного отбора. Любое предприятие можно представить как диаграмму вложенности технических ценозов различного производственного назначения. Например, ценозов транспорта, ценозов оргтехники, ценозов производственного оборудования, осуществляющих определенные технологические процессы.

Данное направление исследований соответствует разработкам интеллектуальных сетей в электроэнергетике [1—3].

1. Основные положения структурного анализа

В результате научно-технического прогресса качественно изменяется оборудование предприятий при одновременном резком количественном росте числа электродвигателей (ЭД), входящих в систему электрохозяйства предприятия.

Управление сформировавшейся совокупностью ЭД предприятий можно улучшить, оптимизируя существенные технико-экономические параметры.

Но эффективность этого управления будет качественно иной, если воздействовать на совокупность этих же электродвигателей в процессе проектирования и создания электрохозяйства предприятия.

В соответствии с [4] электрохозяйство предприятия можно рассматривать как электротехническую совокупность, а ЭД — как семейство изделий этой совокупности. В определенном смысле такое выделение совпадает с классом высших классификационных группировок, принятых единым классификатором продукции.

Из одного семейства электрооборудования выделяется вид, применительно к ЭД можно считать видом электродвигатель, отличающийся качественной характеристикой, например величиной номинальной мощности $P_н$, номинальной частотой вращения $n_н$ и наименованием.

Исследование совокупности видов сводится к их системному описанию как целостности комплексом показателей и к структурному описанию, которое основано на понятии эквивалентности: совокупность образована элементами-индивидуумами. Индивидуумы одного вида образуют популяцию. Виды электродвигателей, каждый из которых представлен равным количеством индивидуумов, создают группы. Группа — множество, образованное популяциями одинаковой численности.

Распределение видов (видовое распределение) — это распределение популяций одинаковой численности по группам. Однозначно описывая соотношение количества видов и численность каждого вида, оно служит теоретической основой предлагаемого подхода.

Перечень индивидуумов из генеральной совокупности (или какой-либо выборки) и их классификация по видам позволяют составить таблицу рангового распределения, где виды располагаются в порядке уменьшения численности их популяции, т. е. осуществляется ранжирование.

Ранговое распределение преобразуется в видовое или получается сразу из полного перечня индивидуумов. Видовое распределение численности популяций по группам информативнее и позволяет сделать больше содержательных выводов. Таблица видового распределения получается из перечня индивидуумов, если выбрать вначале все виды, встретившиеся по одному разу, т. е. популяции, состоящие из одного индивидуума $a_1 = 1$ (они образуют первую группу $k_1 = 1$), общее число видов в которой W_1, численность индивидуумов в этой группе a_1W_1. Затем выбрать все виды, представленные двумя индивидуумами: $a_2 = 2$, $к_2 = 2$, W_2, a_2W_2. Далее выбираются все виды, представленные тремя индивидуумами и т. д. Последовательность W_i называется эмпирическим видовым распределением (распределением видов). Число строк в такой таблице равно числу групп — k .

Видовые распределения отличаются характером изменения W_i. Достаточно полно распределение описывается обобщающими показателями:

— количеством популяций, в котором выделяют самую мощную популяцию N_0;

— числом индивидуумов U одного семейства

$$U = \sum_{i}^{k} a_i W_i; \tag{1}$$

— числом видов S

$$S = \sum_{i=1}^{k} W_i; \tag{2}$$

— количеством групп k;
— средней повторяемостью видов d

$$d = \frac{U}{S}; \tag{3}$$

— непрерывной кривой распределения, используемой в качестве аппроксимирующей зависимости при обработке эмпирических распределений

$$W_x = \frac{W_o}{x^{\alpha}} = W_o X_{\alpha}, \tag{4}$$

где W_o — численность индивидуумов в первой группе $W_1 = [W_o]$; $x \in [1, \infty]$ — непрерывный аналог мощности численности популяций i (i — дискретная величина); α — постоянная распределения; ω_1 — относительной частотой появления группы, определяемая эмпирически

$$\omega_I = \frac{W}{S_i}. \tag{5}$$

В выполненном анализе вдовых структур оборудования различных промышленных предприятий использован и показатель удельный вес

$$\omega_i^{?} = \frac{\omega_i}{\omega_{iAЭС}} 100\%, \tag{6}$$

где $\omega_{i\text{АЭС}}$ — относительная частота появления ЭД i-й группы в целом по исследованным предприятиям.

В соответствии с этими положениями проанализированы генеральные и ремонтные совокупности ЭД ряда промышленных предприятий регионов РФ. Анализ проводился с помощью специально разработанного программного комплекса STRUCTURE, на который получено свидетельство об официальной регистрации программ Российским агентством по патентам и товарным знакам. Анализ этих совокупностей покажем на примере электродвигателей — общих элементов силового канала электроприводов как регулируемых, так и нерегулируемых.

В целом по атомным электрическим/тепловым станциям (АЭС/АТС) количество видов ЭД первых трех групп значительно меньше, а численные зна-

чения показателя, «средняя повторяемость видов» больше, чем на промышленных предприятиях. Характер видовых распределений ЭД представлен на рисунке 1.

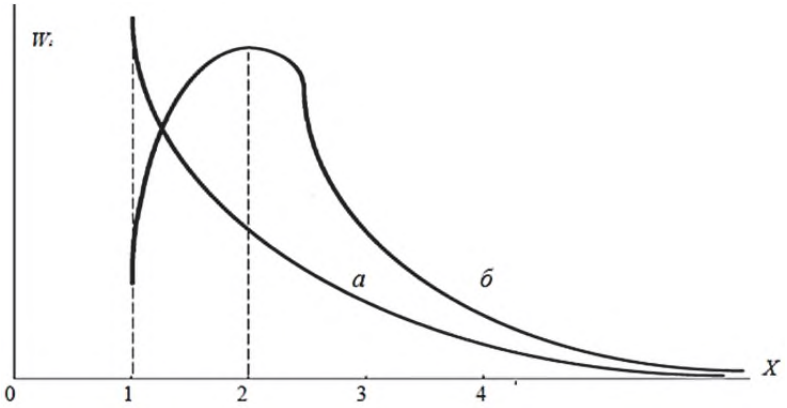


Рис. 1. Характер видовых распределений ЭД:
а — на общепромышленных предприятиях; *б* — на АЭС/АТС

2. Управление структурой установленного электрооборудования

В настоящее время ремонт эксплуатируемого оборудования на 80—90 % осуществляется непосредственно силами промышленных предприятий объектов. В докладе приводится объяснение этой особенности видового распределения (табл.), которое требует особой структуры ремонтного персонала, ответственного за эксплуатацию механического и электрического оборудования объекта. Отражены возможные способы управлений видовыми структурами ЭД и существующие ограничения при этом. Сокращаемое количество видов ЭД первых групп должно быть восполнено за счет увеличения количества ЭД других групп.

Показатели видового распределения ЭД АЭС/АТС

Структурное подразделение АЭС	Количество видов ЭД первых трех каст, %	Относительная частота появления ЭД первых трех каст			Численные значения	
		ω_1	ω_2	ω_3	Числа видов, S	Повторяемости видов, d
Машзал	38,9	0,028	0,333	0,028	36	5,77
Спецкорпус	43,5	0,113	0,274	0,048	62	6,31
Вспомогательные сооружения	55,7	0,180	0,279	0,098	61	4,80
Реакторное отделение	64,4	0,220	0,271	0,153	59	4,55
В целом по АЭС	44,5	0,117	0,241	0,088	137	8,47

Заключение

Наиболее целесообразно для анализа видовых структур электрооборудования использовать его генеральною, а не ремонтную совокупность. В результате обработки материалов опросов специалистов электроремонтных служб установлено, что показатель степени снижения трудоемкости ЭД (Z) однородными партиями изменяется в пределах 0,1—0,4. Большее значение этого коэффициента имеют предприятия, располагающие собственной хорошей электроремонтной базой. На рисунке 2 показано изменение трудоемкости капитального ремонта асинхронного ЭД с короткозамкнутым ротором напряжением до 500 В и $P_н$ = 30 кВт ($T_{рем}$ = 45 чел.-ч) в зависимости от объема ремонтной партии. Пунктирными линиями обозначены предельно возможные значения трудоемкости ремонта. Производство электроремонтных работ ЭД партиями обеспечивает повышение производительности труда на основных участках электроремонтного цеха на 8—10 %.

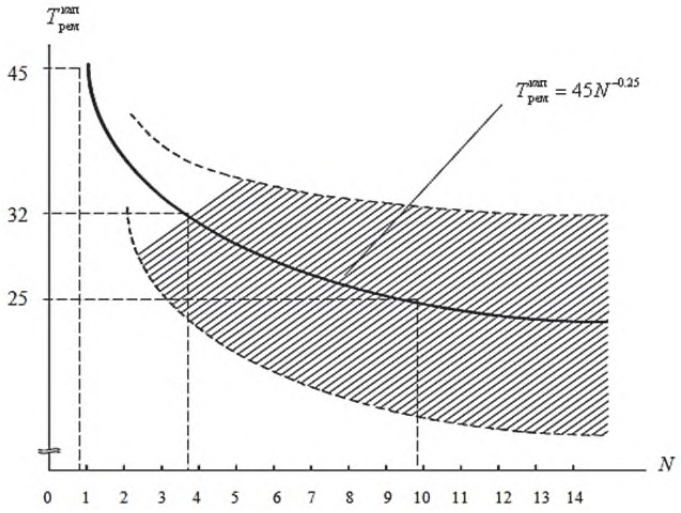


Рис. 2. Зависимость трудоемкости от величины ремонтной партии

Общий характер распределений множества ЭД и множества их элементов-компонентов по повторяемости типов совпадают. Поэтому видовое распределение электродвигателей (как и другого электрооборудования) можно представить как иерархическую модель видовой структуры. На высшем уровне рассматриваются видовые распределения множества ЭД предприятия (первый уровень), а на низшем уровне (второй уровень) — видовые распределения множества элементов-компонентов этих электродвигателей.

Этот второй уровень может быть представлен двумя подуровнями, где первый подуровень — элементы-компоненты ЭД, а второй подуровень — элементы-компоненты различных полупроводниковых преобразователей

электроприводов. По объему выборки первый подуровень более представителен, чем второй, за счет нерегулируемых ЭД предприятия. Практическое применение такой иерархической модели электроприводов промышленных предприятий обеспечивает: уменьшение номенклатуры запасных элементов-компонентов электроприводов, что определяется логистическим подходом к ремонтам, особенно при преобладающем децентрализованном его проведении; более реалистические прогнозы в потребности элементов-компонентов электродвигателей; векторную оптимизацию всех ресурсов предприятия. Сокращается омертвление финансовых ресурсов предприятия за счет уменьшения номенклатуры запасных частей на резервных складах предприятия.

В результате анализа наработок в сфере развития технологий и оборудования, а также в интеллектуальной энергетике считаем необходимым разработки комплексных программ для принятия решений при эксплуатации энергетических объектов на основе технологий интеллектуального анализа данных, обеспечивающих достоверную и современную диагностику технического состояния типового электрооборудования предприятий и решений проблем энергосбережения.

Список литературы

1. *Волкова И. О.* Интеллектуальная энергетика в России: оценка существующего потенциала развития // ЭКО. 2016. № 12 (510). С. 90—100.

2. *Шмидт И. А., Петроченков А. Б., Даденков Д. А.* Разработка системы хранения временных рядов в документо-ориентированной базе данных // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17, № 4. С. 5—11.

3. *Концептуальная* модель представления знаний при построении интеллектуальных информационных систем // Известия ЮФУ. 2014. № 7. С. 109—117.

4. *Кудрин Б. И.* Информационное и ценологическое проектирование // Федоровские чтения. 2017. С. 12—19.

А. А. Филиппов
Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), Россия
e-mail: al.filippov@ulstu.ru

АРХИТЕКТУРИЗАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОПЫТА ПРЕДЫДУЩИХ ПРОЕКТОВ

Введение

Сложность разработки и поддержки программных систем (ПС) достигла уровня, при котором необходимо применять принципы и процедуры процесса архитектуризации [1]. Архитектуризация — осмысление и описание архитек-

© Филиппов А. А., 2020

туры ПС для лучшего понимания сути и основных свойств, имеющих отношение к поведению, составу и развитию и влияющих на выполнимость, полезность и сопровождаемость системы. Описание архитектуры используется для координации заинтересованных сторон, вовлеченных в процессы разработки, внедрения, поддержки и применения ПС. Артефакты проектирования, составляющие основу архитектуры ПС, позволяют систематизировать методы и подходы процесса архитектуризации и описания архитектуры в рамках заинтересованных сторон и предметных областей.

Процесс архитектуризации определяет требования и особенности разработки, функционирования и сопровождения ПС на всех стадиях жизненного цикла системы.

В рамках данного исследования описание архитектуры ПС рассматривается как совокупность артефактов проектирования, полученных в процессе архитектуризации. При этом ПС разрабатывается для функционирования в рамках некоторого контекста. Контекст определяет множество архитектурных требований и ограничений, непосредственно влияющих на состав и характеристики артефактов проектирования [1].

Разработка любой ПС состоит из нескольких этапов, качество выполнения которых влияет на качество итоговой системы [2]. Основным этапом разработки новой ПС является стадия проектирования, в рамках которой формируется описание архитектуры и модель разрабатываемой системы. Качественный проект новой ПС важен, так как от него зависит качество функционирования всего комплекса возлагаемых на новую систему задач.

Далее выполняется этап кодирования — непосредственная разработка новой ПС. Успех реализации ПС напрямую зависит от качества данного этапа, однако качество результата этапа конструирования во много зависит от качества проекта ПС, полученного в результате процесса проектирования. Только правильно составленный проект позволяет добиться нужного результата и осуществить разработку действительно качественной и конкурентоспособной ПС.

Чем на более позднем этапе разработки ПС обнаружены ошибки проектирования, тем больше ресурсов требуется для их исправления [2]. Следовательно, удачные проектные решения, полученные при работе над предыдущими проектами, должны быть использованы в процессе реализации новых проектов.

Опыт предыдущих проектов обычно содержится в различных артефактах проектирования: проектная документация в виде слабоструктурированного текста на естественном языке; множество проектных диаграмм, обычно представленных в нотации UML; исходный код; множество моделей данных объектов проблемной области, представленных в виде сущностей и связей реляционных баз данных; различные структурированные информационные ресурсы, описывающие особенности разработки, развертывания и настройки окружения проекта, обычно представленные в виде wiki-ресурсов.

Форматы представления и методы хранения артефактов проектирования различны, что затрудняет их анализ, извлечение из них единиц проектного опыта (ЕПО) и последующее их применение в процессе работы над новыми программными системами.

Нахождение и формализация подобных ЕПО позволит сформировать базу знаний (БЗ) проектной организации для автоматизации решения следующих задач: накопление множества проектных решений, используемых в проектной организации; извлечение часто применяемых ЕПО; анализ качества полученных ЕПО; определение предпочтений в выборе некоторых ЕПО проектировщиками, архитекторами и разработчиками; выявление показателя изменения динамики интереса к различным ЕПО во времени; прототипирование проекта на основе анализа технического задания или спецификации и множества ЕПО, зафиксированных в БЗ, и т. д.

Основная задача данного исследования — изучение возможностей и ограничений методов анализа данных и инженерии знаний для построения баз знаний, способных автоматизировать процесс проектирования программных систем. Извлеченные знания архитекторов, проектировщиков и разработчиков в виде ЕПО будут положены в основу процесса автоматизированной архитектуризации новых ПС с учетом опыта предыдущих проектов.

1. Теоретико-множественное представление модели базы знаний проектной организации

Модель базы знаний проектной организации состоит из пяти компонентов, каждый из которых позволяет описывать и хранить знания о проектной организации и ее особенностях: сведения о различных предметных областях, о моделях жизненного цикла разработки ПС; о проектах ПС; об особенностях и структуре представления артефактов проектирования; единицы проектного опыта.

1.1. Онтология предметной области

Онтология предметной области позволяет адаптировать БЗ проектной организации к особенностям предметных областей, в рамках которых проводилась работа над предыдущими проектами. Фактически онтология предметной области выступает некоторым базисом формирования единого понятийного аппарата, объединяющего и унифицирующего сущности различных предметных областей, имеющих единую семантику, но обозначенные разными терминами.

Формально представим онтологию предметной области в виде следующего множества:

$$O^{dom} = \left\{ O_1^{dom}, O_2^{dom}, ..., O_i^{dom}, ..., O_n^{dom} \right\}, \quad (1)$$

в котором n — количество предметных областей, в рамках которых проводилась работа над предыдущими проектами; O_i^{dom} — i-я онтология предметной

области, содержащая описание особенностей *i*-й предметной области. Формальное представление *i*-й онтологии предметной области O_i^{dom} запишем в виде кортежа:

$$O_i^{dom} = \left\langle C^{dom}, T^{dom}, R^{dom}, F^{dom} \right\rangle,$$

где C^{dom} — множество понятий предметной области; T^{dom} — множество терминов предметной области, описывающих понятия предметной области; R^{dom} — множество отношений вида:

$$R^{dom} = \left\{ R_{CC}^{dom}, R_{CT}^{dom} \right\},$$

где R_{CC}^{dom} — множество отношений обобщения, определяющих иерархию понятий предметной области («понятие-понятие»); R_{CT}^{dom} — множество отношений ассоциации, формирующих связи между понятиями и терминами, описывающими данные понятия («понятие-термин»); F^{dom} — множество функций интерпретации, определяющих множество отношений R^{dom}.

1.2. Онтология моделей жизненного цикла

Онтология моделей жизненного цикла используется в рамках БЗ для определения динамики развития артефактов проектирования.

Привязка изменений, вносимых в описание архитектуры ПС в процессе жизненного цикла системы, к отдельным стадиями жизненного цикла, позволяет в будущем учитывать такие особенности в рамках процесса проектирования новой системы.

Формальное представление онтологии моделей жизненного цикла запишем в виде следующего множества:

$$O^{dev} = \left\{ O_1^{dev}, O_2^{dev}, ..., O_i^{dev}, ..., O_n^{dev} \right\}, \quad (2)$$

в котором n — количество моделей жизненного цикла, применяемых в проектной организации; O_i^{dev} — *i*-я модель жизненного цикла проектной организации. Формальное представление *i*-й модели жизненного цикла O_i^{dev} представим в виде кортежа:

$$O_i^{dev} = \left\langle S^{dev}, R^{dev}, F^{dev} \right\rangle,$$

где S^{dev} — множество стадий, составляющих *i*-ю модель жизненного цикла проектной организации; R^{dev} — множество иррефлексивных отношений, определяющих порядок следования стадий *i*-й модели жизненного цикла; F^{dev} — функция интерпретации, определяющая множество отношений R^{dev}.

1.3. Онтология проектов

Онтология проектов используется в БЗ проектной организации для сопоставления артефактов проектирования и проектов, в рамках которых они были сформированы. Сохранение связей между артефактами проектирования и проектами позволяет определить родственные проекты, имеющие схожие описания архитектурных решений, а также отследить динамику развития таких решений в процессе развития для выделения удачных проектных решений.

Формально запишем онтологию проектов в виде следующего кортежа:

$$O^{proj} = \left\langle P^{proj}, R^{proj}, F^{proj} \right\rangle, \tag{3}$$

где P^{proj} — множество предыдущих проектов, работа над которыми велась в проектной организации; R^{proj} — множество иррефлексивных отношений ассоциации, определяющих родственные связи между проектами («родительский проект-дочерний проект»). Данный вид отношений иллюстрирует ситуацию создания ответвленного проекта (fork) — использование кодовой базы проекта ПС в качестве старта для другого проекта, при этом родительский проект может как продолжать существование, так и прекратить его; F^{proj} — функция интерпретации, определяющая множество отношений R^{proj}.

1.4. Онтология артефактов проектирования

Онтология артефактов проектирования применяется в рамках БЗ проектной организации для определения особенностей структуры и формата представления артефактов проектирования. Данные сведения необходимы как в процессе анализа артефактов проектирования при формировании содержимого базы знаний, так и в процессе генерации прототипов артефактов проектирования на основе содержимого БЗ.

Формально онтологию артефактов проектирования представим в виде кортежа:

$$O^{art} = \left\langle T^{art}, I^{art}, V^{art}, R^{art}, F^{art} \right\rangle, \tag{4}$$

в котором T^{art} — множество типов артефактов проектирования, в процессе анализа которых возможно формирование фрагментов содержимого БЗ проектной организации; I^{art} — множество элементов, составляющих артефакт проектирования; V^{art} — множество шаблонов, определяющих элементы артефакта проектирования. Шаблоны используются в процессе анализа артефактов проектирования для нахождения и извлечения необходимых сведений

в процессе формирования содержимого БЗ проектной организации. Также шаблоны применяются для генерации прототипов артефактов проектирования на основе содержимого БЗ проектной организации; R^{art} — множество отношений вида:

$$R^{art} = \left\{ R_{TI}^{art}, R_{II}^{art}, R_{IV}^{art} \right\},$$

где R_{TI}^{art} — множество отношений ассоциации, определяющих связь между типом артефакта проектирования T_j^{art} и корневым элементов артефакта проектирования I_j^{art}; R_{II}^{art} — множество отношений обобщения, определяющих иерархию элементов артефакта проектирования; R_{IV}^{art} — множество отношений ассоциации, сопоставляющих элемент артефакта проектирования I_i^{art} с шаблоном I^{art}; F^{art} — множество функций интерпретации, определяющих множество отношений R^{art}.

1.5. Онтология единиц проектного опыта

Онтология единиц проектного опыта содержит формализованные в процессе анализа артефактов проектирования единиц проектного опыта. Единицы проектного опыта — удачные проектные решения, содержащиеся в предыдущих проектах, которые могут быть использованы в процессе разработки новой ПС.

Онтология единиц проектного опыта состоит из двух компонентов: компонент для формализации описания модели разрабатываемой ПС и компонент для формализации описания технологической составляющей разрабатываемой системы. Данное разделение обусловлено существенными концептуальными различиями между моделью системы и ее технологической составляющей.

Формально онтология единиц проектного опыта может быть записана в виде следующего кортежа:

$$O^{exp} = \left\langle O^{mexp}, O^{texp} \right\rangle, \tag{5}$$

в котором O^{mexp} — онтологическое представление описание модели ПС; O^{texp} — онтологическое представление описания технологической составляющей ПС.

Онтологическое представление описания модели ПС формально представим следующим кортежем:

$$O^{mexp} = \left\langle E^{mexp}, A^{mexp}, C^{mexp}, P^{mexp}, R^{mexp}, F^{mexp} \right\rangle,$$

где E^{mexp} — множество сущностей описания модели ПС; A^{mexp} — множество атрибутов сущностей; C^{mexp} — множество ограничений атрибутов сущностей; P^{mexp} — множество бизнес-процессов, в которые вовлечены сущности; R^{mexp} — множество отношений вида:

$$R^{mexp} = \left\{ R_{EE}^{mexp}, R_{EA}^{mexp}, R_{AC}^{mexp}, R_{EP}^{mexp} \right\},$$

где R_{EE}^{mexp} — множество отношений обобщения, определяющих иерархию сущностей описания модели ПС; R_{EA}^{mexp} — множество отношений ассоциации, определяющих связь между сущностью E_i^{mexp} и ее атрибутом A_j^{mexp}; R_{AC}^{mexp} — множество отношений ассоциации, определяющих связь между атрибутом A_i^{mexp} сущности и его ограничением C_j^{mexp}; R_{EP}^{mexp} — множество отношений ассоциации, определяющих связь между сущностью E_i^{mexp} и бизнес-процессом P_j^{mexp}, в который она вовлечена; F^{mexp} — множество функций интерпретации, определяющих множество отношений R^{mexp}.

Формальное представление онтологического представления описания технологической составляющей ПС запишем в виде следующего кортежа:

$$O^{texp} = \left\langle U^{texp}, R^{texp}, F^{texp} \right\rangle,$$

где U^{texp} — множество функциональных блоков описания технологической составляющей ПС (например, программный компонент, аппаратный компонент, узел вычислительной сети, сервер и т. д.); R^{texp} — множество отношений вида:

$$R^{texp} = \left\{ R_H^{texp}, R_C^{texp} \right\},$$

в котором R_H^{texp} — множество отношений обобщения, определяющих вложенность функциональных блоков описания технологической составляющей ПС; R_C^{texp} — множество иррефлексивных отношений ассоциации, определяющих взаимодействие между функциональными блоками; F^{texp} — множество функций интерпретации, определяющих множество отношений R^{texp}.

1.6. Онтология базы знаний проектной организации

Рассмотренные ранее онтологии формируют компоненты базы знаний проектной организации, позволяющей извлекать единицы проектного опыта в процессе анализа артефактов проектирования, которые были получены в процессе работы над предыдущими проектами. На рисунке представлена схема, иллюстрирующая взаимодействие онтологий БЗ проектной организации.

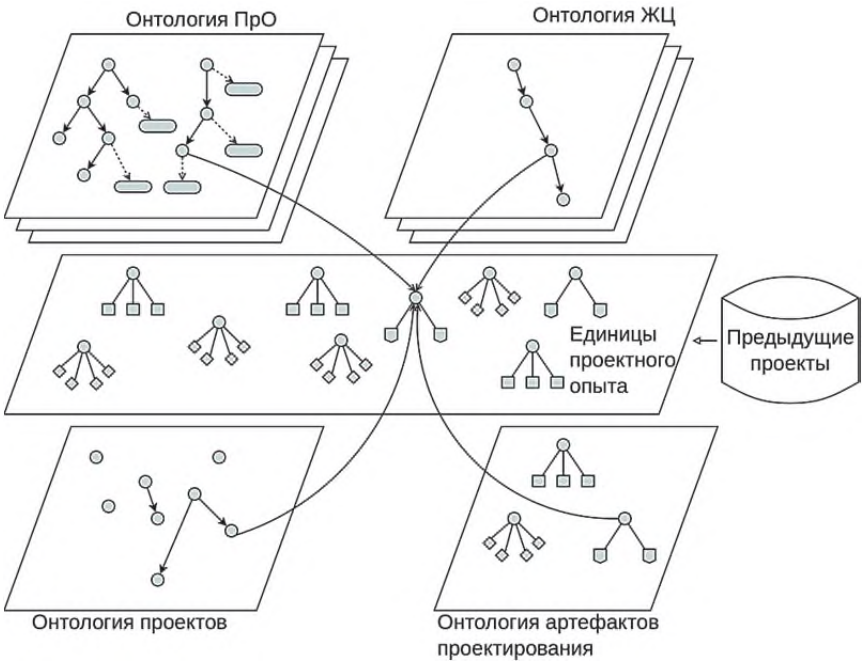


Рис. Система онтологий БЗ проектной организации

Представим модель базы знаний проектной организации в виде следующего кортежа:

$$O = \left\langle O^{dom}, O^{dev}, O^{proj}, O^{art}, O^{exp}, R, F \right\rangle,$$

в котором O^{dom} — онтология для учета сведений о различных предметных областях, в рамках которых производилась работа над предыдущими проектами (1); O^{dev} — онтология для учета сведений о моделях жизненного цикла разработки ПС, применяемых в проектной организации (2); O^{proj} — онтология для хранения сведений о завершенных проектах ПС проектной организации (3); O^{art} — онтология для учета особенностей представления артефактов проектирования (4); O^{exp} — онтология для представления ЕПО, формируемая в процессе анализа артефактов проектирования (5); R — множество отношений меду онтологиями модели базы знаний, представленное следующим выражением:

$$R = \left\{ R_{exp}^{dom}, R_{exp}^{dev}, R_{exp}^{proj}, R_{exp}^{art} \right\},$$

где R_{exp}^{dom} — множество отношений ассоциации между понятиями онтологии предметной области O^{dom} и единицами проектного опыта (онтология O^{exp});

R_{exp}^{dev} — множество отношений ассоциации между стадиями модели жизненного цикла (онтология O^{dev}) и единицами проектного опыта; R_{exp}^{proj} — множество отношений ассоциации между предыдущими проектами (онтология O^{proj}) и единицами проектного опыта; R_{exp}^{art} — множество отношений ассоциации между артефактами проектирования (онтология O^{art}) и единицами проектного опыта; F — множество функций интерпретации, определяющих множество отношений R.

Заключение

Рассмотрен подход к автоматизации процесса архитектуризации программных систем на основе опыта предыдущих проектов. Приведено теоретико-множественное представление модели базы знаний проектной организации, позволяющей осуществлять работу по хранению и поиску единиц проектного опыта. Данная модель БЗ дает возможность связывать единицу проектного опыта с проектом, в рамках которого она получена, со стадией модели жизненного цикла, на которой она сформирована, понятиями предметной области, в рамках которой велась работа над ПС, а также с артефактом проектирования из которого извлечена данная ЕПО.

В настоящий момент извлечение ЕПО возможно из следующих артефактов проектирования: модели данных РДБ; структура объектов метаданных предметно-ориентированных систем, построенных на основе платформы 1С: Предприятие 8.

Направления последующей работы: добавление поддержки новых типов артефактов проектирования для извлечения ЕПО: проектные диаграммы в нотации UML, модели данных NoSQL, проектная документация, исходный код и т. д.; разработка методов формирования прототипов артефактов проектирования на основе содержимого БЗ; разработка методов информационного поиска ЕПО и методов определения динамики изменения предпочтений использования различных архитектурных решений в процессе анализа содержимого БЗ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ульяновской области в рамках научных проектов № 19-47-730005, № 19-47-730003 и № 18-47-730019.

Список литературы

1. *ГОСТ* Р 57100-2016/ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Системная и программная инженерия. Описание архитектуры. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200139542 (дата обращения: 25.01.2020).

2. *Макконнелл С.* Совершенный код : практическое руководство по разработке программного обеспечения. СПб. : Русская редакция/БХВ, 2017.

Е.Л. Хабибуллина[1], А.К. Погодаев[2]
Липецкий государственный технический университет, Россия
e-mail: [1]e.shterenberg@gmail.com, [2]pak@stu.lipetsk.ru

НЕЙРО-НЕЧЕТКИЕ АЛГОРИТМЫ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

Введение

В работе описывается место, занимаемое экспертной системой управления транспортными потоками в модели Регионального модуля интеллектуальной транспортно-логистической системы, приводятся концептуальная и функциональная модели экспертной системы.

Для использования экспертной системы необходимо провести ее параметрическую идентификацию, определив терм-множества для лингвистических переменных и сформировав базу знаний, продукционные правила из которой будут применяться в алгоритме логического вывода. В работе приводится описание применения нейро-нечетких алгоритмов в экспертной системе управления транспортными потоками для автоматизированного построения продукционных правил. Применение описываемого подхода к построению базы знаний является эффективным при наличии данных большого объема, получаемых из разнородных источников, и позволяет учитывать особенности отдельных транспортных коридоров, которые могут быть не приняты во внимание экспертами при формулировании продукционных правил.

1. Концептуальная модель Регионального центра интеллектуальной транспортно-логистической системы

В соответствии с внутренней политикой Российской Федерации одним из приоритетных направлений в ближайшие 10—15 лет станет развитие систем и современных транспортных средств на основе интеллектуальных платформ, сетей и инфраструктуры в логистике людей и вещей. Одна из важнейших задач обеспечения транспортной мобильности — соединение Европы и Азии проходящей через территорию Российской Федерации сетью высокоскоростных транспортных коридоров для пилотируемых и беспилотных транспортных средств. Для управления потоками транспортных средств, прогнозирования сложных дорожных ситуаций, обеспечения минимального времени прибытия служб экстренного реагирования, снижения воздействия, оказываемого на окружающую среду, необходимо разработать интеллектуальную транспортно-логистическую систему. Решение этой задачи можно упростить за счет создания связанных региональных модулей интеллектуальной транспортно-логистической системы. Модель такого модуля с возможностью настройки под особенности региона будет универсальной.

© Хабибуллина Е. Л., Погодаев А. К., 2020

Результаты исследований [1; 2], проводимых в Липецком государственном техническом университете, легли в основу концептуальной модели Регионального модуля интеллектуальной транспортно-логистической системы (РЦИТЛС), схема которого представлена на рисунке 1.

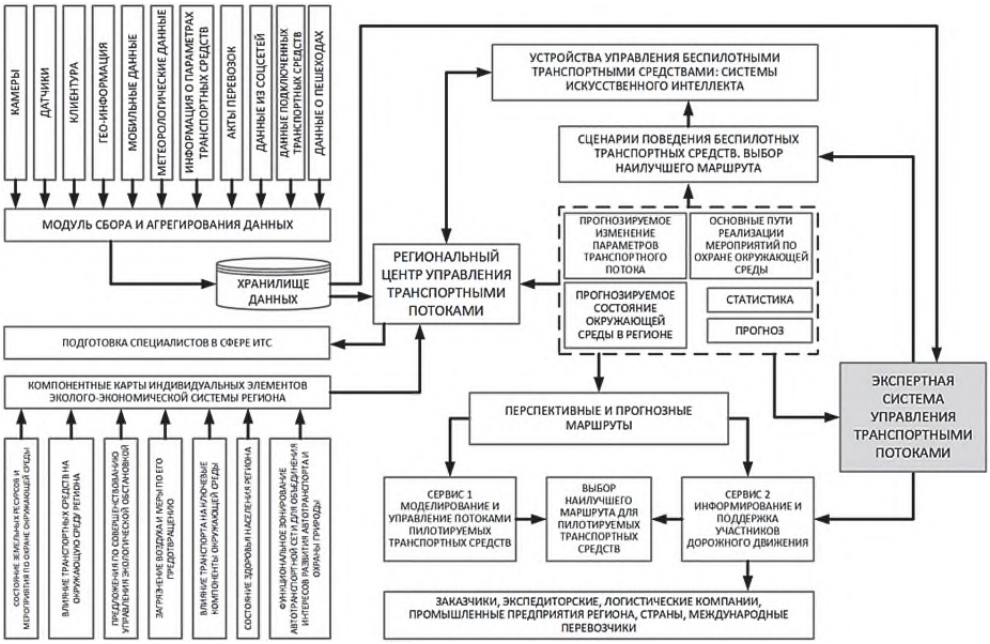


Рис. 1. Концептуальная схема Регионального центра интеллектуальной транспортно-логистической системы

В хранилище данных РЦИТЛС [3] при помощи модуля сбора и агрегирования данных накапливается информация, полученная из разнородных источников [4]: оборудования дорожной инфраструктуры; устройств, подключенных автомобилей и пешеходов; операторов сотовой связи; систем наблюдения; транспортных компаний и других источников. В региональном модуле ИТС проводится анализ эколого-экономической системы региона и передаются Сервису 1 «Моделирование и управление потоками пилотируемых транспортных средств» и Сервису 2 «Информирование и поддержка участников дорожного движения». Сервис 1 разрабатывает имитационные транспортные модели для обеспечения оптимального организационного воздействия на транспортный поток, разрабатывает бесконфликтные и бесперебойные транспортные коридоры, управляет доступом к ним транспортных средств (ТС). Сервис 2 информирует клиентов о текущей и прогнозируемой транспортной ситуации, перегруженности транспортной сети, на основе прогнозов предоставляет информацию о прокладываемых маршрутах с учетом экологической ситуации в регионе [5].

Управление транспортным потоком осуществляется направленным воздействием на его параметры, например на пропускную способность. Для этого проанализирована чувствительность модели [6], используемой для прогнозирования пропускной способности, а также определены параметры, оказывающие наибольшее влияние на пропускную способность высокоскоростного транспортного коридора.

Экспертная система управления транспортными потоками — один из модулей РЦИТЛС, который на основе накапливаемых данных о параметрах, описывающих текущее состояние транспортного коридора, и прогнозируемое значение пропускной способности, определяет рекомендуемое значение изменяемых параметров (процент тяжелых транспортных средств в высокоскоростном коридоре, скоростные ограничения, изменение количества полос). Полученные значения преобразуются в систему рекомендаций для управляемых и беспилотных транспортных средств, передаются Сервису 2 и используются при определении сценария поведения беспилотных транспортных средств.

2. Концептуальная модель экспертной системы управления транспортными потоками

Согласно проведенным исследованиям [6], в качестве входных параметров экспертной системы управления транспортными потоками рекомендуется использовать следующие факторы, характеризующие текущее и прогнозируемое состояние транспортного коридора: прогнозируемая пропускная способность (которая может быть рассчитана при помощи модели, предложенной в исследовании [7]), средняя скорость движения транспортных средств по полосам движения, расположение высокоскоростного транспортного коридора (в черте или вне населенного пункта), уклон магистрали, процент большегрузных транспортных средств в транспортном коридоре, схема расположения зоны ремонта, количество полос движения в одном направлении, ширина полосы движения, наличие полосы для разгона, скоростное ограничение. В качестве выходных параметров экспертной системы выбраны процент большегрузных транспортных средств в транспортном коридоре, количество полос движения в одном направлении (обочины или реверсивные полосы могут быть использованы в качестве дополнительных полос), скоростные ограничения (дорожные знаки с автоматическим изменением изображения). Указанные параметры входят в продукционные правила в следующих формах: лингвистические переменны, количественные переменные, строковые переменные.

На рисунке 2 представлена концептуальная модель экспертной системы управления транспортными потоками (функциональная модель приведена в работе [6]). По информации, получаемой из разнородных источников, в подсистеме сбора и агрегирования информации вычисляются значения параметров системы и накапливаются в базе данных с учетом меток времени и GPS-

координат. В подсистеме прогнозирования определяется прогнозируемое значение пропускной способности [7] с применением нейросетевой модели. Данные, поступающие из базы данных в виде количественного значения и соответствующие лингвистическим переменным переводятся в нечеткие значения в подсистеме «Фаззификатор». Затем в подсистеме логического вывода определяются значения изменяемых параметров: процент тяжелых транспортных средств, скоростные ограничения, число полос движения. В качестве механизма логического вывода используется алгоритм Мамдани. В подсистеме «Дефаззификатор» переводятся нечеткие значения в точные значения для лингвистических переменных. Подсистема передачи рекомендаций через беспроводные интерфейсы и сеть Интернет передает рекомендации на устройства участников дорожного движения и объекты дорожной инфраструктуры.

Рис. 2. Концептуальная схема экспертной системы управления транспортными потоками

Формализовать процесс управления транспортными потоками можно при помощи базы знаний, содержащей набор продукционных правил вида <<ЕСЛИ-ТО>>. Ниже приведены примеры таких правил для экспертной системы управления транспортными потоками:

ЕСЛИ «усредненная скорость транспортных средств по полосам» = «НИЗКАЯ», ТО «процент тяжелых транспортных средств» = «НИЗКИЙ» ИЛИ «количество полос» = «ДОБАВИТЬ»;

ЕСЛИ «расположение высокоскоростного транспортного коридора» = «городская черта» И «ширина полосы» = «УЗКАЯ», ТО «скоростное ограничение» = «НИЗКОЕ».

Возможно построение с участием экспертов базы знаний с участием экспертов, которая позволит формализовать накопленные знания и опыт, но в условиях большого объема наблюдаемых данных и необходимости последующей адаптации базы знаний при переносе модели РЦИТЛС на другие регионы предлагается использовать нейро-нечеткий алгоритм формирования продукционных правил.

3. Применение нейро-нечетких алгоритмов в экспертной системе Регионального центра интеллектуальной транспортно-логистической системы

В работе [8] приведен подход к построению экспертной системы в виде системы нечеткого управления в форме многослойной сети с прямым распространением сигнала. Но в разрабатываемой системе присутствует необходимость сематической оценки базы знаний экспертами, поэтому следует использовать алгоритмы, которые позволят автоматически или в автоматизированном режиме сформировать по имеющемуся массиву наблюдаемых данных продукционные правила, которые в дальнейшем могут быть проверены и оценены экспертами в силу сохранения семантического смысла за счет использования лингвистических переменных.

На рисунке 3 приведена схема предлагаемого нейро-нечеткого алгоритма формирования продукционных правил.

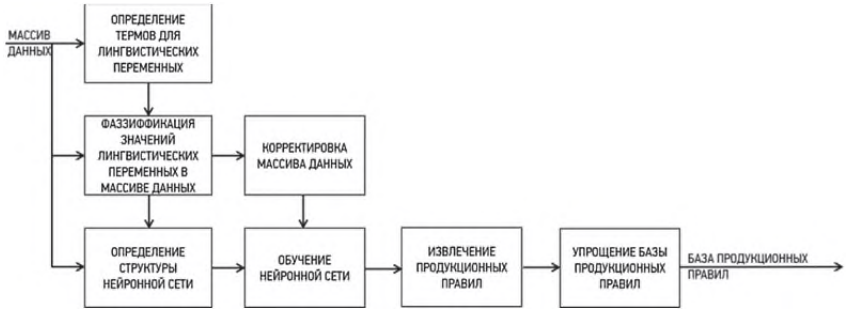


Рис. 3. Схема алгоритма построения базы знаний
в экспертной системе управления транспортными потоками

На первом шаге алгоритма необходимо определить терм-множества для лингвистических переменных, соответствующих каждому входному ($I_i, i = \overline{1, N}$, где N — количество входных параметров экспертной системы) и выходному ($O_l, l = \overline{1, M}$, где M — количество выходных параметров экспертной системы) параметру, на основе экспериментального набора данных и результатов анализа чувствительности. Результаты анализа чувствительности определяют количество нечетких значений, которые каждая лингвистическая переменная может первоначально принять (N_i и M_l — количество возможных нечетких значений для каждой входной и выходной лингвистической переменной соответственно). Для каждой переменной определяется минимальное и макси-

мальное значения по массиву данных, затем полученный интервал разбивается на N_i или M_l отрезков, имеющих одинаковую длину. Также должны быть определены функции принадлежности для каждого терма (в задаче управления транспортными потоками рекомендуется использовать функцию принадлежности треугольной формы).

Каждая лингвистическая переменная может принимать нечеткие значения из своего терм-множества (например, «НИЗКАЯ», «СРЕДНЯЯ», «ВЫСОКАЯ»).

На втором шаге алгоритма следует выполнить фаззификацию числовых значений в массиве данных, соответствующих лингвистическим переменным.

На третьем шаге проводится предварительная обработка массива данных. Необходимо нормализовать входные значения, соответствующие количественным переменным, выполнить кодирование входных значений, соответствующих строковым переменным модели, агрегирование строк в наборе данных с учетом близких наборов данных, возникших в результате фаззификации.

На четвертом шаге необходимо провести структурную идентификацию нейронной сети. Для решения задачи может быть использована нейронная сеть как без скрытого слоя [9], так и со скрытым слоем. В задаче построения базы знаний экспертной системы управления транспортными потоками предлагается использовать нейронную сеть с одним скрытым слоем (пример возможной структуры нейронной сети представлен на рисунке 4).

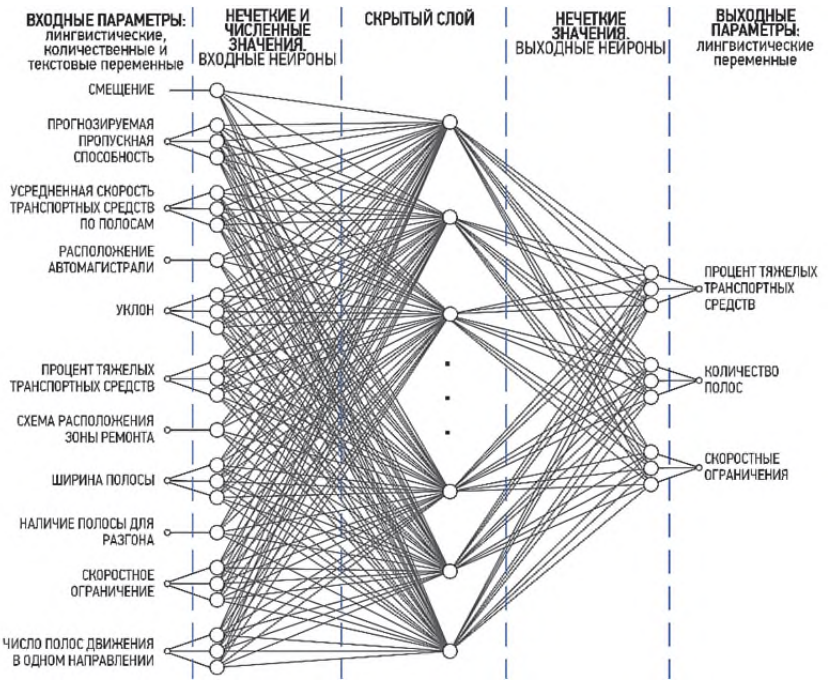


Рис. 4. Пример возможной структуры нейронной сети для формирования базы знаний в экспертной системе управления транспортными потоками

Нейроны входного слоя соответствуют возможным нечетким значениям входных параметров. Если значение входного параметра, например «усредненная скорость по полосам», соответствует нечеткому значению «НИЗКАЯ», то это означает, что в этот же момент времени он не может принимать никаких других значений. Другими словами, только один нейрон из группы нейронов, соответствующих значениям одной входной лингвистической переменной, может принимать значение «1» в конкретный момент времени, а нейроны, соответствующие остальным значениям из этой группы, принимают значение «0» ($j = \overline{1, N_i}$):

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } I_i \text{ принимает нечёткое значение } j, \\ 0, \text{ если } I_i \text{ не принимает нечёткое значение } j. \end{cases}$$

Аналогичным образом определяются нейроны выходного слоя ($s = \overline{1, M_l}$):

$$y_{ls} = \begin{cases} 1, \text{ если } O_l \text{ принимает нечёткое значение } s, \\ 0, \text{ если } O_l \text{ не принимает нечёткое значение } s. \end{cases}$$

Количество нейронов скрытого слоя должно быть больше, чем количество нейронов выходного слоя: h_k — нейроны скрытого слоя, где $k = \overline{1, K}, K > M$.

На пятом шаге необходимо обучить нейронную сеть. В результате будут определены веса: v_{ijk} — веса входной слой — скрытый слой, w_{ksl} — веса скрытый слой — выходной слой.

На шестом шаге выполняется формирование продукционных правил. Оно сводится к выбору наиболее доминирующего правила для каждого нейрона выходного слоя (количество продукционных правил соответствует количеству нейронов выходного слоя). Чтобы сформировать правило, сначала выбирается нейрон скрытого слоя для каждого нейрона выходного слоя следующим образом:

$$h_s = \max_s (h_k \cdot w_{ksl}) .$$

Затем для каждого выбранного нейрона скрытого слоя определяется комбинация нейронов входного слоя (по одному из группы нейронов, соответствующей входному параметру $I_i, i = \overline{1, N}$):

$$\forall I_i : \; x_{ij} = \max_j (x_{ij} \cdot v_{ijc} - b_c) ,$$

где *c* — индекс выбранного нейрона скрытого слоя.

На заключительном шаге следует упростить полученную базу продукционных правил, например объединив похожие правила, а также выполнить семантический контроль полученной базы знаний с помощью экспертов РЦИТЛС.

Заключение

Предложена схема алгоритма автоматизированного построения базы знаний для экспертной системы на основе нейронной сети, который предусматривает выбор наиболее доминирующего правила для каждого нейрона выходного слоя на основе анализа весов, полученных в результате обучения нейронной сети. Отличительные особенности алгоритма — структура нейронной сети с одним скрытым слоем, а также сохранение возможности оценки семантической целостности базы знаний экспертами за счет использования в модели лингвистических переменных с определенными по массиву данных соответствующими терм-множествами.

Дальнейшие направления исследования — разработка критериев, позволяющих оценить качество полученной базы знаний, а также оценка эффективности предлагаемой модели экспертной системы управления транспортными потоками с учетом критериев, выделенных в работе [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-71-10034).

Список литературы

1. *Ризаева Ю. Н., Ляпин С. А., Сысоев А. С. и др.* Разработка интеллектуальной транспортно-экологистической системы и выбор оптимальных параметров ее функционирования // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». Орел, 2018.

2. *Sysoev A., Kadasev D., Lyapin S. et al.* Conceptual Scheme of Regional Module For Intelligent Transportation And Logistics System // Proceed. Abstr. Int. conf. on traffic and transport engineering. Belgrade, 2018.

3. *Khabibullina E., Pogodaev A.* Data Warehouse Model of Regional Intelligent Transportation System in The Concept of ITS-Russia // Proceed. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, 2019. P. 599—603.

4. *Хабибуллина Е. Л.* Разнородные источники данных в концепции региональных интеллектуальных транспортных систем // Сборник трудов конференции «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте». Липецк, 2018.

5. *Галкин А. В., Сысоев А. С.* Критерии эффективности функционирования интеллектуальной транспортно-логистической системы // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019. № 3 (57). С. 66—74.

6. *Сысоев А. С., Хабибуллина Е. Л.* Функциональная модель экспертной системы управления потоками транспорта в высокоскоростных транспортных коридорах // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Воронеж, 2020. С. 1114—1120.

7. *Sysoev A., Anikienko T., Blyumin S.* Highway Capacity Estimation: International Regulation and Neurostructural Remodeling Approach // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. Budapest, 2019.

8. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М : Горячая линия-Телеком, 2006.

9. *Huang S.H., Xing H.* Extract intelligible and concise fuzzy rules from neural networks // Fuzzy Sets and Systems. 2002. Vol. 132, № 2. P. 233—243.

Н.Р. Юсупбеков[1], Ф.Р. Абдурасулов[2], Ф.Т. Адилов[3], А.И. Иваньян[4]

[1]Ташкентский государственный технический университет, Республика Узбекистан

[2]Компания «Oltin Yo'l GTL», Республика Узбекистан

[3,4]ООО «XIMAVTOMATIKA», Республика Узбекистан

e-mail: [1]dodabek@mail.ru, [2]info@oltinyolgtl.com, [3]Farukh.Adilov@himavtomatika.uz, [4]arsen.ivanyan@himavtomatika.uz

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА БАЗЕ ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ FORGE

Введение

В работе представлена уникальная разработка в сфере цифровизации современного промышленного предприятия — программно-аналитическая платформа Forge от компании Honeywell, позволяющая визуализировать в окно единого портала консолидированные данные из всех систем информатизации и автоматизации предприятия, охватывающих или сопряженных с тем или иным бизнес-процессом данного предприятия. При этом платформа Forge — это не просто программная оболочка для визуализации данных, полученных путем интеграции набора различных интерфейсов, а полноценная вычислительная и аналитическая платформа, работающая с большими объемами данных и построенная согласно концепции промышленного интернета вещей [1; 2].

В промышленной сфере управление производственными процессами подчинено жестким целям постоянного увеличения производительности при сохранении минимальных периодов останова предприятия на профилактический ремонт и без допуска непредвиденных сбоев в работе производственного объекта. Любое несоблюдение одного из этих условий ведет к значительным экономическим потерям при одновременно повышенном уровне риска для надежности и безопасности работы производственного объекта.

Ситуация осложняется еще и тем, что современный промышленный объект все еще управляется человеческим персоналом и зависит также от факторов организационного взаимодействия между различными службами предприятия, а также от уровня квалификации, знаний и опыта сотрудников. Данные факторы находятся в процессе постоянного изменения и обеспечить стабильное управление объектом в этих условиях — задача крайне затруднительная.

© Юсупбеков Н.Р., Абдурасулов Ф.Р., Адилов Ф.Т., Иваньян А.И., 2020

Кроме того, в определенном роде отрицательную роль сыграл научно-технический прогресс в аспекте развития систем автоматизации и информатизации, приведший к оснащению отдельно взятых активов предприятия в узкоспециализированном направлении, решающем задачи обеспечения устойчивого функционирования и даже повышения эффективности работы данного актива в автономном режиме, то есть без учета взаимосвязей данного актива или отдельно взятого элемента актива с другими активами.

Для решения указанных проблем необходима реализация концепции единого информационно-управляющего комплекса, рассматривающего весь производственный объект и составляющие его бизнес-процессы как единое целое. Таким информационно-управляющим комплексом и является программно-аналитическая платформа Forge, включающая в себя набор аналитических инструментов для работы с базами данных реального времени (БДРВ), средства визуализированного интеллекта и генератор рекомендаций для успешного управления производственным объектом.

Концепция программно-аналитической платформы Forge заключается в максимальной цифровизации (дигитализации) данных из всех источников, моделировании всех активов производственного объекта в проекциях различных аспектов назначения моделей и в применении ряда методик аналитики больших объемов полученных данных [3] как от реальных физических активов, так и от моделей виртуальных цифровых двойников данных активов. При этом ряд эффективных методов строится на основе сравнения режимов функционирования реального актива и его виртуальной модели.

Философия повышения эффективности производственного предприятия посредством дигитализации и применения программно-аналитической платформы Forge строится на основе следующих направлений оптимизации производственных процессов, которые соответственно лежат в основе программно-технических компонентов платформы Forge и повышения: производительности самих технологических процессов и управления ими; активов, персонала и предприятия в целом.

Повышение производительности самих технологических процессов строится на основе моделирования цифровых двойников технологических процессов в программной среде Unisim, которая используется для проектирования и оптимизации промышленных технологических процессов и оснащена функционалом последующей динамической симуляции (имитации) протекания данных технологических процессов. Для выявления путей повышения эффективности технологических процессов цифровой двойник Unisim взаимодействует с программно-аналитическим модулями Process Reliability Advisor (Консультант по технологической надежности) Process Optimization Advisor (Консультант по оптимизации технологического процесса) [4].

В основу программно-аналитического модуля Process Reliability Advisor (Консультант по технологической надежности) заложены диагностика и обнаружение событий, предвосхищающих определенное направление дальнейшего протекания технологического процесса, которое рекомендуется изме-

нить. В основе модуля лежат математические модели сбоев в технологическом процессе, заложенные лицензиаром данного технологического процесса, то есть наивысшей экспертной стороной, обладающей многолетним глубоким опытом и знаниями о данном процессе. Программно-аналитический модуль Process Reliability Advisor позволяет: в непрерывном режиме отслеживать текущую производительность технологической установки; понимать, насколько близко находится текущий технологический режим к лимитам производительности технологической установки; выявлять события на раннем этапе и на основе этого принимать решения об изменении хода технологического процесса; генерировать подсказки для оперативно-диспетчерского персонала по дальнейшему ведению технологического процесса

В основу программно-аналитического модуля Process Optimization Advisor (Консультант по оптимизации технологического процесса) заложены вычислительные алгоритмы от лицензиара технологического процесса, рассчитывающие изменения в выходах целевых и побочных продуктов технологического процесса в зависимости от разных сценариев дальнейшего протекания данного процесса, имитируемых цифровым двойником Unisim, а также результирующие экономические показатели после применения данных изменений.

Повышение производительности управления технологическими процессами в основном дает максимальный эффект для сложных высокотехнологичных производств, где конечный результат во многом зависит от точности и тонкости настройки режима управления технологическим процессом. Соответствующий программный модуль Profit Performance Monitor (Мониторинг производительности по прибыли) является по сути облачным решением по применению системы усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП) [5], встроенным в программно-аналитическую платформу Forge. При этом помимо стандартных средств манипулирования управляющими переменными (MV) и вычисляемыми переменными (CV), связанными с конкретными параметрами алгоритмов управления технологическим процессом, программный модуль Profit Performance Monitor комбинирует разные сценарии взаимодействия всех алгоритмов в комплексе и вычисляет экономическую составляющую работы технологической установки в целом.

Повышение производительности активов в программно-аналитической платформе Forge обеспечивается посредством программной технологии Asset Performance Management (Управление производительностью активов), которая позволяет осуществлять сбор данных со всех активов предприятия в режиме реального времени и опять же посредством смоделированного цифрового двойника (выполненного уже в другой проекции объекта моделирования) выполнять последующие аналитические действия с выводом заключений и рекомендаций по дальнейшей более эффективной эксплуатации активов предприятия. В инструментарий технологии Asset Performance Management (Управление производительностью активов) включены следующие функции: интеграция данных об активах с данными о технологическом процессе;

встроенная экспертиза знаний об активе. Указанная функция подразумевает включение в состав программного обеспечения библиотек экспертных знаний о данном активе от производителя данного оборудования. Накопленные шаблоны и эталонные характеристики эксплуатации оборудования от производителя служат образцом для сравнения с ними реальных статистических данных об эксплуатации конкретных единиц оборудования (активов) и для сигнализации об отклонениях в работе данного актива. Рабочие шаблоны и эталонные характеристики оформляются в виде стандартной математической модели производительности этого актива.

Прогнозная аналитика. В компонент Asset Performance Management встроены модели машинного обучения, обеспечивающие прогнозную аналитику для дополнительного повышения показателей производительности. В то время как стандартная модель производительности актива определяет текущие параметры энергопотребления и эффективности указанного актива, модель прогнозной аналитики на основе больших данных выявляет непоследовательность в работе актива, определяет первопричину такого поведения и оценивает вероятность будущих последствий.

Интерактивный вычислительный механизм. Все вычисления и расчеты в моделях цифрового двойника выполняются в программной среде, привязывающейся к базе данных реального времени, непрерывно собирающей события из реальных физических активов и технологического процесса. Это, во-первых, позволяет существенно сэкономить время для вычислений с возможностью параллельных вычислений для большого количества активов одновременно и, во-вторых, обеспечивает постоянное взаимодействие между реальным объектом и цифровым двойником со всеми преимуществами этой синхронизации и взаимной корреляции поведения реального объекта и цифрового двойника. Кроме того, расширенные возможности конфигурирования вычислительного механизма позволяют встраивать в него стандартные расчеты от производителей, выполнять продвинутое программирование (например, на языках C# и VB), а также запускать непосредственно из базы данных компонента Asset Performance Management утилиты по аналитике и научному исследованию данных (Python, R и др.)

Обнаружение событий. Данная функция — неотъемлемая часть механизма визуализации и уведомления о любых обнаруженных событиях, включая данные об активах и технологическом процессе, результаты работы моделей производительности и аналитических моделей, вычислительных механизмов. Уведомление о событии происходит в режиме реального времени по средствам электронной связи, на широкий интерфейс различных интуитивных панелей визуализации, в сопряженные системы MES/АСУП и ERP [6], осуществляющие дальнейшие действия по вспомогательным бизнес-процессам (например, автоматическая передача информации в систему предзаказа элементов оборудования, прогнозируемых к выходу из строя через определенный период времени).

Повышение производительности персонала подразумевает оснащение работника предприятия набором персональных цифровых устройств, взаимодействующих в режиме реального времени с программно-аналитической платформой Forge. Повышение эффективности обеспечивается как полнотой набора всех необходимых устройств (которые, по сути, дополняют или встраиваются в комплект средств индивидуальной защиты), так и широким наборам специализированных приложений, устанавливаемых на данные мобильные устройства.

Повышение производительности предприятия в целом обеспечивается комбинацией работы всех компонентов программно-аналитической платформы Forge, но при этом квинтэссенцией данной комбинации является программная оболочка визуализации работы всей платформы Forge, в которой производители большое внимание уделили созданию максимально полезного, удобного и интуитивного интерфейса для более быстрого и правильного принятия решений по управлению производственным предприятием (рис.).

Рис. Человеко-машинный интерфейс программно-аналитической платформы Forge

Программно-аналитическая платформа Forge представляет собой яркий пример смены научной парадигмы в теории управления производственными процессами и объектами. Будучи тесно связанной с научными достижениями в области аналитики больших объемов данных, концепция платформы Forge предполагает смену подхода к теории создания информационных систем и систем управления. При этом особое внимание в новой концепции уделяется еще одному важному компоненту платформы, выполняющему свою узкоспециализированную задачу, но при этом обеспечивающему целостность и защищенность информационной модели платформы. Речь идет о компоненте,

обеспечивающем информационную безопасность (или как указывается во многих литературных источниках, кибербезопасность) программно-аналитической платформы Forge.

Компонент Forge Cybersecurity выполняет следующие функции, обеспечивающие кибербезопасность платформы: мониторинг и управление угрозами и контроль за соответствием событий политикам информационной безопасности; защищенные удаленный доступ к платформе и передача данных между компонентами платформы; анализ интегрируемых активов на предмет кибербезопасности; управление системами обновления операционных систем, базового программного обеспечения и системами антивирусного программного обеспечения.

Заключение

Программно-аналитическая платформа Forge — знаковое научно-прикладное решение, полностью переосмысливающее подход к интегрированной информационно-управляющей системе для производственного объекта. Решение основано на тотальной цифровой трансформации производственного предприятия и предполагает значительный перенос функций и обязанностей от человека к машине посредством реального применения в программируемой среде новейших достижений науки в области аналитики больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Список литературы

1. *Пол МакЛахлин, Рохан МакАдам.* Неоткрытая страна: Будущее промышленной автоматизации. Honeywell International Inc., 2016. С. 14.

2. *Бен Бланшет.* Как внедрить Промышленный интернет вещей. Control Engineering, 2016. URL: https://www.controleng.com/articles/how-to-implement-the-industrial-internet-of-things/ (дата обращения: 24.01.2019).

3. *Zhiqiang Ge, Zhihuan Song, Steven X. Ding and Biao Huang*. Обработка больших объемов данных и аналитика в промышленности: Роль машинного обучения" IEEE Access, 2017.

4. *Юсупбеков Н.Р., Абдурасулов Ф.Р., Адилов Ф.Т., Иваньян А.И.* Применение облачных технологий для оптимизации сложных технологических процессов промышленных предприятий // 13-я международная конференция по теории и применению систем с нечеткой логикой и мягких вычислений ICAFS-2018. Springer Nature Switzerland AG, 2019. С. 1—7.

5. *Юсупбеков Н.Р., Абдурасулов Ф.Р., Адилов Ф.Т., Иваньян А.И.* Применение технологий усовершенствованного управления для оптимизации технологических процессов производства полимеров // 10-я международная конференция по теории и применению мягких вычислений ICSCCW 2019. Springer Nature Switzerland AG, 2020. С. 1—7.

6. *Матвиенко Е.В., Адилов Ф.Т., Иваньян А.И. и др.* Интеллектуальные информационные технологии для интегрированных систем управления предприятиями с комплексной схемой газодобычи и газопереработки // 11-я международная конференция по мультимедийным информационным технологиям и приложениям MITA-2015. С. 293—297.

Секция 3

МНОГОАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ, СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И РОЕВОЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Руководители секции — проф. В. Б. Тарасов
доц. А. В. Павлов

N. R. Yusupbekov, Sh. M. Gulyamov, N. B. Usmanova
Tashkent state technical university, Tashkent, Uzbekistan
e-mail: vinera.shamsutdinova@mail.ru

RESOURCE AGREEMENT AND COORDINATION MODELS IN DISTRIBUTED MANAGEMENT SYSTEMS

Introduction

It is shown that info communication networks and systems, being technically interconnected with the innovation sphere and industries, are integrated into various means and solutions of information and communication technologies (ICT). Under these conditions, there is a need to develop promising solutions in the field of improving infrastructure, creating and implementing information systems, databases, as well as the effective implementation of the latest information technologies. In this paper, the presentation of the network is considered as a distributed controlled structure and the issues of ensuring its functionality are reflected. The areas and directions of the development of distributed network computing are considered. It is shown that the processes of information exchange in distributed structures offer appropriate control mechanisms based on a description that takes into account various sequences of component formation, which are appropriate to describe on the basis of distributed computing models.

Representation of the network as a distributed managed structure and ensuring its functionality

Distributed architecture is based on a network model in which processes associated with levels of network functionality and distributed implementations of various complexity levels occur, each of which, in turn, is characterized by a distribution of processing logic. To display it, the information state space is defined in a multidimensional representation and taking into account the multilevel, multiconnected, multifunctional architecture and joint processes that take place in a distributed environment where, for example, there are management, coordination, stor-

© Yusupbekov N. R., Gulyamov Sh. M., Usmanova N. B., 2020

age, and security functions that are provided by objects. Moreover, each function can be provided by one object; several functions can be provided by one object; the function is provided by a set of interacting objects, etc.

Thus, a distributed information space of states represents a set of objects related to processes or related to them; in this case, methodologically, decomposition is carried out with respect to the components and the representation of the state space for various components, and the information is processed in such a way that connections at one or another level can be defined in the model.

To describe and display the behavior of distributed objects during modeling and to take into account complex relationships within the organizational structure, a distributed network is considered as an associative (behavior-driven) environment in which multidimensional functionality is represented, as a rule, using tensors, and complex structural relationships based on mathematical apparatus of neural networks, the nodes of which give a justification for using the properties of processing elements. Thus, associative interactions make it possible to achieve the necessary level of proximity of the object in question to a particular property or function.

For simulation purposes, a distributed software environment is considered. Software components, presented as objects of modeling and control, allow to describe the behavior (parallel processing, dynamic nature, etc.) of the components of a distributed system and the corresponding attributes inherent in functionality with the proper level of abstraction and based on which exchange processes can be improved.

Resource Consistency Problem in a Distributed Environment

The simulated software object (software component) can be described based on the real functionality that it carries, including fragmented behavior, distribution of objects, sharing of resources, etc.

The behavior of the system is represented by the following set

$$SB = \{E, M, P, S, A, F\}, \tag{1}$$

which many elementary entities $E = \{e_1, e_2, ...e_n\}$ (in a multi-level representation) for objects; matrix M contains a binary relation of accessibility of entities for an object in E: $M = [m_{i,j}]_{n \times n}$ and a correspondence relation M: $E \rightarrow E$; distributed application is executed using objects as a set of processes involved in distributed communications; each entity can be defined or assigned to different processes $P = \{p_1, p_2, ...p_k\}$. Intersystem and intra-system relationships are taken into account when transmitting and processing information in a distributed environment, the presence of connections (for example, during remote or local calls), objects belonging to one or several processes, etc.

The main purpose of a distributed system is to provide services — they can be as consumers of system-network resources and are defined as a set $S = \{s_1, s_2, ...s_m\}$ [1].

Another matrix $A = \{a_{11},...,a_{nm}\}$ is introduced to determine the possibility of providing various entities for a variety of services S in E, namely, $A: E \to S$ and $a \subseteq E \times S : E \to S$ size $n \times m$: $A = [a_{i,j}]_{n \times m}$, where it is possible to show that entities in A are always in a uniform correspondence with S; situations may arise when some services do not have access to objects at all. On the other hand, this matrix reflects the accessibility of an object through an interface, i. e. its existence for the application.

Many functions are also introduced that can be associated with objects and entities like $F = \{f_1, f_2, ... f_k\}$.

The ratio of the correspondence of the entities and services E to S: $A \subseteq E \times S$ with the set of elements from A having interaction in E taking into account S has the form:

$$Component1(A) = \{e : (\exists s \in S)(e,s) \in A\}, \quad u \quad Component1(A) \subseteq E. \tag{2}$$

this means that all pairs from A related to a certain e are determined in accordance with a request from S.

Another set $A \subseteq E \times S$ can be defined, presented as:

$$Component2(A) = \{s : (\exists e \in E)(e,s) \in A\}, \quad u \quad Component2(A) \subseteq S. \tag{3}$$

Other components can be found by analogy with [2], in general, the general availability of entities upon request by the service from $A \subseteq E \times S$ and $A(e) = \{s : (e,s) \in A\}$.

For the general case, when several subsets communicate, you can specify various interaction processes $P = \{p_1, p_2, ... p_k\}$. Combining the necessary sets and elements with respect to one or another investigated property, you can determine the total set of the desired property for available services, provided $(A_1 \circ A_2 \circ ... \circ A_L) \cap M$ in the form:

$$T = E \otimes S \otimes F. \tag{4}$$

This expression means that to display the functionality of a distributed network or system, a tensor can be used as an element that displays the set of properties (attributes) necessary for consideration, defined by states and demonstrates an analytical tool for describing distributed behavior. Moreover, the sets for *E, S, F* represent linear spaces for describing the corresponding properties.

The two-dimensional Hopfield neural network (HSC) has mxn fully connected neurons, the synaptic connection from the neuron (*x,i*) to (*y,j*) is denoted by w_{xiyj}.

For the above-described space of states of processes in distributed info communication network structures, a set of entities (*e*) that have any properties (reflection, accumulation, etc.) with respect to the functions performed (recording, storage, transmission of information, etc.) will function as Hopfield network nodes; this set for a formal description is an object that needs to be described, to verify input information regarding this object, for which the Hopfield neural network is used as a network with associativity properties that functions in discrete time [3].

The state vector V HCX at a certain time t has a component V_{xi} describing the activity of the neuron (x, i) at time t (two values determine the exciting and inhibitory relations). Neuron (x, i) receives weighted states $w_{yjxi}V_{yj}$ at the input from each neuron (y, j); the total input of the neuron (x, i) will be:

$$I_{xi} = \sum_{y=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_{yjxi}V_{yj} \ . \tag{5}$$

The output of each neuron will be evaluated by the following value:

$$V_{xi}^{new} = \begin{cases} 1, I_{xi} > threshold, \\ V_{xi}, I_{xi} = threshold, \\ 0, I_{xi} < threshold, \end{cases}$$

and the network will be in a stable state when the energy function

$$E = \sum_{x}\sum_{y}\sum_{i}\sum_{j} w_{xiyj}V_{xi}V_{yj} \tag{6}$$

will be minimal.

The output can be expressed as follows:

$$V_{xi}(t) = sign(\sum_{yj=1}^{n} V_{yj}(t) - \theta_{xi}, V_{xi}(t-1)) \text{ or in the form of:}$$

$$V_{xi}(t) = sign(I_{xi}(t), V_{xi}(t-1)) = \begin{cases} 1, I_{xi}(t) > 0, \\ -1, I_{xi}(t) < 0, \\ V_{xi}(t-1), I_{xi}(t) = 0, \end{cases} \tag{7}$$

(*sign* is a nonlinear operator that translates a vector with coordinates y_i into a vector with coordinates *sign* (yi)).

Having $I_{xi} = \sum_{y=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_{yjxi}V_{yj}$, the output is defined as:

$$V_{xi}(t) = sign(\sum_{yj=1}^{n} w_{xiyj}V_{yj}(t-1)) \, . \tag{8}$$

The tensor defines the structural relations of objects or entities as a set of vector values. When the tensor is specified, the output product of the state tensor and the state tensor are determined at time instants so that through the tensor convolution operation the internal product and the corresponding tensor state can be obtained at the next moment in time. In the presence of the tensor T, which determines the structural relation of the multidimensional state space in the NLC, the state of the tensor $T1$ corresponds to V_{xi}, as the bipolar value of the state of each node, the tensor $T2$ is determined for I, the components of which display threshold values for the nodes, and the sequential change in state can be described as :

$$V'(t+1) = sign(\sum_{yj=1}^{m} V_{xi} V_{yj}(t) - I_{xi}(t))$$

or

$$T1_{xi}(t+1) = sign(\sum_{yj=1}^{m} T_{xi} T1_{yj}(t) - T2_{xi}(t)), \quad (9)$$

and a subset of the states of the nodes will change until a stable state is reached, i. e.

$$T1_{xi}(t) = sign(T \otimes T1_{xi}(t) - T2_{xi}). \quad (10)$$

To test this possibility, we apply the principles of determining correlation on a network of 5 nodes in the range of input values, as shown in Fig. 1. A simple example demonstrates the possibility of obtaining convergent values (*b*, *d*) for various situations with the corresponding input actions (*a*, *c*).

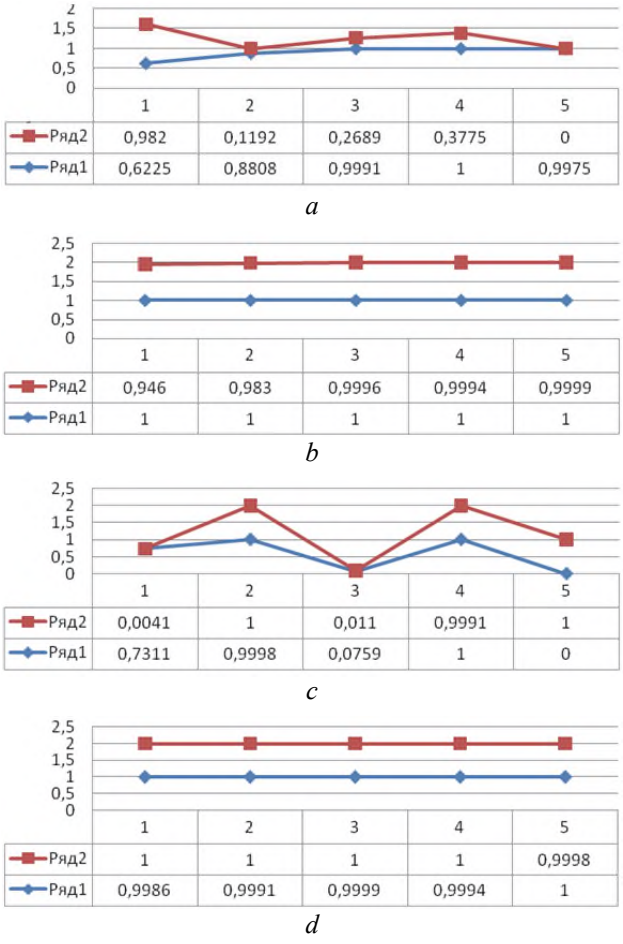


Fig. 1. An example of modeling a network of 5 nodes
(two cases are shown for different input values)

Thus, the proposed approach to the description of behavior allows us to study various aspects of the distributed functionality of the network, with the ability to detail the behavior (activity) of objects in a distributed network by reflecting the properties of modeling elements in a multidimensional representation of the structure and functionality of the systems.

Distributed computing models determine the general approach for solving the problems of analyzing functional architecture in the plane of properties, quantifying the probabilistic-temporal parameters of the information exchange process, taking into account the parameters of the procedures implemented at various levels by the relevant protocols, as well as determining the general nature of the relationship of these procedures.

The use of the tensor and tensor methodology to display linear multidimensional dynamic objects in a distributed space, which can be classified by the dimension of elements or their combinations, is substantiated. The behavior of an object represented as a tensor in multidimensional space, and the possibility of influencing this behavior are determined through special functions, which, when the coordinate system is changed, are transformed according to a linear law.

A distributed information space of states is a set of objects associated with or related to processes. In this case, methodologically, the decomposition is carried out with respect to the components and the representation of the state space for various components and information is carried out in such a way that the creation of a hierarchy at a certain level can be defined in the model.

References

1. *Usmanova N., Gaber J.* Behavior-Driven Affinity Framework: Approach to Attract Properties within Functionality of Distributed Systems/Technical report series (DI-02) Département Informatique de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2012.

2. *Broy M.* Dynamic Distributed Systems — Towards a Mathematical Model (Extended Abstract, 2000). URL: http://www.disi.unige.it/person/ReggioG/PROCEEDINGS/broy.pdf

3. *Tyng-Yru Liang, Ce-Kuen Shieh, Weiping Zhu* Task mapping on distributed shared memory systems using Hopfield neural network // Proc. of Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conf., 1997.

А. Е. Городецкий, И. Л. Тарасова, В. Г. Курбанов
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: g27764@yandex.ru

МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ГРУППОВОМ УПРАВЛЕНИИ РОБОТАМИ

Введение

Оптимизация взаимодействия группы роботов при выполнении совместной задачи в настоящее время становится все более сложной, требующей учета сложности и интеллектуальности технических систем управления ро-

© Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г., 2020

ботами, обеспечивающими постоянное расширение сферы деятельности подобных робототехнических систем (РТС). В таких РТС необходимо анализировать не только поведение отдельного робота, но и поведение взаимодействующей группы роботов, функции которой тесно взаимосвязаны. Причем РТС, строящиеся на основе умных электромеханических систем (SEMS) [1], обладают благодаря наличию центральной нервной системы (ЦНС) [2] целесообразным поведением. Такая группа SEMS может быть транспортными средствами, осуществляющими согласованные движения, группой роботов сборщиков, выполняющих совместные операции, и др.

При создании подобных групп специалисты, прежде всего, сталкиваются с необходимостью оценки способности группы к правильному принятию решений в условиях неопределенности, с учетом статических и динамических особенностей каждого робота и с учетом особенностей принятия решения в ЦНС отдельных SEMS. Кроме того, задача управления группой SEMS обладает дополнительной сложностью из-за необходимости обеспечения координации между ними. В сложных робототехнических системах каждый робот должен удовлетворять своим кинематическим уравнениям, а также существующим фазовым ограничениям, включая динамические ограничения, обеспечивающие отсутствие столкновений между роботами.

Качество управления при решении совместной групповой задачи будет зависеть как от типа управления групповым поведением SEMS, так и от метода принятия решения. Поэтому при решении проблемы выбора оптимальной системы группового управления SEMS для каждой конкретной групповой задачи необходим анализ всех комбинаций типов управления и методов принятий решений.

1. Типы организации управлением группой роботов

Качество принятия решений в группе взаимодействующих SEMS и соответственно их групповой интеллект в значительной степени зависит от типа управления групповым поведением SEMS. Обычно используются следующие типы управления [3]: децентрализованное без выделения робота лидера, децентрализованное с выделением лидера, централизованное с оператором, комбинированное с оператором и без выделения лидера и комбинированное с оператором и с выделением лидера.

Выбор типа управления определяется имеющимися техническими средствами и типом решаемой групповой задачи. Причем выбор метода принятия решения по ситуационному управлению группой SEMS во многом зависит от типа схемы управления группой.

2. Методы принятия решения при управлении группой SEMS

Рассмотрим основные методы принятия решения, применяемые в экспертных системах [4].

Использование отношения эквивалентности, которое обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности: $O_i \sim O_j$, где O_i —

оцениваемое решение: O_j — эталонное решение. В управлении без оператора каждая SEMS должна иметь эталонное решение O_j и меру близости δ_{ij} оцениваемого решения, близкое к эталонному. Различия в O_j и δ_{ij} у SEMS будут приводить к коллизиям при групповом взаимодействии. Кроме того, получение достаточно хороших O_j и объективных δ_{ij} с учетом недетерминированности моделей окружения выбора и/или неполноты может быть весьма трудоемким и не всегда обоснованным.

Использование отношения порядка лингвистического типа, например: «раньше чем», «более чем», «сильнее чем», «предпочтительнее чем» и т. д. Отношение порядка антирефлексивно, транзитивно и для случая, если O_i предпочтительнее, O_j можно представить как : $O_i \succ O_j$.

В результате сравнения всех объектов по отношению строгого порядка каждая SEMS либо оператор составляют упорядоченную последовательность (ранжирование): $O_1 \succ O_2 \succ ... \succ O_n$, где решение с номером один — наиболее предпочтительное из всех решений, решение с номером два менее предпочтительно, чем первое, но предпочтительнее всех остальных и т. д.

В управлении с оператором каждый робот не должен иметь эталонное решение. Кроме того, получение оценок порядка значительно проще при недетерминированности моделей окружения выбора и/или неполноты. Тем не менее и в этом случае могут возникать коллизии при групповом взаимодействии SEMS без оператора, связанные с различием в оценках порядка у SEMS, а также с учетом того факта, что ограничения у различных SEMS могут существенно отличаться.

Использование числовой системы с отношениями $H = < N;S >$, где N — множество действительных чисел, а S — множество отношений между числами. В результате каждая SEMS либо оператор составляют упорядоченную последовательность (ранжирование) решений. В этом случае сохраняются недостатки предыдущего метода. Однако оперирование числами, а не лингвистическими переменными типа «раньше чем», «более чем», «сильнее чем», «предпочтительнее чем» и т. д., облегчает процедуру выбора наилучшего решения.

Использование парного сравнения, то есть процедуры установления предпочтения решений при сравнении всех возможных пар. В отличие от ранжирования, при котором осуществляется упорядочение всех объектов сразу, парное сравнение представляет для SEMS более простую задачу. При сравнении каждой пары объектов возможны *отношения* либо *порядка,* либо эквивалентности. Парное сравнение есть измерение в *шкале порядка.*

В результате сравнения каждой пары объектов O_i и O_j необходимо упорядочить эту пару, высказывая, что: либо $O_i \succ O_j$, либо $O_j \succ O_i$, либо $O_i \sim O_j$.

Результаты сравнения всех пар решений удобно представить в виде таблицы, столбцы и строки которой составляют объекты, а в ячейках таблицы проставляются числовые значения. Сравнение решений во всех возможных парах не дает полного упорядочения всех решений. Поэтому возникает задача о ранжировке решений на основе парного сравнения.

Использование шкалы интервалов. Этот метод можно выполнить с высокой степенью доверия только при хорошей информированности о свойствах окружения выбора. В ряде случаев, с целью ослабления этих условий, но, естественно, за счет уменьшения точности измерения вместо непрерывной числовой оси рассматривают большую оценку, которая использует 5, 10, 100-балльные шкалы. Однако непосредственная оценка не всегда должна использовать числовые шкалы.

Использование групповых оценок. В качестве групповой оценки решений можно принять среднее взвешенное значение оценки принимаемого решения. При этом сравнительно легко решается задача парного сравнения оператором группы или лидером — экспертом.

Эта задача состоит в том, что эксперт устанавливает предпочтения решений SEMS при сравнении всех возможных пар SEMS. То есть эксперт, рассматривая все возможные пары SEMS, в каждой из них устанавливает ту причину, которая, по его мнению, оказывает большое влияние на следствие, то есть групповое поведение. Тогда возникает вопрос, как получить оценку всей совокупности решений SEMS на основе результатов парного сравнения, выполненного экспертом, особенно если в качестве эксперта выступает группа операторов.

Последовательность обработки парных сравнений заключается в том, что на основе таблиц парных сравнений *m*-экспертов строится матрица математических ожиданий оценок всех пар объектов. Затем по этой матрице вычисляется вектор коэффициентов относительной важности объектов, то есть вектор $k = [k_1, k_2, ..., k_n]^T$, на основе которого группа операторов и принимает решение о групповом управлении.

Определение обобщенных ранжированных решений. При групповой экспертной оценке каждой *i*-й SEMS (объекту) каждый из *j*-х экспертов присваивает ранг r_{ij}. В результате проведения экспертного оценивания получается матрица рангов $||r_{ij}||$ размерности $n \times m$, где n — число объектов, а m — число экспертов.

Самый простейший способ получения обобщенной ранжировки заключается в ранжировании объектов по величине сумм рангов, полученных каждым объектов от всех экспертов. В этом случае для матрицы ранжировок $||r_{ij}||$ вычисляются суммы:

$$r_i = \sum_{j=1}^{m} r_{ij} \quad (i=1,2,...\text{n}).$$

Далее объекты упорядочиваются по цепочке неравенств $r_k < r_l < \ldots < r_q$, где $r_k = \min_i(r_i)$ $r_l = \min_{i,\, i \neq k}(r_i)$ $r_q = \max_i(r_i)$.

Отсюда следует обобщенная ранжировка объектов: O_k. O_l. ... O_q.

Для учета компетентности экспертов достаточно умножить *i*-ю ранжировку на коэффициенты компетентности *j*-го эксперта $0 < k_\text{j} < 1$, что позволяет упорядочить объекты по цепочке неравенств. Необходимо отметить, что

построение таких обобщенных ранжировок является корректной процедурой только в том случае, если ранги назначаются как места объектов в виде натуральных чисел 1, 2, ... , *n*.

Однако ранги объектов определяют только порядок расположения объектов по показателям сравнения. Ранги как числа не дают возможность сделать вывод о том, на сколько или во сколько раз предпочтительнее один объект по сравнению с другим. Вместе с тем для использования в системах группового управления роботами знаний, полученных от экспертов, желательно не только упорядочение или ранжирование объектов по степени их влияния или воздействия на какой-либо результат, но и определение количественной оценки степени влияния каждого из объектов на результат.

Простейший метод для реализации этой задачи — подход, основанный на построении обобщенной ранжировки путем перехода от матрицы ранжировок к матрице парных сравнений. Затем к полученным матрицам парных сравнений всех экспертов применяется рассмотренный ранее метод обработки парных сравнений. Его итерационная процедура позволяет получить коэффициенты относительной важности объектов по степени их влияния на результат.

Все рассмотренные методы групповых оценок дают возможность получить достоверные результаты в случае хорошо подобранной группы экспертов и согласованности их мнений. Если это не так, то встает задача определения количественной оценки степени согласованности экспертов. Получение количественной меры позволяет более обоснованно интерпретировать причины в расхождении мнений.

Для оценки меры согласованности мнений группы экспертов используют, в частности, дисперсионный и энтропийный коэффициенты конкордации [4].

Использование диаграмм влияния. Фактически диаграммы влияния — это байесовские сети доверия, расширенные понятиями вариантов или шансов (variants *V*), решения (decisions *D*), пользы (utility *U*), безопасности (security *S*) и эффективности (efficiency *E*). Вершины решения, а точнее сказать указания, содержащиеся в них, определяют временное старшинство сети.

Использование понятия пользы. Фрагменты сети для этого случая показаны на рисунке 1. Стрелка от случайной переменной (вершины шансов (V)) к переменной решения (вершине решения) указывает, что значение случайной переменной известно на момент принятия решения. Стрелка от переменной решения к какой-либо другой переменной указывает время, упорядоченное решением. При этом сеть должна оставаться ациклической и должен существовать непосредственный путь, содержащий все вершины решения в сети.

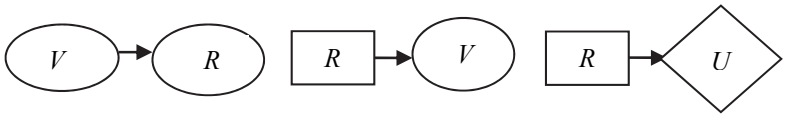


Рис. 1. Фрагменты сети с использованием понятия пользы

В процессе принятия решения важно не просто найти решение, а найти решение наилучшее в каком-то смысле. С этой целью в диаграммах влияния «вершины пользы» связываются с состоянием сети.

Каждая вершина пользы (полезности) содержит функцию полезности, которая связывает каждую конфигурацию состояния ее родителей с полезностью. Вершины полезности не имеют наследников, а следовательно, стрелка может быть направлена только к ним.

При принятии решения мы исходим из вероятности конфигурации сети. Поэтому можно вычислить ожидаемую полезность каждой альтернативы и выбрать альтернативу с наибольшей ожидаемой полезностью. Это принцип максимальной ожидаемой полезности. Диаграмма влияния может содержать несколько вершин полезности. При этом общая функция полезности представляет собой сумму всех локальных функций полезности.

Процесс принятия решения с использованием такой диаграммы влияния будет осуществляться в следующем порядке: после наблюдения значений переменных, которые являются родителями первой вершины решения, необходимо узнать максимальную полезность для альтернатив; эксперт вычисляет эти полезности в предположении, что все будущие решения будут сделаны оптимально, используя все имеющиеся сведения в момент каждого решения.

Сложность построения и исследования диаграмм влияния в большей степени определяется не количеством вершин шансов, а сложностью их взаимосвязей как между собой, так и, особенно, взаимосвязями с вершинами решения и полезности.

В настоящее время существуют программные реализации оболочек ЭС на основе байесовских сетей доверия (БСД) для оперирования не только дискретными, но и непрерывными случайными переменными. К числу таких программных средств относится и Hugin [5].

Однако при использовании БСД, содержащих как непрерывные, так и дискретные переменные, существует ряд ограничений: дискретные переменные не могут иметь непрерывных родителей; непрерывные переменные должны иметь нормальный закон распределения; распределение непрерывной переменной с дискретными родителями и непрерывными родителями является нормальным распределением.

Логический вывод в БСД с непрерывными и дискретными состояниями заключается в распространении вероятностей и параметров гауссовских законов распределения по всей сети в зависимости от полученных решений (свидетельств). В основе процесса логического вывода лежат довольно сложные математические алгоритмы.

При применении теории вероятностей для представления неопределенных знаний исследователи столкнулись с рядом трудностей. Это стимулировало возникновение новой теории, которая была разработана в 1960 г. Демстером и в дальнейшем развита Шеффером (1970). Она получила название «теория Демстера — Шеффера» (ТДШ) [6].

В теории Демстера — Шеффера используются меры доверия и правдоподобия. В частности, мера доверия A, обозначаемая Bel(A). Она измеряет полное число доверий в A. Функция доверия будет равна базовым вероятностям в случае множеств, состоящих из одного элемента (элементарного исхода), и будет больше или равна базовым вероятностям для множеств, содержащих более одного элемента.

Если текущие свидетельства ведут к множественным довериям относительно одних и тех же гипотез, то доверия необходимо комбинировать для получения общего доверия к гипотезам. Для рассмотрения доверий ТДШ обычно комбинирует различные функции доверия, вычисляя их ортогональные суммы по правилу Демстера.

Использование показателей безопасности. В этом случае в процессе принятия решения важно не просто найти решение, а найти решение наилучшее в смысле безопасности управления, то есть минимизации коллизий при групповом управлении. С этой целью в диаграммах влияния «вершины безопасности (Security (S))» связываются с состоянием сети.

Каждая вершина S содержит функцию безопасности, которая связывает каждую конфигурацию состояния ее родителей с безопасностью. Вершины безопасности не имеют наследников, а следовательно, стрелка может быть направлена только к ним (рис. 2).

Рис. 2. Фрагмент сети с использованием показателей безопасности

В этом случае при принятии решения, мы также исходим из вероятности конфигурации сети. Поэтому можно вычислить ожидаемую безопасность каждой альтернативы и выбрать альтернативу с наибольшей ожидаемой безопасностью. Это принцип максимальной ожидаемой безопасности. Диаграмма влияния может содержать несколько вершин безопасности. При этом общая функция безопасности представляет собой сумму всех локальных функций безопасности.

Процесс принятия решения с использованием диаграммы влияния будет осуществляться в следующем порядке: после наблюдения значений переменных, которые являются родителями первой вершины решения, необходимо узнать максимальную безопасность для альтернатив; эксперт вычисляет эти безопасности в предположении, что все будущие решения будут сделаны оптимально, используя все имеющиеся сведения в момент каждого решения.

Сложность построения и исследования такой диаграмм влияния в большей степени определяется не количеством вершин шансов, а сложностью их взаимосвязей как между собой, так и, особенно, взаимосвязями с вершинами решения и безопасности.

Использование показателей полезности и безопасности. В этом случае в процессе принятия решения важно не просто найти решение, а найти решение наилучшее в смысле безопасности управления, то есть минимизации коллизий при групповом управлении, и одновременно наилучшее в смысле пользы (полезности), содержащей функцию полезности, которая связывает каждую конфигурацию состояния ее родителей с полезностью. Объединение функций безопасности (*S*) и полезности (*U*) с различными назначаемыми весовыми коэффициентами образует функцию эффективности (efficiency *E*).

Вершины безопасности (*S*) и полезности (*U*) имеют общих наследников эффективность (*E*). Каждая вершина *E* содержит функцию эффективности, которая связывает каждую конфигурацию состояния ее родителей (*S*) и (*U*) с эффективностью. Вершины эффективности не имеют наследников, а следовательно, стрелка может быть направлена только к ним (рис. 3).

Как и в предыдущем случае, при принятии решения мы исходим из вероятности конфигурации сети. Поэтому можно вычислить ожидаемую эффективность каждой альтернативы и выбрать альтернативу с наибольшей ожидаемой эффективностью. Это принцип максимальной ожидаемой эффективности. Диаграмма влияния может содержать несколько вершин эффективности. При этом общая функция эффективности представляет собой сумму всех локальных функций эффективности.

Процесс принятия решения с использованием такой диаграммы влияния будет осуществляться в следующем порядке: после наблюдения значений переменных, которые являются родителями первой вершины решения, необходимо узнать максимальную эффективность для альтернатив; эксперт вычисляет эти эффективности в предположении, что все будущие решения будут сделаны оптимально, используя все имеющиеся сведения в момент каждого решения.

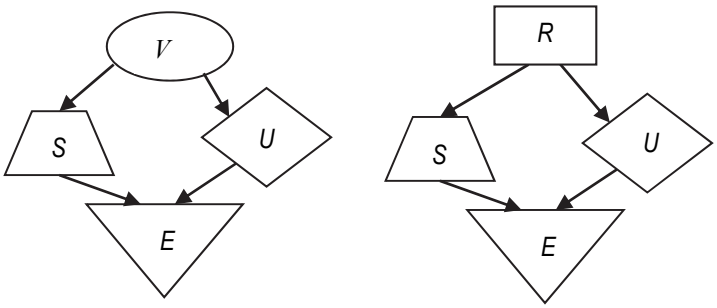


Рис. 3. Фрагмент сети с использованием показателей эффективности

Сложность построения и исследования такой диаграммы влияния в еще большей степени определяется сложностью взаимосвязей безопасности и полезности между собой и с вершинами эффективности, а также взаимосвязями вершин полезности и безопасности с решениями.

Заключение

Основные характеристики интеллекта группы роботов — достоверность принятия решения и затраты на нее. Обе эти характеристики определяют качество их группового интеллекта.

Достоверность рассуждений робота определяется на основе информации о прошлом опыте его участия в решении совместных проблем. Количественно достоверность решений робота можно оценить по формуле

$$D_i = \frac{N_{n_i}}{N_i} \Big| i = 1, 2, ..., m,$$

где N_{ni} — число задач, когда робот дал приемлемое практикой решение; N_i — общее число случаев участия i-го робота в решении совместной задачи.

Очевидно, что величины N_{ni} и N_i при решении совместной групповой задачи будут зависеть как от типа управления групповым поведением роботов, так и от метода принятия решения. Поэтому при решении проблемы выбора оптимальной системы группового управления интеллектуальными роботами для каждой конкретной групповой задачи необходим анализ всех комбинаций типов управления и методов принятий решений. Трудоемкость такой задачи чрезвычайно высока и требует создания специальных программных средств поддержки проектирования [8].

Работа выполнена в рамках НИР ИПМАШ РАН и при поддержке грантов РФФИ № 18-01-00076 и № 19-08-00079.

Список литературы

1. *Gorodetskiy A. E. et al* Smart Electromechanical Systems // Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 49. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

2. *Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G. et al* Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System // Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 95. Springer International Publishing Switzerland, 2017.

3. *Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G.* Situational Control of the Group Interaction of Mobile Robots // Smart Electromechanical Systems. Situational Control / ed. A. E. Gorodetskiy, I. L. Tarasova. Springer, Cham. URL: https://https://doi.org/. P. 91—102.

4. *Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Тарасова И. Л. и др.* Программные средства интеллектуальных систем. СПб. : Изд-во СПбТУ, 2000.

5. *Зинченко А. П.* Статистика. М. : КолосС, 2007.

6. *Официальный* сайт Hugin / hugin.sourceforg.net

7. *Shafer, Glenn*; Dempster-Shafer theor, 2002

8. *Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L.* Software Complex Testing Models for the Evaluation of Group Intelligence Robots // Smart Electromechanical Systems. Situational Control / ed. A. E. Gorodetskiy, I. L. Tarasova. Springer, Cham. URL: https://doi.org/. P. 231—244.

Ю.Т. Каганов[1], Г.И. Ревунков[2], А.М. Андреев[3], Ю.Е. Гапанюк[4]
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: [1]kaganov.y.t@bmstu.ru, [2]revunkov@bmstu.ru, [3]arkandreev@gmail.com, [4]gapyu@bmstu.ru

РАСШИРЕНИЕ МЕТАГРАФОВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Введение

Метаграфовая модель — разновидность модели сложной сети с эмерджентностью. Основной элемент этой модели — метавершина, которая включает вложенный фрагмент метаграфа, состоящий из вершин (метавершин) и ребер. Но классическая графовая модель (даже в эмерджентном метаграфовом представлении) не вполне удобна для описания синергетических систем, носящих холонический характер. Поэтому в данной работе мы вводим понятие синергетической метавершины метаграфа, которая позволяет организовывать вложенные элементы на основе заданного закона в непрерывном пространстве. Для реализации взаимодействия используется подход на основе активного метаграфа, который содержит как метаграфовое описание данных и знаний, так и правила обработки метаграфа, заданные в виде агентов.

1. Синергетическая интеллектуальная система

В настоящее время не существует единого определения синергетической интеллектуальной системы. На основе анализа работ [1—3] можно выделить два важных аспекта синергетической интеллектуальной системы.

Аспект I. Синергетическая интеллектуальная система может быть определена как сложная многоагентная система с холонической организацией. В соответствии с определением холон — это «целое, рассматриваемое в то же время как часть целого» [3, с. 234].

Таким образом, в холонической многоагентной системе (МАС) агент может включать в себя произвольное количество агентов нижнего уровня и одновременно может быть включен в состав произвольного количества агентов верхнего уровня. Интересная особенность холонической организации в том, что каждый агент может рассматриваться как МАС, содержащая агенты нижнего уровня, и вся МАС может рассматриваться как один сложноорганизованный агент.

Но если в качестве агентов рассматриваются реактивные агенты с жестко заданным поведением, то такую систему нельзя назвать в полной мере синергетической, поскольку в ней отсутствует самоорганизация.

Аспект II. Агент (который, в силу холонической организации, является МАС) должен быть проактивным агентом и обладать сложным самоорганизующимся поведением.

© Каганов Ю.Т., Ревунков Г.И., Андреев А.М., Гапанюк Ю.Е., 2020

Важным также является вопрос взаимодействия между агентами. В случае реактивных агентов взаимодействие между ними может рассматриваться как передача управляющих команд в виде вызова функций или обмена сообщениями.

В случае самоорганизующихся проактивных агентов «непосредственная» передача команд невозможна, поскольку противоречит принципу самоорганизации; в этом случае обмен сообщениями может носить лишь информационный характер. В синергетической системе взаимодействие между элементами системы осуществляется в виде параметров порядка, элемент системы верхнего уровня устанавливает параметры порядка для элементов системы нижнего уровня, задавая таким образом «горизонты» его поведения.

В статьях [4—6] показано, что МАС, соответствующая аспекту I, может быть реализована с использованием метаграфового подхода, который включает метаграфовую модель описания данных и знаний, и метаграфовые агенты для их обработки. Но аспект II не может быть реализован в рамках метаграфового подхода, рассмотренного в [4—6]. Далее анализируются основы метаграфового подхода на основе [4—6], а также его расширения, необходимые для реализации аспекта II.

2. Метаграфовая модель описания данных и знаний

Метаграф MG определяется следующим образом: $MG = \langle V, MV, E, ME \rangle$, где V — множество вершин метаграфа; MV — множество метавершин метаграфа; E — множество ребер метаграфа; ME — множество метаребер метаграфа.

Вершина метаграфа характеризуется множеством атрибутов: $v_i = \{atr_k\}$, $v_i \in V$, где v_i — вершина метаграфа; atr_k — атрибут.

Ребро метаграфа характеризуется множеством атрибутов, исходной и конечной вершиной и признаком направленности: $e_i = \langle v_S, v_E, eo, \{atr_k\} \rangle$, $e_i \in E, eo = true \mid false$, где e_i — ребро метаграфа; v_S — исходная вершина (метавершина) ребра; v_E — конечная вершина (метавершина) ребра; eo — признак направленности ребра (eo=*true* — направленное ребро, eo=*false* — ненаправленное ребро); atr_k — атрибут.

Фрагмент метаграфа: $MG_i = \{ev_j\}, ev_j \in (V \cup E \cup MV \cup ME)$, где MG_i — фрагмент метаграфа; ev_j — элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа.

Таким образом, фрагмент метаграфа в общем виде может содержать произвольные вершины (метавершины) и ребра (метаребра) без ограничений. Ограничения вводятся на фрагменты метаграфа, входящие в метавершину и метаребро.

Метавершина метаграфа: $mv_i = \left\langle \{atr_k\}, \{ev_j\} \right\rangle$, $mv_i \in MV$, $ev_j \in (V \cup E^{eo=false} \cup MV \cup ME^{eo=false})$, где mv_i — вершина метаграфа; atr_k — атрибут, ev_j — элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа.

Таким образом, метавершина в дополнение к свойствам вершины включает вложенный фрагмент метаграфа. При этом ребра и метаребра этого фрагмента могут быть только ненаправленными, $eo = false$.

Метаребро метаграфа: $me_i = \left\langle v_S, v_E, eo, \{atr_k\}, \{ev_j\} \right\rangle, e_i \in E, eo = true \mid false$, $ev_j \in (V \cup E^{eo=true} \cup MV \cup ME^{eo=true})$, где me_i — метаребро метаграфа; v_S — исходная вершина (метавершина) ребра; v_E — конечная вершина (метавершина) ребра; eo — признак направленности метаребра ($eo = true$ — направленное метаребро, $eo = false$ — ненаправленное метаребро); atr_k — атрибут; ev_j — элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа.

Таким образом, метаребро, в дополнение к свойствам ребра, включает вложенный фрагмент метаграфа. При этом ребра и метаребра этого фрагмента могут быть только направленными, $eo = true$.

Определения метавершины и метаребра являются рекурсивными, так как элементы ev_j могут быть, в свою очередь, метавершинами и метаребрами. Метавершина является формализмом описания данных, а метаребро — формализмом описания процессов.

Наличие у метавершин собственных атрибутов и связей с другими вершинами — важная особенность метаграфов. Это соответствует принципу эмерджентности, то есть приданию понятию нового качества, несводимости понятия к сумме его составных частей. Фактически, как только вводится новое понятие в виде метавершины, оно «получает право» на собственные свойства, связи и т. д., так как, в соответствии с принципом эмерджентности, новое понятие обладает новым качеством и не может быть сведено к подграфу базовых понятий.

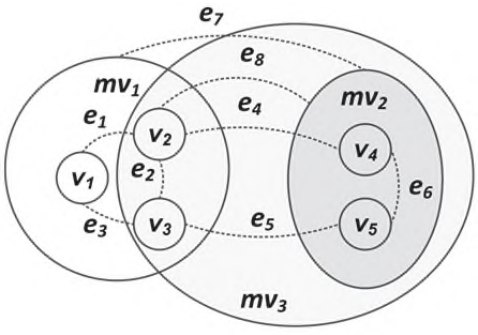


Рис. 1. Пример описания метаграфа данных и знаний

Таким образом, метаграф можно охарактеризовать как разновидность «сети с эмерджентностью», то есть фрагмент сети, состоящий из вершин и связей, может выступать как отдельное целое.

Пример описания метаграфа приведен на рисунке 1. Данный метаграф содержит вершины, метавершины и ребра.

На рисунке 1 показаны три метавершины: mv_1, mv_2 и mv_3. Метавершина mv_1 включает вершины v_1, v_2, v_3 и связывающие их ребра e_1, e_2, e_3. Метавершина mv_2 — вершины v_4, v_5 и связывающее их ребро e_6. Ребра e_4, e_5 — примеры ребер, соединяющих вершины v_2-v_4 и v_3-v_5, включенные в различные метавершины mv_1 и mv_2. Ребро e_7 является примером ребра, соединяющего метавершины mv_1 и mv_2. Ребро e_8 — пример ребра, соединяющего вершину v_2 и метавершину mv_2. Метавершина mv_3 включает метавершину mv_2, вершины v_2, v_3 и ребро e_2 из метавершины mv_1 а также ребра e_4, e_5, e_8, что показывает холоническую структуру метаграфа.

3. Сравнение метаграфовой модели описания данных и знаний с моделью гиперграфа

Рассмотрим формализованную модель классического гиперграфа в соответствии с [7]: $HG = \langle V, HE \rangle, v_i \in V, he_j \in HE$, где HG — гиперграф; V — множество вершин гиперграфа; HE — множество непустых подмножеств V, называемых гиперребрами; v_i — вершина гиперграфа; he_j — гиперребро гиперграфа.

Пример описания гиперграфа показан на рисунке 2. Данный ненаправленный гиперграф включает три гиперребра: he_1, he_2, he_3. Гиперребро he_1 — вершины v_1, v_2, v_4, v_5. Гиперребро he_2 — вершины v_2 и v_3. Гиперребро he_3 включает вершины v_4 и v_5. Гиперребра he_1 и he_2 имеют общую вершину v_2. Все вершины гиперребра he_3 также являются вершинами гиперребра he_1.

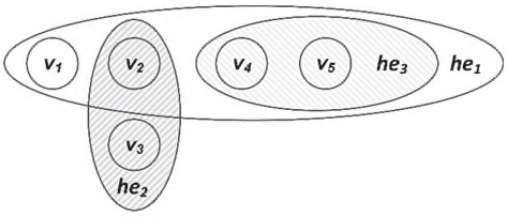


Рис. 2. Пример описания гиперграфа

Сравнивая рисунки 1 и 2, можно отметить некоторые сходства между метавершиной и гиперребром. Но эти сходства достаточно условны. Если гиперребро гиперграфа может включать только вершины, то метавершина метаграфа может включать как вершины (метавершины), так и ребра (метаребра).

В соответствии с определением гиперграфа, операция вложенности для гиперребер не определена явным образом, можно говорить только о пересечении множеств вершин, вложенных в гиперребра. Поэтому хотя гиперграф и содержит гиперребра, но не позволяет моделировать сложные иерархические зависимости и не выступает полноценной «сетью с эмерджентностью». В отличие от гиперграфа, метаграф позволяет естественным образом моделировать сложные иерархические зависимости и является «сетью с эмерджентностью».

4. Изоморфизм метавершины метаграфа и гиперребра иерархического гиперграфа

Существуют расширения гиперграфовой модели, в которых вводится понятие иерархического гиперграфа, который можно определить следующим образом: $HHG = \langle V, HE \rangle, he_j = \{v_i\}, v_i \in V \cup HE, he_j \in V \cup HE$, где HHG — иерархический гиперграф; V — множество вершин гиперграфа; HE — множество гиперребер гиперграфа; v_i — вершина гиперграфа; he_j — гиперребро гиперграфа.

Отличие иерархического гиперграфа от обычного состоит в том, что в иерархическом гиперграфе как вершина, так и гиперребро принадлежат к объединенному множеству вершин и гиперребер. Вершина может рассматриваться как частный случай «пустого» гиперребра. Гиперребро рассматривается как множество (коллекция) вершин и вложенных гиперребер, которое в случае направленного гиперграфа может быть упорядоченным.

Операция вложенности для гиперребер становится иерархической, что позволяет моделировать сложные иерархические зависимости и делает иерархический гиперграф полноценной «сложной сетью с эмерджентностью».

В этом случае определение «иерархического гиперребра» становится изоморфным определению метавершины метаграфа с точностью до ребер между вершинами метаграфа. Как видно из рисунков 1 и 2, гиперребро гиперграфа включает только вложенные вершины (в случае иерархического гиперграфа также вложенные гиперребра), а метавершина метаграфа может включать вложенные вершины, метавершины, а также соединяющие их ребра.

Но, как показано в [8], мы можем считать ребро частным случаем гиперребра (с ограничением на количество вложенных вершин, равное двум) что показано на рисунке 3.

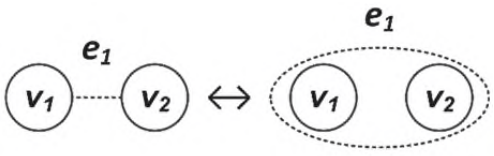


Рис. 3. Ребро как частный случай гиперребра

Этот вывод может показаться несколько парадоксальным с точки зрения классической теории графов. В частности, алгоритмы графового переписывания, основанные на теоретико-категорном подходе, рассматривают вершины как домен и кодомен категории, а ребра как морфизм категории. При таком подходе вершины и ребра считаются принципиально различными объектами.

Но с точки зрения системного подхода в этом нет ничего удивительного. Можно рассматривать ребро как совокупность двух вложенных вершин, при этом факт наличия ребра между вершинами обозначает появление эмерджентности. Две вершины, соединенные ребром, представляют собой отдельный объект, более высоко организованный, чем просто две отдельные вершины.

Тогда метавершина (которая при таком рассмотрении становится полностью изоморфна «иерархическому гиперребру») представляет собой эмерджентность более высокого порядка, которая включает как исходные вершины, так и соединяющие их ребра, и, возможно, метавершины нижнего уровня. Элементарные вершины представляют собой ноль-эмерджентность, то есть рассматриваются как атомарные элементы, внутренняя организация которых в модели не учитывается.

5. Синергетическая метавершина метаграфа

Для реализации аспекта II будем использовать синергетическую метавершину метаграфа, которая является расширением метаграфовой модели.

Синергетическая метавершина метаграфа: $smv_i = \left\langle \{atr_k\}, \{ev_j\}, O_{ev}, OP \right\rangle$, $smv_i \in MV$, $ev_j \in (V \cup E^{eo=false} \cup MV \cup ME^{eo=false})$, $OP = \{op_k\}$, где smv_i — синергетическая метавершина метаграфа, принадлежащая множеству метавершин MV; atr_k — атрибут, ev_j — вложенный элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа; O_{ev} — закон организации вложенных элементов, подчиняющийся множеству параметров порядка OP; op_k — параметр порядка.

Закон организации вложенных элементов может рассматриваться в качестве расширения понятий ребра и гиперребра. Если использование ребер и гиперребер предполагает связь между конкретными вершинами, то закон организации вложенных элементов может рассматриваться как аналог физического поля, которое организует вложенные элементы в непрерывном пространстве. Параметры порядка определяют характер организации вложенных элементов.

В качестве примера физического поля рассмотрим простой пример «псевдогравитационного поля», определяемого законом всемирного тяготения. Подобный подход применяется для визуализации элементов множества на плоскости. Пусть есть множество объектов информационной системы ev_j, сформированных в результате обработки данных. Для визуализации объектов на плоскости будем использовать синергетическую метавершину, реализующую закон «псевдогравитационного поля»:

$$F_{ik} = op_G \frac{m_i \cdot m_k}{R^2} \Rightarrow R = \sqrt{op_G \frac{m_i \cdot m_k}{F_{ik}}},$$

где m_i и m_k — атрибуты i-го и k-го вложенных элементов метавершины, соответствующие «массам» элементов; F_{ik} — атрибут ребра, связывающего i-й и k-й элементы, атрибут соответствует силе взаимодействия между элементами; R — результирующее расстояние между элементами, используемое алгоритмом визуализации; op_G — параметр порядка, соответствующий гравитационной постоянной.

В данном примере в качестве закона организации вложенных элементов O_{ev} используется закон «псевдогравитационного поля», единственным параметром порядка которого является op_G, соответствующий гравитационной постоянной.

В случае изменения параметра порядка агентом верхнего уровня производится повторное вычисление результирующих расстояний между элементами. Изменение гравитационной постоянной приводит к масштабированию расстояний между элементами.

Рассмотренный пример очень простой и лишь в минимальной степени демонстрирует концепцию синергетической метавершины, поскольку закон всемирного тяготения не предполагает полноценной самоорганизации вложенных элементов.

Отметим, что синергетическая метавершина метаграфа относится к пассивной части системы. Для реализации активности применяется концепция «активного метаграфа»: $MG^{ACTIVE} = \langle MG^D, AG^{MG} \rangle, AG^{MG} = \{ag_i\}$, где MG^{ACTIVE} — активный метаграф; AG^{MG} — набор метаграфовых агентов ag_i, связанных с «пассивным» метаграфом данных и знаний MG^D.

Таким образом, активный метаграф содержит как метаграфовое описание данных и знаний, так и правила обработки данных, заданные в виде агентов. Задачами агентов, в частности, являются пересчет характеристик вложенных элементов на основе закона организации вложенных элементов, задание параметров порядка для метавершин нижнего уровня.

Заключение

Предложенный подход на основе синергетической метавершины метаграфа дает возможность расширить метаграфовый подход для описания синергетических интеллектуальных систем. Синергетическая метавершина позволяет организовывать вложенные элементы метавершины в непрерывном пространстве на основе параметров порядка. Применение активных метаграфов дает возможность устанавливать параметры порядка для метавершин нижнего уровня.

Список литературы

1. *Кириков И.А., Колесников А.В., Листопад С.В.* Моделирование систем поддержки принятия решений синергетическим искусственным интеллектом // Информатика и ее применения. 2013. Т. 7, вып. 3. С. 62—69.

2. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.* Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М. : ИПИ РАН, 2014.

3. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002.

4. *Самохвалов Э.Н., Ревунков Г.И., Гапанюк Ю.Е.* Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2015. Вып. №1. С. 83—99.

5. *Черненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е.* Структура гибридной интеллектуальной информационной системы на основе метаграфов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. Вып. №9. С. 3—14.

6. *Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И. и др.* Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем // Прикладная информатика. 2017. №3 (69), т. 12. С. 57—79.

7. *Voloshin V.I.* Introduction to Graph and Hypergraph Theory. Nova Science Publishers, Inc., 2009.

8. *Гапанюк Ю.Е.* Подход к разработке метаграфового исчисления. Динамика сложных систем — XXI век. 2018. Вып. №3. С. 40—46.

Б.К. Лебедев[1], О.Б. Лебедев[2], А.Э. Фонова[3]
Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
e-mail: [1]lebedev.b.k@gmail.com, [2]lebedev.ob@mail.ru, [3]fonova.anya@yandex.ru

ПЛАНИРОВАНИЕ ДВУХМЕРНОЙ ТРАЕКТОРИИ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ВОЛНОВОГО И МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМОВ

Введение

В работе описывается гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории в условиях частичной неопределенности для двухмерного пространства, основанный на интеграции волнового и муравьиного алгоритмов. Процесс прокладки траектории осуществляется пошагово. На каждом шаге относительно текущей позиции подвижного объекта (ПО) формируется зона, в пределах которой с помощью радара осуществляется локализация всех препятствий, после чего строится отдельный участок траектории, являющийся продолжением ранее построенного участка. А вся траектория выступает совокупностью отдельных участков. Временная сложность этого алгоритма зависит от времени жизни колонии l (число итераций), количества вершин графа n и числа муравьев m и определяется как $O(l \cdot n^2 \cdot m)$.

1. Постановка задачи и схема базового алгоритма

Существует множество классификаций, постановок и методов решения задач проектирования траекторий [1; 2]. Но в любом случае можно выделить два класса задач. В задачах первого класса предусматривается использование проекта (траектории) после того, как она будет полностью спроектирована. В задачах второго класса процессы синтеза (прокладки) траектории и пере-

© Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Фонова А.Э., 2020

движения по ней подвижного объекта (ПО) связаны, причем перемещение по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой). Это связано с неопределенностью ограничений на карте местности, препятствующих прокладке траекторий. Наличие неопределенности обусловлено тем, что применительно к ПО такие препятствия не локализованы, т. е. система управления предварительно не имеет никакой информации ни об их форме, ни о размере, ни тем более о положении. Ограничения, препятствующие прокладке траектории из текущей позиции, выявляются после достижения траекторией этой позиции. Последовательно на каждом шаге относительно текущей позиции ПО формируется локальная зона видимости (ЛЗВ). В пределах ЛЗВ с помощью радара ПО определяются координаты (локализация) всех препятствий [3; 4]. После этого ПО перемещается в пределах ЛЗВ по кратчайшему пути от текущей позиции к новой позиции, которая объявляется текущей.

Наибольшее распространение для построения маршрута на плоскости получили волновые алгоритмы [5]. Карта местности при волновой трассировке разбивается на квадраты (ячейки) (рис. 1). На первом этапе в процессе распространения волны от источника к цели ячейкам дискретного рабочего поля (ДРП) присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности (рис. 1, *а*). На втором этапе алгоритма осуществляется построение пути. Для этого следует, начиная от ячейки — цели, двигаться в направлении, противоположном направлению распространения волны, переходя от ячейки с большим весом к смежной ячейке с меньшим весом до тех пор, пока не будет достигнута ячейка — источник (рис. 1, *б*). Ячейки ДРП, выбранные в ходе указанного процесса, и определяют искомое оптимальное соединение минимальной длины.

□	□	□	□	□	□	□	□	□
□	3	2	1	■				□
□	2	1	**A**	■				□
□	3	■	■	■	■			□
□	4	5	6	■	14	15	**B**	□
□	5	6	7	■	13	■	15	□
□	6	7	■	■	12	■	14	□
□	7	8	9	10	11	12	13	□
□	8	9	10	11	12	13	14	□
□	9	10	11	12	13	14	15	□
□	□	□	□	□	□	□	□	□

а

□	□	□	□	□	□	□	□	□
□				■				□
□	2	1	**A**	■				□
□	3	■	■	■	■			□
□	4			■			**B**	□
□	5			■		■	15	□
□	6	7	■	■		■	14	□
□		8	9	10	11	12	13	□
□								□
□								□
□	□	□	□	□	□	□	□	□

б

Рис. 1. Карта местности при волновой трассировке:
а — ячейкам дискретного рабочего поля присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности; *б* — построение пути (обозначения: □ — граница коммутационного поля; ■ — занятые ячейки)

Волновой алгоритм обеспечивает построение пути минимальной длины. Отличительная особенность волнового алгоритма — наличие альтернатив при построении обратного следа минимальной длины. В связи с этим актуальна разработка методов, позволяющих выбирать лучший вариант минимального пути при построении обратного следа.

В последнее время для решения различных «сложных» задач все чаще используются способы, основанные на применении методов случайного направленного поиска. В основе большинства этих алгоритмов лежат метаэвристики, заимствованные в природе [5; 6]. К таким методам относятся метод моделирования отжига, методы генетического поиска (эволюционная адаптация), методы роевого интеллекта, методы альтернативной поисковой адаптации на основе вероятностных обучающихся автоматов.

В ряде работ [7—10] описываются подходы на основе различных эвристических методов к решению данной задачи, которые пока не показали слишком хороших результатов. Анализ методов решения сложных прикладных задач показывает, что применение любого одного алгоритма оптимизации (как классического, так и популяционного) далеко не всегда приводит к успеху. В гибридных (комбинированных) алгоритмах, объединяющих разные либо одинаковые алгоритмы, но с различными значениями свободных параметров, преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. Поэтому один из основных путей повышения эффективности решения оптимизационных задач в настоящее время — разработка гибридных популяционных алгоритмов [11].

Карта местности первоначально разбивается на множество ячеек с заданным шагом дискретизации и представляется в виде дискретного рабочего поля (ДРП). Модель такого рода называют *рецепторной.* Рецепторную модель карты можно представить в виде графа. Вершины графа соответствуют ячейкам. Если две ячейки смежны, то аналогичные этим ячейкам вершины графа связаны ребром. Вершины графа представляют все возможные размещения ПО в пространстве поиска. Данные о препятствиях поступают от сенсорной системы ПО. Координаты препятствий совмещают с вершинами графа. Вершины помечаются как препятствия, и происходит удаление ребер вокруг каждой вершины. В пространстве сформированного графа идет поиск оптимального пути.

Основными показателями при планировании траектории являются: *длина* (P_L)*, показатель безопасности* (S_m)*, время выполнения задания* (t_m)*, коэффициент успешности миссии* (M) [1; 4]: P_L — длина всей траектории, пройденной ПО от начальной точки до цели; S_m — минимальное расстояние между любым датчиком ПО и любым препятствием вдоль всей траектории; этот показатель определяет максимальный риск в течение всего движения; t_m — время, необходимое для завершения движения; V — количество успешных миссий в недетерминированных средах со сложными препятствиями.

В общем случае планирование траектории производится в соответствии с алгоритмом, представленным ниже.

1. $t = 0$.

2. Поместить подвижный объект (ПО) в текущую позицию (ТП) $p(t)$.

3. Сгенерировать локальную зону видимости $z(t)$ относительно точки $p(t)$.

4. Зафиксировать неподвижные объекты в пределах ЛЗВ $z(t)$.

5. Объединить все сгенерированные ЛЗВ в одну объединенную ЛЗВ (ОЛЗВ) $Oz(t)$. Считать, что за пределами ОЛЗВ $Oz(t)$ на поле нет препятствий.

6. Построить на поле траекторию между точками $p(t)$ и *цель*.

7. Если точка *цель* входит в ОЛЗВ, то траектория сформирована полностью и переход к 10, иначе переход к п. 8.

8. На участке построенной траектории, входящем в ЛЗВ $z(t)$, выбирается текущая позиция $p(t+1)$, в которую перемещается ПО.

9. $t = t+1$. Переход к п. 2.

10. Конец работы алгоритма.

Интегральная оценка траектории: $W = k_1P_L + k_2S_m + k_3t_m + k_4/V$.

2. Гибридный алгоритм ситуационного планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности

В общем случае интеграция основана на сращивании механизмов волнового и муравьиного алгоритмов и реализуется при выполнении двух основных этапов. На первом этапе путем распространения на ДРП волны от источника к цели формируется пространство поиска — R, представляющая совокупность связных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами. На втором этапе муравьиным алгоритмом на базе сформированного пространства поиска R прокладывается маршрут.

Формируется рецепторная модель карты местности, включающая множество ячеек $E = \{e_i | i=1,2,...,n_e\}$. Каждая ячейка имеет координаты (x_i,y_i). Задаются ячейка e_u, которая помечается как исходная позиция *ИП*, в которую помещается ПО и ячейка $e_ц$, помечаемая как целевая позиция (*цель*). Изначально все ячейки считаются свободными.

Процесс планирования траектории итерационный и включает пять этапов, выполняемых на каждой итерации t. На каждой итерации строится отдельный участок траектории, являющийся продолжением ранее построенного участка. А вся траектория является совокупностью отдельных участков, связывающая исходную позицию ПО с целевой позицией.

На первом этапе по данным радара, размещенного на данной итерации t в точке (ячейке) $ТП(t)$ (текущая позиция), формируется локальная зона видимости: выявляются ее границы на модели карты местности и выявляются содержащиеся в ней препятствия. Ячейки с препятствиями помечаются. Координаты точки $ТП(t)$ определяются на предыдущей итерации $(t-1)$. Данные радара, полученные на итерации t, объединяются с данными на предыдущих $(t-1)$ итерациях.

На втором этапе путем распространения на ДРП волны от источника (точка $ТП(t)$) к точке *цель* формируется пространство поиска траектории — $ППТ(t)$, представляющая совокупность связных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами.

На третьем этапе муравьиным алгоритмом на сформированной области *ППТ*(*t*) прокладывается траектория *M*(*t*) из точки *цель* к точке *ТП*(*t*). Отметим, что траектория *M*(*t*) состоит из двух частей. Вторая часть траектории *M2*(*t*) проходит через зону, свободную от препятствий, первая часть *M1*(*t*) проходит через зону видимости с содержащимися в ней препятствиями.

На четвертом этапе на первой части траектории часть *M1*(*t*) выбирается входящая в ее состав ячейка e_k с максимальным весом, являющаяся концевой в составе *M1*(*t*). Следующая в траектории *M*(*t*) за ячейкой e_k ячейка e_n лежит уже во второй части траектории *M2*(*t*) .

На пятом этапе в *M1*(*t*) выбирается ячейка e_p с меньшим в сравнении с ячейкой e_k весом на величину δ. Параметр δ является управляющим. ПО перемещается по траектории *M1*(*t*) из точки *ТП*(*t*) в ячейку e_p. Участок на первой части траектории часть *M1*(*t*) между точками *ТП*(*t*) и e_p включается в планируемую траекторию. Ячейка e_p далее рассматривается как новая текущая позиция ПО на следующей итерации (*t*+1). Участок *M2*(*t*) удаляется.

На рисунке 2 показана сформированная карта местности с размещенными на ней двумя точками — исходной позицией ПО и целью. Отражены результаты выполнения: первого этапа — сформирована ЛЗВ и выявлены содержащиеся в ней препятствия; второго этапа — путем распространения на ДРП волны от источника (точка *ТП*(*t*)) к точке *цель*, сформировано пространство поиска траектории *ППТ*(*t*) с присвоением весов свободным ячейкам; третьего этапа — муравьиным алгоритмом на сформированной области *ППТ*(*t*) проложена траектория *M*(*t*) из точки *цель* к точке *ТП*(*t*), разбиение *M*(*t*) на две части $M1(t) = (e_u, e_к)$ и $M2(t) = (e_n, e_ц)$; четвертого этапа — фиксация в *M1*(*t*) концевой вершины e_k (ячейка с координатами (5; 4); пятого этапа — выбрана новая текущая позиция (ячейка e_p с координатами (5; 3)) на участке *M1*(*t*), в которую перемещается ПО. $e_u = (1,1)$, $e_ц = (10,7)$, $e_к = (5,4)$, $e_n = (5,5)$, $e_p = (5,3)$.

На рисунке 3 представлены результаты выполнения первого этапа на второй итерации: сформирована ЛЗВ, выявлены препятствия, отражен маршрут, спроектированный на предыдущей итерации. Точка *ТП*(*t*) помещена в ячейку с координатами (5; 3).

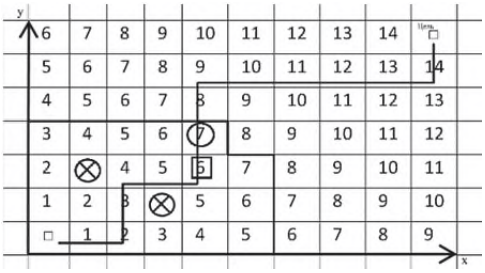


Рис. 2. Карта местности

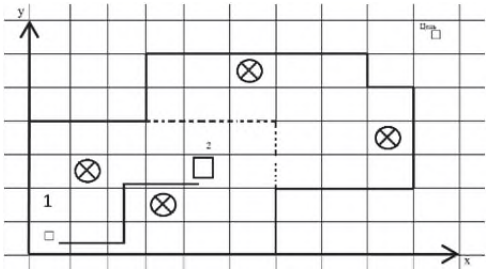


Рис. 3. Первый этап на 2-й итерации

На рисунке 4 видим результаты выполнения: второго этапа — путем распространения на ДРП волны от источника (точка *ТП*(*t*)) к точке *цель*, сформировано пространство поиска траектории *ППТ*(*t*) с присвоением весов свободным ячейкам; третьего этапа — муравьиным алгоритмом на сформированной области *ППТ*(*t*) проложена траектория *M*(*t*) из точки *цель* к точке *ТП*(*t*), разбиение *M*(*t*) на две части *M1*(*t*) и *M2*(*t*), четвертого этапа — фиксация концевой вершины e_k (ячейка с координатами (8;6) в *M1*(*t*); пятого этапа — выбрана новая текущая позиция (ячейка с координатами (8;5)) на участке *M1*(*t*), в которую перемещается ПО.

На рисунке 5 отражены результаты выполнения первого этапа на третьей итерации: сформирована ЛЗВ, выявлены содержащиеся в ней препятствия, а также маршрут.

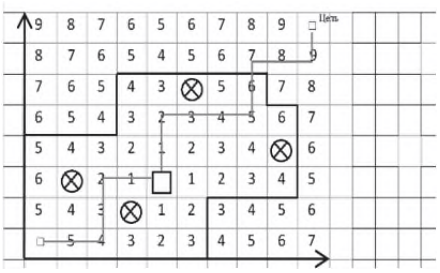


Рис. 4. Распространение волны

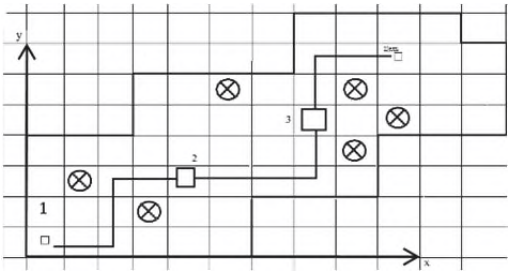


Рис. 5. Результаты первого этапа

Точка *ТП*(*t*) помещена в ячейку с координатами (8; 5). Поскольку точка *цель* лежит в зоне видимости, на четвертом этапе третьей итерации муравьиным алгоритмом прокладывается участок планируемой траектории *M*(*t*) из точки *цель* к точке *ТП*(*t*) (ячейка с координатами (8; 5)).

3. Муравьиный алгоритм прокладки маршрута

В соответствии с гибридным алгоритмом после распространения волны на ДРП от источника (точка *ТП*(*t*)) к точке *цель* и присвоение веса ячейкам ДРП муравьиным алгоритмом на ДРП из точки *цель* в точку *ТП*(*t*) строится маршрут *M*(*t*).

Метаэвристика муравьиного алгоритма основывается на комбинации двух техник: общая схема строится на базовом методе, в которую включается встроенная процедура. Встроенная процедура — это самостоятельный алгоритм решения той же задачи, что и метаэвристический метод в целом. Базовый метод заключается в реализации итерационной процедуры поиска лучшего решения на основе механизмов адаптивного поведения муравьиной колонии. Встроенная процедура — это конструктивный алгоритм построения муравьем некоторой конкретной интерпретации решения [12].

Отметим, что поиск решения осуществляется популяцией муравьев на некоторой графовой модели пространства поиска.

Каждая итерация l базового метода включает три этапа. На первом этапе каждый муравей популяции находит решение, на втором этапе каждый муравей откладывает феромон на некоторой графовой модели пространства поиска, на третьем этапе осуществляется испарение феромона. В работе применяется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем [12], т. е. феромон откладывается каждым агентом на ребрах графа после полного формирования решения.

Основная идея интеграции, используемая в рассмотренном выше гибридном алгоритме, заключается в том, что конструктивный алгоритм построения муравьем траектории базируется на использовании отдельных процедур волнового алгоритма. Построение муравьем траектории осуществляется на базе сформированного пространства поиска $ППТ(t)$ после распространения на ДРП волны от источника к точке *цель*, с присвоением весов свободным ячейкам. Подобно волновому алгоритму муравей строит на $ППТ(t)$ маршрут, представляющий совокупность ячеек с последовательно уменьшающимся весом. Всеми муравьями будут построены маршруты одной минимальной длины, но отличающиеся конфигурациями. В этом случае оценкой маршрута M_k, построенного агентом a_k, служит оценка его конфигурации $F_k = \alpha f_{rk} + \beta f_{gk}$, где α, β — управляющие параметры, которые подбираются экспериментально; f_{rk} — число поворотов маршрута M_k; f_{gk} — число содержащих препятствии ячеек, смежных ячейкам маршрута M_k.

Чем меньше f_{rk}, тем меньше показатель *время выполнения задания* — время, необходимое для завершения движения.

Чем меньше f_{gk}, тем выше *показатель безопасности* — число позиций ПО на минимальном расстоянии между ПО и любым препятствием вдоль всей траектории.

Цель оптимизации — минимизация значения F_k.

Отметим, что показатели P_L, S_m, t_m, V не являются объектами оптимизационных процедур. Объект оптимизации — показатель $F_k = \alpha f_{rk} + \beta f_{gk}$, минимизация которого на базе эвристик гибридного алгоритма планирования косвенно способствует минимизации интегральной оценки траектории $W = k_1 P_L + k_2 S_m + k_3 t_m + k_4 / V$.

Процедура построения соединения в гибридном алгоритме представляется в виде двух алгоритмов.

Алгоритм поведения муравьиной колонии. На основе выполнения начального, первого — пятого этапов построения траектории формируются исходные данные, необходимые для работы муравьиного алгоритма: определены ячейка-цель $e_ц$ и ячейка-источник e_u; формируется область прокладки маршрута R; всем ячейкам e_i области трассировки R присваивается вес $\rho(e_i)$.

Алгоритм 2 поведения муравья. Агент a_k для построения маршрута в графе G помещается в начальную вершину $v_0 = e_ц$. Далее агент a_k определяет множество вершин $E_k(t+1) \subset E$ для включения в маршрут $M_k(t+1)$. Для каждой вершины $e_i \in E_k(t+1)$ рассчитывается вероятность P_i ее включения в

формируемый маршрут $M_k(t+1)$. Случайным образом в соответствии с рассчитанными вероятностями выбирается вершина $e_i^* \in E_k(t+1)$, которая включается в маршрут $M_k(t+1)$.

4. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов использовалась процедура синтеза контрольных примеров с известным оптимумом по аналогии с известным методом PEKU (Placement Examples with Known Upper bounds on wirelength).

Для задачи планирования траектории созданы четыре набора примеров с известным оптимумом по длине траектории и оптимальным значением $F_{опт}$ оценки конфигурации траектории F_k. Для генерации примеров применялся следующий метод: на вход подается модель локальной зоны видимости, содержащей препятствия, и координаты двух связываемых точек, размещенных на ЛЗВ. Затем генерируется пример трассировки в ЛЗВ, который имеет заранее известное оптимальное значение $F_{опт}$. Оптимизация проводилась по критерию минимальной длины траектории и оптимального значения оценки конфигурации и опиралась на методику, изложенную в [1; 4]. Для каждого примера сначала фиксировался параметр N — объем популяции и анализировалось значение параметра I — количество итераций. Проводилась серия из 10 экспериментов для каждого фиксированного набора параметров. На основе обработки экспериментальных исследований построена средняя зависимость качества решений от числа итераций (рис. 6).

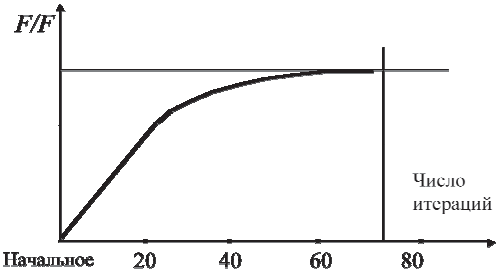


Рис. 6. Зависимость качества решений от числа итераций

Оценкой качества служит величина $F_k/F_{опт}$, где F — оценка полученного решения. Исследования показали, что число итераций, при которых алгоритм находил лучшее решение, лежит в пределах 68—80. Из графика видно, что в среднем на 76-й итерации решение близко к оптимальному. Общая оценка ВСА при любом подходе к гибридизации лежит в пределах $O(n^2)$—$O(n^3)$. Сравнение значений критерия, полученных гибридным алгоритмом на тестовых примерах, с известным оптимумом показало, что у 60% примеров решение было оптимальным, у 15% — на 5% хуже, а у 25% — хуже не более, чем на 2%.

Сравнительный анализ проводился на тестовом наборе сцен, приведенном в [1]. Сравнение разработанного гибридного алгоритма с известными алгоритмами [9—12], по интегральной оценке, траектории W показало, что при меньшем времени работы у полученных с помощью разработанного алгоритма решений значения F_T меньше в среднем на 6%.

На рисунке 7 приведены примеры проложенных соединений.

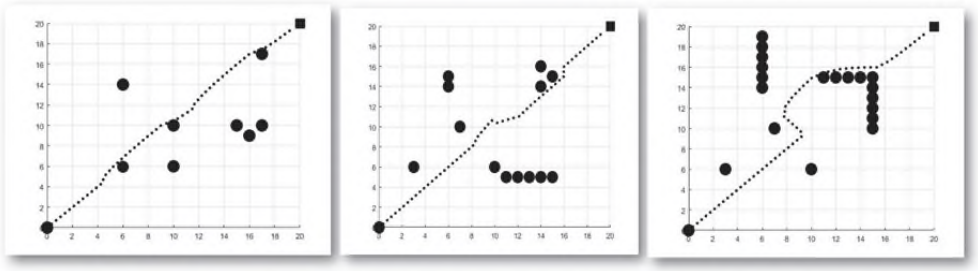


Рис. 7. Примеры сцен с построенными траекториями

Заключение

Несмотря на достаточно большое число разработанных моделей и алгоритмов управления подвижными объектами в условиях неопределенности, исследователи часто сталкиваются с рядом проблем, к числу которых относятся трудность в обосновании качества результатов анализа, учитывающего специфику конкретной задачи.

В числе перспективных тенденций — разработка гибридных методов. В гибридных (комбинированных) алгоритмах, объединяющих различные либо одинаковые алгоритмы, но с различными значениями свободных параметров, преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого.

В работе предлагается гибридный алгоритм, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути. Отличительная особенность заключается в том, что перемещение подвижного объекта по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой), в режиме on-line.

Ключевая проблема, решенная в данной работе, — методика сращивания механизмов муравьиного и волнового алгоритмов, позволившая усовершенствовать вопросы, связанные с формированием зоны видимости и выбором (сменой) текущих исходных позиций, что ускоряет процесс достижения подвижным объектом целевого состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-07-00645.

Список литературы

1. *Пшихопов В.Х. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихопова. М. : Физматлит, 2014.

2. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М. : Наука, 2011.

3. *Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О. и др.* Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интеллектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. №2 (175). С. 67—80.

4. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. 2015. №4. С. 66—74.

5. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 2014.

6. *Caro G.Di, Ducatelle F., Gambardella L.M.* AntHocNet: An adaptive nature inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks // European Transactions on Telecommunications. 2005. №16 (5). P. 443—455.

7. *Hoefler T., Snir M.* Generic Topology Mapping Strategies for Large-scale Parallel Architectures // University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana. 2011. P. 75—85.

8. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В. и др.* Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. №3 (176). С. 127—143.

9. *Fatemeh K.P., Fardad F., Reza S.N.* Comparing the Performance of Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization Algorithm for Mobile Robot Path Planning in the Dynamic Environments with Different Complexities // Journal of Academic and Applied Studies. 2013. Vol. 3(2). P. 29—44.

10. *Chen S., Eshaghian M.M.* A fast recursive mapping algorithm // Department of computer and information science. New Jersey, USA: New Jersey, 013. P. 219—227.

11. *Raidl G.R.* A Unified View on Hybrid Metaheuristics. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 2006. P. 1—12.

12. *Лебедев О.Б.* Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования : монография. Таганрог : Изд-во ЮФУ, 2013.

С.В. Листопад[1], С.Б. Румовская[2]

[1,2] Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН, [2] БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия

e-mail: [1]ser-list-post@yandex.ru, [2]sophiyabr@gmail.com

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРОТОТИП ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГЕТЕРОГЕННОГО МЫШЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Введение

Характерная особенность управления сложными системами в реальном времени — невозможность всестороннего анализа возникающих при этом проблем и, как следствие, принятие решений на основе неполных знаний и данных [1]. Проблемы, характеризующиеся неточностью, неоднородностью, взаимозависимостью принимаемых решений, требуют для своего решения коллективной работы экспертов в различных областях знаний. В условиях динамичной среды решение, полученное таким коллективом в ходе длительных совещаний, может потерять актуальность на момент своего принятия.

© Листопад С.В., Румовская С.Б., 2020

В практике управления сложными динамическими системами, такими как электроэнергетика, городская транспортная система, экстренные службы, подобные коллективы не занимаются непосредственным управлением, а вырабатывают рекомендации, руководящие принципы, инструкции и операционные процедуры решения типовых проблем на основе предыдущего опыта, которым должен следовать оперативно-диспетчерский персонал. Недостатки такого подхода: в условиях, не предусмотренных инструкциями, оперативно-диспетчерский персонал вынужден решать проблемы на основе неполных знаний и данных; сложно предусмотреть все варианты развития событий особенно для редко возникающих проблем; по мере накопления опыта решения проблем инструкции становятся объемнее и сложнее, что снижает скорость принятия решений, а также требует высокой квалификации оперативно-диспетчерского персонала и его регулярного переобучения.

В этой связи актуальна разработка интеллектуальных информационных систем, способных обрабатывать большие объемы непрерывно поступающей информации в реальном времени и вырабатывать решение возникающей проблемы без упрощения и идеализации. Для этого предлагается новый класс интеллектуальных систем — гибридные интеллектуальные многоагентные системы гетерогенного мышления (ГИМСГМ). Они комбинируют гибридный интеллектуальный подход А. В. Колесникова [2], аппарат многоагентных систем в смысле В. Б. Тарасова [3] и методики гетерогенного мышления [4—6]. Такие системы интегрируют знания экспертов различных специальностей, обеспечивают согласование нескольких критериев оптимальности и учет множества ограничений в условиях динамических непосредственно ненаблюдаемых сред и дефицита времени на принятие решения.

1. Проблема восстановления электроснабжения после аварии

Аварийная ситуация — состояние системы электроснабжения (СЭС), связанное с изменениями в нормальной работе оборудования, создающими угрозу возникновения аварии [7]. Аварийные участки СЭС отключаются за милисекунды, а система разделяется на несбалансированные по нагрузке и генерации подсистемы несколько секунд спустя. Погашения происходят спустя несколько минут после деления, а системы восстанавливаются спустя несколько часов или дней после погашения [8]. Процесс восстановления СЭС — наращивание ее структуры во времени при согласовании подготовки и ввода множества взаимозависимых объектов, сохранивших работоспособность после аварии, а также объектов, работоспособность которых восстанавливается действиями персонала [9].

Планирование восстановления энергосистемы — комбинаторная проблема, требующая обширных знаний, включающая множество ограничений и условий, по которым необходимы оценки операторов, что дополнительно усложняет ее комплексное решение [10]. Три основные особенности относят эту проблему к весьма интересным для современных планировщиков: ча-

стичная наблюдаемость, размерность пространства состояний, которая делает полное перечисление состояний абсолютно невозможным, сложность моделирования последствий действий [11].

Известно множество постановок данной проблемы, и предлагаются новые методы восстановления, альтернативные к обычно используемым процедурам. Большинство из них рассматривают проблему в упрощенном, «игровом» виде, из-за чего они останавливаются на стадии разработки опытного образца [10]. Такое «игровое» планирование восстановления энергосистемы (ИПВЭ) может быть представлено следующим образом.

Электросеть представляется графом $PS = < V, E >$ с узлами V трех типов: центр питания $v^s \in V^s \subseteq V$, потребитель $v^l \in V^l \subseteq V$ и шина $v^b \in V^b \subseteq V$. Ребра графа E обозначают линии электропередач с выключателями, размыкающими или замыкающими линию. Запитанные линии образуют радиальную структуру, т. е. в графе отсутствуют циклы запитанных линий. Центр питания характеризуется величиной максимальной генерируемой мощности, потребитель — величиной номинальной потребляемой мощности и состоянием (запитан/отключен), а линии электропередач — состоянием (включена/отключена), пропускной способностью и работоспособностью (исправна/авария). Требуется определить, какие линии нужно включить/выключить и в каком порядке, чтобы обеспечить максимально возможный объем потребления мощности при соблюдении эксплуатационных ограничений: поддержание радиальной структуры включенных линий; для каждой линии суммарная величина нагрузок, которые питаются через эту ветвь, не должна превышать пропускную способность ветви.

Пример графа электросети для такой задачи показан на рисунке 1.

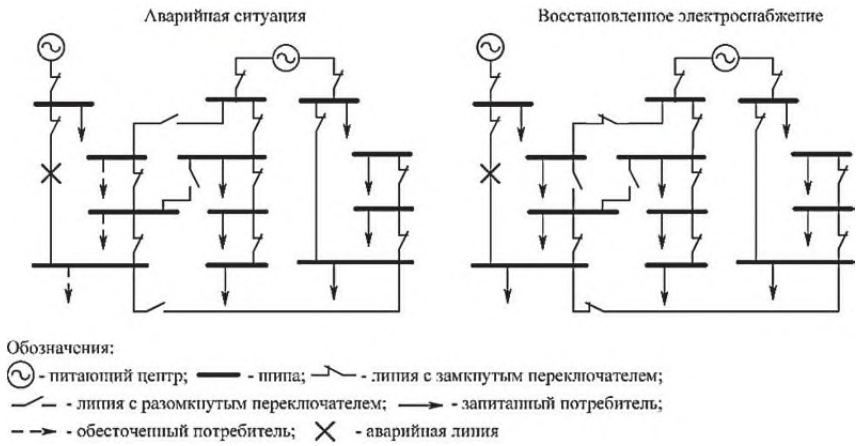


Рис. 1. Пример графа при «игровом» планировании восстановления энергосистемы

В левой части рисунка в нормальном состоянии все нагрузки распределены между двумя питающими центрами, циклы из замкнутых линий отсут-

ствуют. При возникновении аварии в такой сети три потребителя, отмеченные штриховыми стрелками обесточиваются. Ситуация восстановления электроснабжения, когда всех обесточенных потребителей нельзя запитать от одной линии электропередач из-за возникающей перегрузки, показана на рисунке 1 справа. В этом случае погашенный участок разделен на две части размыканием замкнутого в нормальном состоянии выключателя. После этого становится возможным запитать обесточенных потребителей от разных линий рабочей части сети.

Такое «игровое» планирование восстановления энергосистемы используется для тестирования методов оптимизации с целью последующей крупно- или мелкозернистой их гибридизации для решения проблемы планирования восстановления энергосистемы (ППВЭ). Без гибридизации методы игрового планирования нерелевантны ППВЭ из-за существенно большего числа типов объектов и их свойств, учитываемых для построения допустимого плана, а также характерных для ППВЭ НЕ-факторов в смысле А. С. Нариньяни [12]. Увеличение количества типов моделируемых объектов связано, например, с невозможностью дистанционных переключений в части электросети, наличия распределенной генерации и активных потребителей, необходимостью учета физических процессов в электросети. К числу НЕ-факторов ППВЭ можно отнести, например, следующие: недоопределенность места аварии на момент планирования восстановления; неточность величины мощности потребляемой каждым клиентом и генерируемой каждым источником распределенной генерации; нечеткости времени выполнения операций по восстановлению элементов электросети; некорректность работы датчиков аварийного режима; неполнота модели электросети.

На основе анализа работ [10; 11; 13—15], посвященных планированию восстановления распределительной электросети после аварий, сформулирована ППВЭ, состоящая в разработке плана восстановления энергосистемы в виде последовательности событий переключения выключателей, очередности поездок ремонтных бригад для выполнения переключений и восстановительных работ. Исходные данные для ППВЭ представляются следующими множествами: 1) элементов электросети; 2) отношений инцидентности между элементами электросети; 3) расположений; 4) маршрутов проезда между расположениями; 5) ремонтных бригад; 6) транспортных средств; 7) ресурсов для восстановления электросети; 8) действий по восстановления электросети. Критерии оптимальности плана: минимизация времени отключения приоритетной нагрузки, максимизация общей восстановленной мощности нагрузки, максимизация показателя надежности энергосистемы (устойчивости к последующим авариям). Ограничения на план: сохранение радиальной структуры сети запитанных линий; для каждой линии суммарная величина нагрузок, которые питаются от источника распределенной генерации через нее, не должна превышать ее пропускную способность; соблюдение балансов активной и реактивной мощностей; величины напряжения и частоты должны лежать в допустимых пределах; потребители, не затронутые первоначальным

отключением, не должны отключаться в результате переключений; выполнение работ бригадами с соответствующим допуском при наличии в их транспортном средстве необходимых ресурсов; вместимость транспортного средства; рабочее время бригад; транспортные средства должны вернуться на базу; при принудительном разделении энергосистемы на острова линии связи между островами должны иметь оборудование синхронизации для последующего объединения островов.

В соответствии с проблемно-структурной методологией А.В. Колесникова [2] проблема редуцирована в декомпозицию из следующих задач (рис. 2): 1) локализация места аварии с учетом возможности отказа датчиков аварийного режима, для решения которой необходимы знания инженера по релейной защите и автоматике; 2) оперативное и краткосрочное прогнозирование активной и реактивной мощностей, потребляемых клиентами после подключения к сети, для решения которой востребованы знания инженера по анализу и прогнозированию режимов энергопотребления; 3) оценка требований к выполнению действий по восстановления элементов электросети, решению которой релевантны знания инженера по ремонту энергетического оборудования; 4) построение маршрутов выездных бригад для выполнения переключений и восстановления поврежденного оборудования (актуальны знания начальника района электрических сетей); 5) определение порядка переключений, для решения которой нужны знания инженера по оперативным режимам организации электроэнергетики; 6) составление плана восстановления — задача координации промежуточных решений и интеграции частных решений задач, для которой необходимы знания диспетчера регионального оперативно-технологического управления.

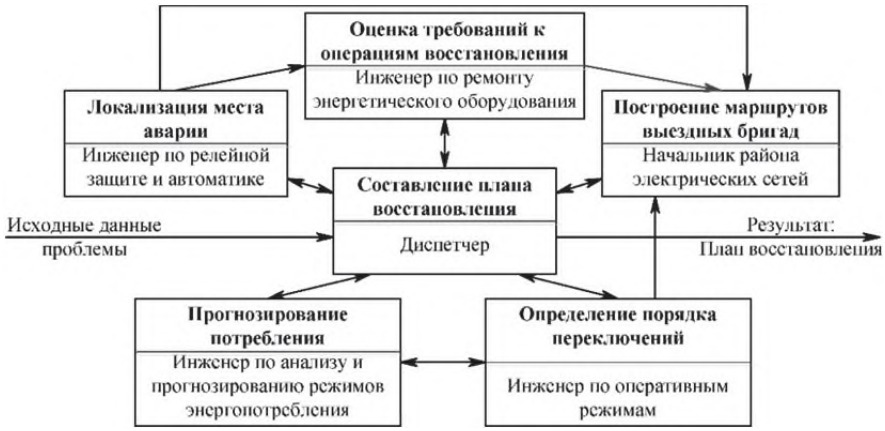


Рис. 2. Декомпозиция проблемы планирования восстановления электросети

Для решения ППВЭ предлагается моделировать коллективное принятие решений оперативным персоналом энергоснабжающей организации, энергетиками, логистами, специалистами по охране труда методами ГИМСГМ.

2. Прототип гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для восстановления региональной распределительной электросети

При построении ГИМСГМ для решения ППВЭ разработана ее формализованная модель, описывающая основные элементы системы и их взаимосвязь [16]. На основе этой модели в [17] построена функциональная структура ГИМСГМ, детализирующая состав ее агентов, их функционал и отношения между ними, а также архитектуры ее агентов, обеспечивающие требуемый функционал. В [18] разработан протокол гетерогенного мышления, обеспечивающий построение распределенного алгоритма решения ППВЭ. На рисунках 3—5 представлен пользовательский интерфейс лабораторного прототипа ГИМСГМ, построенного в соответствии с данными моделями.

Как показано на рисунке 3, главное окно лабораторного прототипа ГИМСГМ содержит главное меню и область, в которой может быть открыто одно или несколько окон моделей электросети. Элементы главного меню позволяют создавать, открывать, сохранять или импортировать модели, настраивать вид окон моделей электросети, запускать составление плана восстановления электросети, а также выполнять настройку используемых при этом алгоритмов. Каждое окно модели электросети (на рис. 3 показано единственное окно) содержит три вкладки: «Линейная схема электросети» (рис. 3), «Схема расположений» (рис. 4) и «Справочники» (рис. 5).

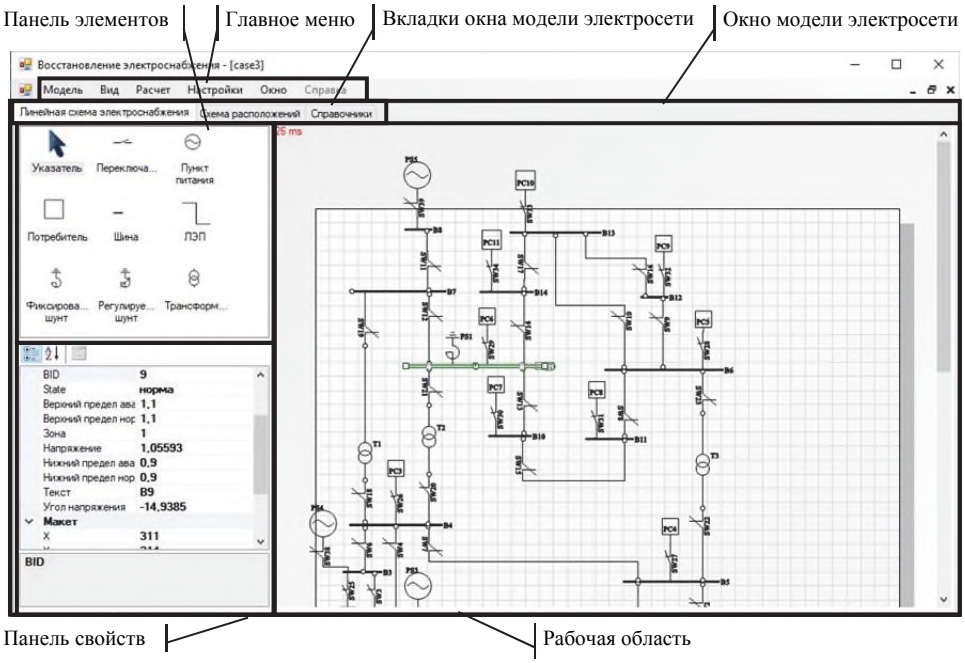


Рис. 3. Лабораторный прототип гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для решения проблемы планирования восстановления электросети: построение линейной схемы электросети

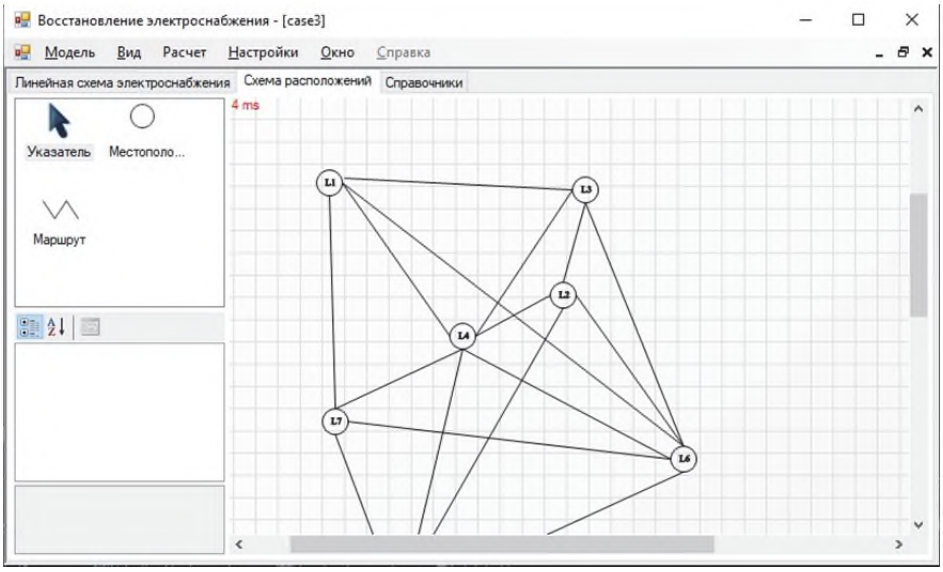


Рис. 4. Лабораторный прототип гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для решения проблемы планирования восстановления электросети: построение схемы расположений

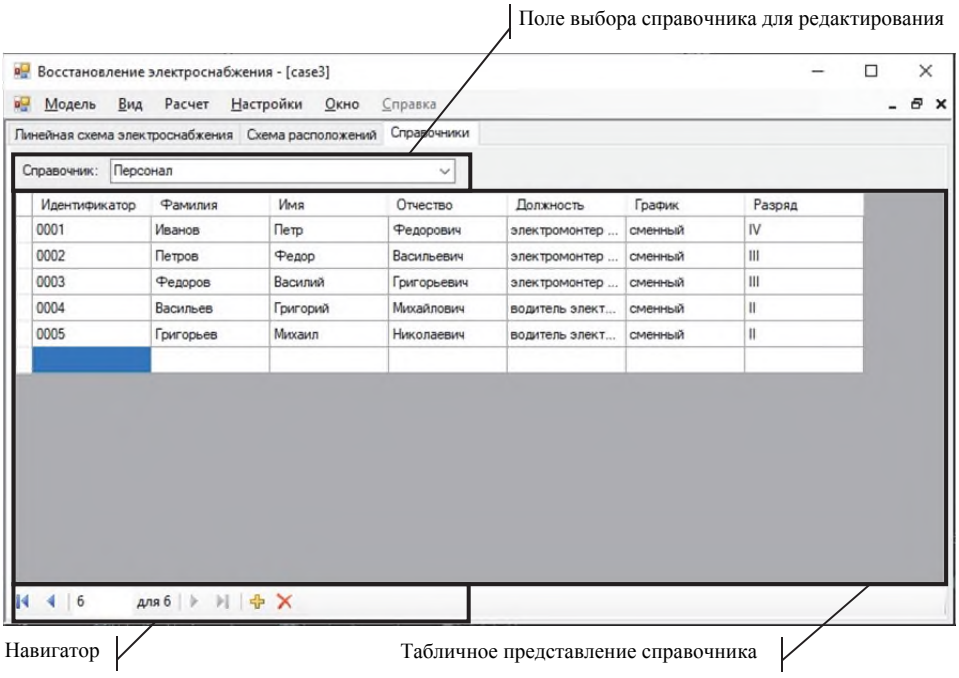


Рис. 5. Лабораторный прототип гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для решения проблемы планирования восстановления электросети: заполнение справочников

Вкладка «Линейная схема электросети» используется для описания элементов электросети, указания значений их свойств и отношений инцидентности между элементами. С помощью панели элементов в верхней левой части этой вкладки формируется линейная схема электроснабжения в рабочей области, а с помощью панели свойств в нижней левой части устанавливаются значения свойств элементов электросети, а также специфицируются их аварийные состояния. Вкладка «Схема расположений» используется для описания расположений и маршрутов проезда между ними. Как и вкладка «Линейная схема электросети», она разделена на три применяемые по аналогичному принципу части: панель элементов, панель свойств и рабочая область. Вкладка «Справочники» используется для описания состава и свойств ремонтных бригад, транспортных средств, ресурсов и действий для восстановления электросети. Выбрав в поле «Справочник» требуемое значение, пользователь получает возможность редактировать в табличной части записи соответствующего справочника. Перемещаться по справочнику, добавлять и удалять записи пользователь может с помощью навигатора в нижней части вкладки.

Составление плана восстановления электросети запускается пунктом главного меню «Расчет». Результат выдается в виде списка операций, состоящего из включения и выключения переключателей, поездок выездных бригад в требуемые расположения, выполнения восстановительных действий. Кроме того, процессы включения и выключения переключателей, вывода оборудования в ремонт и ввод его обратно в эксплуатацию, подключение и отключение потребителей могут быть визуализированы на вкладке «Линейная схема электросети» в пошаговом режиме.

Лабораторные исследования разработанного прототипа показали, что он позволяет строить приближенную к реальной модель региональной электросети, имитировать одновременные отказы нескольких различных элементов и составлять план восстановления электроснабжения в ней. За счет высокой скорости построения плана, применения методов гетерогенного мышления и синергетического искусственного интеллекта промышленный образец ГИМСГМ позволит предоставлять оперативно-диспетчерскому персоналу рекомендации по восстановлению электроснабжения в условиях дефицита времени, по качеству не уступающие рекомендациям экспертов, составленным по результатам анализа аварии.

Заключение

В работе рассмотрены особенности управления сложными динамическими системами на примере решения проблемы планирования восстановления электроснабжения в региональной электросети. Представлены результаты проектирования лабораторного прототипа ГИМСГМ, обеспечивающего релевантное моделирование процесса решения проблем малым коллективом экспертов в условиях динамической внешней среды. Предложенная ГИМСГМ перемещает имитацию коллективной выработки оперативных действий в об-

ласть синергетической информатики, в которой для решения проблем организация взаимодействия элементов интеллектуальной системы более важна, чем их состав и количество. Применение методов гетерогенного мышления агентами системы позволяет ГИМСГМ в условиях ограниченного времени на принятие решений адаптироваться под динамично изменяющиеся условия проблем, каждый раз, при очередном решении заново устанавливая связи между агентами, выбирая стиль взаимодействия и вырабатывая новый релевантный текущей ситуации принятия решения метод, как это мог бы делать коллектив экспертов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00448а.

Список литературы

1. *Фоминых И.Б., Пожидаев А.К., Романчук С.В.* Имитация рассуждений в интеллектуальных системах мягкого и жесткого реального времени // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. С. 69—79.

2. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. СПб. : СПбГТУ, 2001.

3. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002.

4. *Gardner H.* Multiple Intelligences — The Theory in Practice. New York : Basic Books, 1993.

5. *Kaner S., Lind L., Toldi C., Fisk S., Beger D.* The Facilitator's Guide to Participatory Decision-Making. San Francisco, CA : Jossey-Bass, 2011.

6. *De Bono E.* Parallel Thinking: From Socratic to De Bono Thinking. Melbourne : Penguin Books, 1994.

7. *Красник В.В.* Потребители электрической энергии, энергоснабжающие организации и органы Ростехнадзора. Правовые основы взаимоотношений. М. : НЦ ЭНАС, 2005.

8. *Adibi M.M., Fink L.H.* Overcoming Restoration Challenges Associated with Major Power System Disturbances // IEEE Power and Energy Magazine. 2006. Vol. 4 (5). P. 68—77.

9. *Мастерова О.А., Барская А.В.* Эксплуатация электроэнергетических систем и сетей. Томск : ТПУ, 2006.

10. *Успенский М.И., Кызродев И.В.* Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях. Сыктывкар, 2010.

11. *Thiebaux S., Cordier M.-O.* Supply Restoration in Power Distribution Systems — A Benchmark for Planning under Uncertainty // Proceedings of the 6th European Conference on Planning (ECP-01). Palo Alto, CA : AAAI Press, 2001. P. 85—96.

12. *Нариньяни А.С.* Инженерия знаний и НЕ-факторы: краткий обзор-08 // Вопросы искусственного интеллекта. 2008. № 1. С. 61—77.

13. *Кызродев И.В., Успенский М.И.* Автоматизация восстановления электроснабжения в распределительных сетях // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2010. № 2. С. 84—91.

14. *Kumar V., Kumar H. C. R., Gupta I., Gupta H. O.* DG integrated approach for service restoration under cold load pickup // IEEE Transactions on Power Delivery, 2010. Vol. 25 (1). P. 398—406.

15. *Hentenryck P., Coffrin C.* Transmission system repair and restoration // Mathematical Programming. Ser. B. 2015. Vol. 151. P. 347—373.

16. *Колесников А. В., Листопад С. В.* Гибридная интеллектуальная многоагентная система гетерогенного мышления для восстановления распределительной электросети // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции (Коломна, 19—22 мая 2019 г.). Переславль-Залесский : Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019. С. 221—230.

17. *Listopad S.* Architecture of the Hybrid Intelligent Multi-agent System of Heterogeneous Thinking for Planning of Distribution Grid Restoration // Baltic Journal of Modern Computing. 2019. Vol. 7, No. 4. P. 487—499.

18. *Колесников А. В., Листопад С. В.* Протокол гетерогенного мышления гибридной интеллектуальной многоагентной системы для решения проблемы восстановления распределительной электросети // Информатика и ее применения. 2019. Т. 13, вып. 2. С. 76—82.

С. В. Листопад
Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН, Россия
e-mail: ser-list-post@yandex.ru

МОДЕЛЬ СПЛОЧЕННОЙ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Введение

При формировании коллектива экспертов для решения поставленной практической проблемы недостаточно подбирать их исключительно по функциональным требованиям. Эксперты могут не договориться друг с другом, погрязнуть в конфликтах, так и не решив проблему в целом в отведенные для этого сроки [1]. Набор знаний, умений и навыков не гарантирует решения поставленной проблемы, и на первый план выходят вопросы коммуникации, психологической совместимости, конфликтов, сплоченности, т. е. групповые, а не индивидуальные механизмы. Аналогичные проблемы возникают и при компьютерном моделировании подобных групп средствами гибридных интеллектуальных многоагентных систем (ГиИМАС): требуется не только собрать агентов системы с заданным функционалом, но и обеспечить их эффективное взаимодействие. Агенты должны не только «говорить» на одном языке и быть совместимыми с реализованными в системе базовыми протоколами, но и иметь механизмы, обеспечивающие их интеграцию в единый коллектив, такие как обмен информацией о своих целях, интересах, знаниях, опыте с другими агентами, выработка и согласование единых для системы

© Листопад С. В., 2020

целей, ценностей, норм, средств и способов деятельности, а также их интериоризация каждым агентом. Таким образом, требуется моделировать процессы формирования сплоченного коллектива, что особенно актуально при создании агентов различными независимыми коллективами разработчиков.

1. Групповая сплоченность малого коллектива экспертов

Групповые механизмы в малых группах, частный случай которых — коллективы экспертов, решающие проблемы «за круглым столом», изучаются в рамках групповой динамики — созданного К. Левиным [2] направления социальной психологии. В частности, в рамках этого направления исследуются такие явления и процессы, как конфликты, социальное напряжение, агрессия и дискриминация, руководство, групповая психологическая атмосфера, адаптация в группе, отклонение от групповых норм, реакция группы и другие. Одно из ведущих мест занимают исследования групповой сплоченности, которая проявляется в создании единой социально-психологической общности людей, входящих в группу, и предполагает возникновение системы свойств группы, препятствующих нарушению ее психологической целостности [3]. Групповая сплоченность повышает удовлетворенность участников от работы в группе, интенсивность взаимодействия между ними, а также продуктивность группы в целом. Групповая сплоченность — мера взаимосвязанности членов команды, которая определяется степенями позитивности и интенсивности эмоциональных межличностных отношений всех со всеми, совпадения ориентаций на основные ценности, касающиеся процесса совместной деятельности, а также разделения целей существования группы [1].

Л. Фестингер (L. Festinger) исследовал явление групповой сплоченности на основе частоты и прочности коммуникативных связей [4]. Сплоченность определялась им как сумма всех сил, удерживающих членов группы в ее составе, например привлекательность группы для индивида или удовлетворенность членством в ней. Последователями Л. Фестингера введены понятия «награда» (удовлетворение биопотребностей, безопасность, принятие другими участниками, поддержка самооценки) и «потери» (время и усилия для взаимодействия с неприятными партнерами, критика или отвержение со стороны партнеров и др.). Д. Картрайт (D. Cartwright) утверждал, что сплоченность зависит не только от целей и характеристик группы, но и от их соотношения с потребностями членов группы, ожиданиями «благоприятного членства» [5]. Б. П. Индик (B. P. Indik), П. Саджи (P. Sagi) и П. Олмстед (P. Olmsted) в качестве основного фактора сплоченности выделяли личную включенность индивида в группу, возникновение чувства сопричастности с нею [6; 7]. Согласно исследованиям С. Кратохвила (S. Kratochvil), сплоченности группы способствуют: удовлетворение личных потребностей индивидуума в группе; групповые цели, находящиеся в согласии с индивидуальными потребностями; взаимозависимость при работе над конкретными задачами; польза, выгода группового членства; симпатии между членами группы; дру-

жеская, располагающая атмосфера; престиж группы при одновременном повышении престижа каждого члена группы; влияние групповой деятельности; соперничество с иной группой и т. д. [8].

В рамках когнитивно-ориентированного подхода важнейшим условием сплочения группы считается сходство во мнениях, установках, ценностях членов группы. Одним из первых исследователей подобного подхода выступил Т. Ньюкомб (T. Newcomb) [9], при исследовании групповой сплоченности выделявший понятие «согласие», то есть существование между двумя или более личностями сходных ориентаций. Изучение взаимосвязи между сходством в установках и привлекательностью группы также проводилось Д. Бирном (D. Byrne), который установил, что между этими феноменами существует линейная зависимость [10]. В работе А. Харрисона (A. Harrison) и М. Коннорс (M. Connors) отмечается зависимость степени сплоченности от продуктивности деятельности группы [11].

Таким образом, на основе анализа зарубежных исследований групповой сплоченности можно сделать вывод о сложности и многоаспектности данного явления, его детерминированности множеством взаимозависимых факторов: личностных, групповых, межгрупповых. В развитии социально-психологических представлений о сплоченности прослеживается тенденция к комплексному изучению этого феномена, включению его в широкий круг проблем малых групп. Однако следует отметить эмпирическую направленность зарубежных работ, отсутствие единой теории групповой сплоченности.

Фундаментальная модель в понимании сплоченности групп и коллективов разработана А. В. Петровским [12]. Согласно его стратометрической концепции, малая группа экспертов состоит из трех слоев (страт), представляющих собой три уровня развития группы: 1) внешний уровень (эмоциональные межличностные отношения), исследованный в работах Н. В. Бахаревой [13], А. С. Леонавичуса [14], В. И. Зацепина [15]; 2) ценностно-ориентационное единство (отношения опосредованы совместной деятельностью, на основе чего возникает единство основных ценностей), рассмотренное в работах А. В. Петровского [12], А. И. Донцова [16], Р. С. Немова [17], В. В. Шпалинского [18]; 3) ядро (члены группы разделяют цели групповой деятельности, поэтому здесь могут выявляться мотивы выбора членами группы друг друга, которые, в свою очередь, могут опосредоваться общими ценностями: отношением к миру, обществу, труду), рассмотренное в работах Ю. Е. Дубермана [19], Ю. Л. Неймера [20], А. А. Дикаревой, М. И. Мирской [21], Н. Н. Обозова [22], Л. Т. Почебут, В. А. Чикер [23], Л. И. Уманского [24], В. Т. Кондрашенко, Д. И. Донского [25].

Следует отметить, что единство мнений и взглядов, характеризующее сплоченность, надо отличать от единообразного группового поведения, связанного с конформностью — изменением в поведении и установках людей, направленном на содействие действиям и поведению других [26]. Конформное поведение играет как положительную, так и отрицательную роль. С одной стороны, оно способствует исправлению ошибочного мнения человека или его поведения, если более правильным оказывается мнение или действия

большинства. С другой стороны, конформное поведение мешает утверждению собственного независимого поведения или мнения. Конформисты помогают принимать общие решения, но обычно не предлагают ничего нового.

Исследования различных видов групп, например спортивных команд, рабочих бизнес-групп, военных отрядов и лабораторных групп, подтверждают повышение эффективности работы, равномерности распределения вклада участников в общий результат и стабильности группы с ростом сплоченности, когда нормы группового поведения способствуют этому [27]. Если же в группе установлены деструктивные нормы, направленные на снижение вклада каждого участника в общий результат, возможно снижение эффективности работы группы в целом.

С целью исследования зависимости эффективности работы коллектива от степени сплоченности, а также влияния норм группового поведения на сплоченность коллектива, предлагается выполнить компьютерное моделирование эффекта сплоченности средствами ГиИМАС.

2. Модель сплоченной гибридной интеллектуальной многоагентной системы

ГиИМАС — гибридные интеллектуальные системы (ГиИС), реализующие многоагентный подход [28]. Элементы таких ГиИС реализуются в виде агентов, обладающих свойством автономности [29]. Как и многоагентные системы (МАС), они моделируют взаимодействия автономных агентов между собой и с внешней средой, в результате которых архитектура системы может динамически перестраиваться в соответствии с конкретными функциями (ролями) агентов и установившимися отношениями между ними. В результате ГиИМАС сочетают в себе положительные стороны ГиИС и МАС: благодаря сочетанию нескольких методов искусственного интеллекта, они релевантны задачам с высокой сложностью моделирования [28]; за счет имитации взаимодействия экспертов и возникающих при этом коллективных процессов они способны менять свою архитектуру для достижения синергетического эффекта, т. е. нахождения более качественных решений, чем могли бы найти агенты, работающие порознь.

Для моделирования групповой сплоченности агентов в соответствии со стратометрической концепцией А. В. Петровского модель ГиИМАС, разработанная в [28], должна быть существенно переработана. При этом нужно отметить, что ввиду отсутствия эмоциональной составляющей у агентов, применяющихся для моделирования коллективов экспертов, страта эмоциональных межличностных отношения не рассматривается.

Необходимое условие для реализации СГИМАС, согласно стратометрической концепции А. В. Петровского, — разработка модели агента, действующего в соответствии с собственными целью и моделью предметной области, а не целью и моделью предметной области системы в целом. При этом общая модель предметной области в усеченном виде требуется для обеспечения базового уровня взаимодействия агентов и интерпретации смысла получаемых сообщений.

Для моделирования страты ценностно-ориентационное единства следует обеспечить единство ценностей, убеждений и норм агентов. Для этого во множестве элементов структурирования взаимодействий СГИМАС, кроме единственного протокола, обеспечивающего получение, передачу сообщений и проведение переговоров, должно появиться множество элементов для конструирования протокола сплоченного взаимодействия, а множество концептуальных моделей макроуровневых процессов должно быть дополнено элементом, обеспечивающим формирование агентами протокола сплоченного взаимодействия, что соответствует согласованию норм взаимодействия экспертов. Кроме того, множество концептуальных моделей макроуровневых процессов должно быть дополнено элементом, обеспечивающим согласование моделей предметной области агентов, что соответствует обмену знаниями, опытом и убеждениями между экспертами в процессе коллективного решения проблем.

Для моделирования центральной страты — ядра — требуется обеспечить единство целей агентов. Для этого модель агента-эксперта должна быть расширена подсистемой корректировки и согласования целей агента, а множество концептуальных моделей макроуровневых процессов дополнено элементами, обеспечивающими согласование целей агентов между собой.

С учетом указанных выше замечаний, на основе модели ГиИМАС, представленной в [28], может быть сформулирована модель СГИМАС

$$chimas =< AG, env, INT, ORG, \{glng,\ ontng,\ protng\} >, \qquad (1)$$

где AG — множество агентов, описываемое выражением (2); env — концептуальная модель внешней среды СГИМАС; INT — элементы структурирования взаимодействий агентов, описываемые выражением (3); ORG — множество архитектур СГИМАС; $\{glng,\ ontng,\ protng\}$ — множество концептуальных моделей макроуровневых процессов в СГИМАС: $glng$ — модель процесса согласования целей агентов между собой; $ontng$ — модель процесса согласования моделей предметной области агентов между собой; $protng$ — модель процесса формирования агентами протокола сплоченного взаимодействия.

Множество агентов из формулы (1) описываются выражением

$$AG = \{ag^{dm},\ ag^{fc},\ ag^{med},\ ag^{int},\ ag^{pc}\} \cup AG^{ex} \cup AG^{tr} \cup AG^{it}, \qquad (2)$$

где ag^{dm} — агент, принимающий решения; ag^{fc} — агент-фасилитатор; ag^{med} — агент-посредник; ag^{int} — интерфейсный агент; ag^{pc} — агент контроля протокола; $AG^{ex} = \{ag_1^{ex},...,ag_{nex}^{ex}\}$ — подмножество агентов-экспертов, где nex — число агентов-экспертов; $AG^{tr} = \{ag_1^{tr},...,ag_{ntr}^{tr}\}$ — подмножество агентов-переводчиков, где ntr — число агентов-переводчиков; $AG^{it} = \{ag_{an}^{it},\ ag_{st}^{it},\ ag_{lo}^{it},\ ag_{fu}^{it},\ ag_{sy}^{it},\ ag_{cnv}^{it}\}$ — подмножество агентов интеллектуаль-

ных технологий, где ag_{an}^{it} — аналитический агент, ag_{st}^{it} — стохастический агент, ag_{lo}^{it} — логический агент, ag_{fu}^{it} — нечеткий агент, ag_{sy}^{it} — символьный агент, ag_{cnv}^{it} — агент-преобразователь.

Элементы структурирования взаимодействий агентов из формулы (1) описываются выражением

$$INT = \{prot_{bsc}, PRC,\ LANG, ont_{bsc}\}, \tag{3}$$

где $prot_{bsc}$ — базовый протокол, обеспечивающий взаимодействие агентов по формированию агентами протокола сплоченного взаимодействия для решения поставленных перед СГИМАС проблем; PRC — множество элементов для конструирования протокола решения проблем агентами-экспертами и агентом, принимающим решения; $LANG$ — множество языков передачи сообщений, которые используют агенты СГИМАС; ont_{bsc} — базовая, общая для всех агентов СГИМАС онтология, обеспечивающая понимание агентами смысла передаваемых сообщений по согласованию собственных моделей предметной области, целей, формированию протокола сплоченного взаимодействия.

Агент $ag \in AG$ из формулы (2) описывается выражением

$$ag = < id^{ag}, gl^{ag}, LANG^{ag}, ont^{ag}, ACT^{ag} >,$$

где id^{ag} — идентификатор агента; gl^{ag} — цель агента; $LANG^{ag} \subseteq LANG$ — множество языков, сообщения на которых могут быть записаны или прочитаны агентом; ont^{ag} — модель предметной области агента; ACT^{ag} — множество действий, реализуемых агентом, среди которых для агентов-экспертов и агента, принимающего решения, выделяются согласование целей act_{glng}^{ag}, согласование моделей предметной области act_{ontng}^{ag}, выработка протокола решения проблемы act_{protng}^{ag}, т. е.

$$\forall ag \in (AG^{ex} \cup \{ag^{dm}\})\ (\{act_{glng}^{ag}, act_{ontng}^{ag}, act_{protng}^{ag}\} \subset ACT^{ag}).$$

Действие агента из множества ACT^{ag} описывается выражением

$$act^{ag} = < met_{act}^{ag}, it_{act}^{ag} >,$$

где met_{ag} — метод решения проблемы; it_{ag} — интеллектуальная технология, в рамках которой реализован метод met_{ag}.

Таким образом, функция СГИМАС описывается выражением

$$act_{chimas} = (\bigcup_{ag \in AG^{*}} ACT_{ag}) \cup act_{col},\ \left| \bigcup_{ag \in AG} \bigcup_{act \in ACT^{ag}} it_{act}^{ag} \right| \geqslant 2,$$

где act_{col} — коллективная функция СГИМАС, конструируемая агентами динамически в соответствии с выработанным протоколом решения проблемы; накладываемое ограничение требует, чтобы в составе СГИМАС использовалось не менее двух интеллектуальных технологий [28].

Благодаря элементам согласования целей и моделей предметной области агентов-экспертов и агента, принимающего решения, а также выработки согласованного протокола решения проблем в интеллектуальной системе обеспечивается сплоченное поведение агентов системы, позволяющее преодолевать разногласия и избегать конфликтов, вызванных различиями в моделях проблемы и целей ее решения. В результате СГИМАС каждый раз при работе над проблемой динамически разрабатывает новый релевантный ей метод решения. Моделирование групповой сплоченности повышает релевантность СГИМАС малым коллективам экспертов, решающим проблемы «за круглым столом», путем развития интеллектуальной системы и ее самоорганизации в сильном смысле [30].

Заключение

В работе представлены подходы к определению понятия «сплоченность» в исследованиях по динамике групп. Обоснована актуальность моделирования этого состояния коллектива и процессов, приводящих к нему, в системах, построенных на принципах синергетического искусственного интеллекта. Разработана модель СГИМАС, обеспечивающая моделирование групповой сплоченности с помощью механизмов согласования целей и моделей предметной области, а также выработки протокола решения проблемы агентами системы без внешнего управления этим процессом. Моделирование сплоченности агентов позволит упростить разработку интеллектуальных систем за счет облегчения интеграции разнородных агентов, построенных независимыми коллективами разработчиков, в единую систему.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00104а.

Список литературы

1. *Жуков Ю. М., Журавлев А. В., Павлова Е. Н.* Технологии командообразования: Учеб. пособие для студентов вузов. М. : Аспект Пресс, 2008.

2. *Lewin K.* Field theory in social science: selected theoretical papers. New York : Harper, 1976.

3. *Васильченко М. В., Литвиненко М. П., Мансурова И. С. и др.* Психология личности и группы : учеб. пособие. Ростов н/Д : Издательский центр ДГТУ, 2011.

4. *Фестингер Л.* Теория когнитивного диссонанса. СПб. : Ювента, 1999.

5. *Cartwright D.* The nature of group cohesiveness // Group dynamics: Research and theory. New York : Harper & Row, 1968. P. 51—73.

6. *Indik B. P.* Organization size and member participation: Some empirical tests of alternative explanations // Human relations. 1965. Vol. 18(4). P. 339—350

7. *Sagi P., Olmsted P., Atelsek P.* Predicting maintenance of membership in small groups // Journal of Abnormal Psychology. 1955. Vol. 51(2). P. 308—311.

8. *Kratochvil S., Vavrik P.* Effect of therapist's qualities on cohesion and tension in group session // Cesko-Slovenska Psychiatrie. 1976. Vol. 72 (5). P. 332—336.

9. *Newcomb T.* Varieties of interpersonal attraction // Group dynamics. Evanston, IL : Row, Peterson, 1960. P. 104—119.

10. *Byrne D.* Attitudes and attraction // Advances in Experimental Social Psychology. 1969. Vol. 4. P. 35—89.

11. *Harrison A., Connors M.* Group in exotic environments // Advances in Experimental Social Psychology. 1984. Vol. 18. P. 49—87.

12. *Петровский А.В.* Опыт построения социально-психологической концепции групповой активности // Вопросы психологии. 1973. № 5. С. 3—17.

13. *Бахарева Н.В.* Шкала приемлемости как метод изучения взаимоотношений // Человек и общество. Л. : Изд-во ЛГУ, 1975. С. 34—37.

14. *Леонавичус А.С.* Социалистический производственный коллектив и способы его сплочения : автореф. дис. ... канд. психол. наук. М., 1970.

15. *Зацепин В.И.* Межличностное общение в коллективе : автореф. дис. ... канд. психол. наук. Л., 1970.

16. *Донцов А.И.* Проблемы групповой сплоченности. М. : Изд-во МГУ, 1979.

17. *Немов Р.С.* Психологические условия и критерии эффективности работы коллектива. М. : Знание, 1982.

18. *Шпалинский В.В.* Экспериментально-психологическое исследование групповой сплоченности : автореф. дис. ... канд. психол. наук. М., 1973.

19. *Дуберман Ю.Е.* Роль сплоченности малых групп в функционировании первичного производственного коллектива : автореф. дис. ... канд. психол. наук. М., 1973.

20. *Неймер Ю.Л.* Сплоченность как характеристика первичного коллектива и ее социологическое измерение // Социологические исследования. 1975. № 2. С. 160—162.

21. *Дикарева А.Я., Мирская М.И.* Социология труда. М. : Высшая школа, 1989.

22. *Обозов Н.Н.* Межличностные отношения. Л. : Изд-во ЛГУ, 1979.

23. *Почебут Л.Г., Чикер В.А.* Организационная социальная психология : учеб. пособие. СПб. : Речь, 2002.

24. *Уманский Л.И.* Методы экспериментального исследования социально-психологических феноменов // Методология и методы социальной психологии. М. : Наука, 1977. С. 54—71.

25. *Кондрашенко В.Т., Донской Д.И.* Общая психотерапия. Минск : Наука и техника, 1993.

26. *Григорович Л.А., Марцинковская Т.Д.* Педагогика и психология : учеб. пособие. М. : Гардарики, 2003.

27. *Forsyth D.R.* Group Dynamics. Belmont, CA : Wadsworth, Cengage Learning, 2010.

28. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.* Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. М. : ИПИ РАН, 2014.

29. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002.

30. *Serugendo G.D.M., Gleizes M.-P., Karageorgos A.* Self-organization in multiagent systems // The Knowledge engineering review. 2005. Vol. 20 (2). P. 165—189.

О. Ю. Марьясин
Ярославский государственный технический университет, Россия,
e-mail: maryasin2003@list.ru

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЕМ НА ОСНОВЕ НЕКООПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Введение

Современные тенденции снижения стоимости потребительской электроники и микропроцессорной техники и повышения уровня автоматизации и интеллектуализации инженерных систем зданий дают возможность совершенствования систем управления зданий (Building Management System — BMS). В частности, вместо традиционных ПИД-регуляторов для управления микроклиматом помещений могут использоваться более сложные алгоритмы автоматического и оптимального управления. В зарубежных публикациях широко представлены работы, в которых для управления микроклиматом и энергопотреблением зданий предлагаются системы адаптивного и оптимального регулирования, системы прогнозирующего управления (Model Predictive Control — MPC), а также системы на базе нечеткой логики и с применением нейросетевых и генетических алгоритмов [1]. При этом наибольшее число публикаций приходится на системы, использующие MPC-подход. Эти системы позволяют более качественно управлять микроклиматом зданий, с учетом ограничений, при минимуме энергозатрат. Известные преимущества применения распределенных систем управления привели к появлению распределенного (Distributed Model Predictive Control — DMPC), иерархического распределенного (Hierarchical Distributed Model Predictive Control — HDMPC) MPC-алгоритмов, а также множества их различных вариантов [2]. Еще больше расширить возможности по управлению микроклиматом позволяет мультиагентный подход. Например, с его помощью можно учесть предпочтения индивидуальных пользователей по уровню теплового комфорта. В научной прессе есть уже достаточно много работ, посвященных применению мультиагентных систем (Multi-Agent Systems — MAS) для управления микроклиматом и энергопотреблением зданий [3; 4]. Типовая архитектура мультиагентной BMS и функции отдельных агентов подробно описаны в [5].

В настоящее время можно встретить системы, в которых традиционное водяное отопление в холодное время года сочетается с системой вентиляции с подогревом приточного воздуха, или со сплит-системой, или с системой теплый пол и т. д. В таких системах на микроклимат внутри помещений здания можно воздействовать как системой водяного отопления, так и системой вентиляции/кондиционирования и другими способами. Их еще называют системами смешанного отопления. Особенность таких систем — сильные пере-

© Марьясин О. Ю., 2020

крестные связи между каналами управления. Поэтому их можно отнести к многосвязным системам. Подобная ситуация возникает и при реализации квазираспределенного управления большими помещениями, например спортивными и концертными залами, где общее пространство разделяется на отдельные зоны с независимым воздушным отоплением. Проблемы, возникающие в смешанных системах обсуждались в [6] и [7]. В [7] показано, что в результате взаимного влияния контуров регулирования, даже при их устойчивой работе в индивидуальном режиме, в смешанной системе могут возникать автоколебания. Для их устранения рекомендуется использовать специальные алгоритмы координации работы систем регулирования. В [6] для этих целей дополнительно предлагается применять HDMPC-алгоритм.

В работе рассматривается задача управления микроклиматом помещения с помощью множества агентов. Агенты могут быть реальными киберфизическими устройствами систем «Умный дом» или «Интеллектуальное здание» или виртуальными, реализованными в памяти управляющих контроллеров. Главное, чтобы каждый агент мог иметь возможность воздействия на микроклимат через соответствующее управляющее устройство. Анализируются различные алгоритмы на базе MPC-подхода, которые могут применяться агентами для управления микроклиматом помещения.

1. Алгоритмы управления

Пусть для управления системой используется S агентов. Каждый из агентов имеет свою целевую функцию, оптимум которой может не совпадать с оптимальными решениями других агентов. Предположим, что каждый агент может управлять системой и при отсутствии других агентов. Тогда одновременная работа агентов приведет к тому, что через объект управления они будут влиять на работу друг друга. В этом случае мультиагентную систему управления можно представить как взаимосвязанную совокупность подсистем, с сильными перекрестными связями между отдельными подсистемами. В такой ситуации применение DMPC-алгоритмов проблематично, так как одним из условий их эффективного применения выступает наличие слабых связей между подсистемами [2]. Использование HDMPC-алгоритмов может частично решить данную проблему, но при этом резко возрастают вычислительные затраты, связанные с необходимостью решения задачи координации. Другое радикальное решение проблемы — применение централизованного MPC-алгоритма. Однако такое решение, кроме того, что является наиболее затратным в вычислительном плане, вступает в противоречие с использованием современных распределенных технологий управления и мультиагентного подхода.

В качестве альтернативы автор предлагает применять для управления MAS алгоритм на основе некооперативной игры на базе MPC-подхода. Далее будет рассмотрено два таких алгоритма и проведен их анализ, на основе которого будет выбран алгоритм, наиболее подходящий для решения задачи управления смешанной системой.

Динамика системы в дискретном времени будет описываться системой линейных уравнений с постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + \sum_{i=1}^{S} B_i u_{ik}, \\ y_k &= Cx_k, \end{aligned} \tag{1}$$

где $x_k \in R^{n_x}$ — вектор переменных состояния в k-й момент времени $k = 0,\ldots,N\text{-}1$; N — горизонт предсказания; $N = T/h$; T — интервал, на котором осуществляется управление; h — шаг дискретизации; $u_{ik} \in R^{n_u}$ — вектор управлений s-го агента; $y_k \in R^{n_y}$ — вектор выходных измеряемых переменных.

Целевая функция i-го агента J_i имеет вид

$$J_i = \sum_{k=0}^{N-1} ([y_k - y_{zi}]^T Q_i [y_k - y_{zi}] + u_{ik}{}^T R_i u_{ik}), \tag{2}$$

где y_{zi} — вектор заданных значений параметров i-го агента; Q_i и R_i — диагональные положительно определенные матрицы.

Задачу (1), (2) путем замены переменных состояния $z_{ik} = y_k - y_{zi}$ можно привести к виду

$$z_{k+1} = \overline{A} z_k + \sum_{i=1}^{S} \overline{B}_i u_{ik} + \overline{c}, \tag{3}$$

где

$$\overline{A} = \begin{pmatrix} A & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A \end{pmatrix}, \qquad \overline{B}_i = \begin{pmatrix} CB_i \\ \vdots \\ CB_i \end{pmatrix}, \qquad \overline{c} = \begin{pmatrix} (A-I)y_{z1} \\ \vdots \\ (A-I)y_{zS} \end{pmatrix},$$

а критерий (2) преобразуется к виду

$$J_i = \sum_{k=0}^{N-1} (z_k{}^T \overline{Q}_i z_k + u_{ik}{}^T R_i u_{ik}), \tag{4}$$

где $\overline{Q_i}$ — матрица, состоящая из нулей, i-й диагональный элемент которой равен Q_i.

Для $k = N - 1, \ldots, 0$ определим

$$\Lambda_k = I + \sum_{i=1}^{S} \overline{B}_i R_i^{-1} B_i^T M_{ik+1},$$

$$M_{ik} = \overline{Q_i} + \overline{A}^T M_{ik+1} \Lambda_k^{-1} \overline{A}, \quad M_{iN} = 0,$$

$$\eta_k = \overline{c} - \sum_{i=1}^{S} \overline{B}_i R_i^{-1} \overline{B}_i^T m_{ik+1},$$

$$\xi_{ik} = M_{ik+1}\Lambda_k^{-1}\eta_k + m_{ik+1},$$
$$m_{ik} = \overline{A}^T\xi_{ik}, \quad m_{iN} = 0,$$

тогда согласно [8] если все матрицы Λ_k невырождены, то для каждого начального состояния x_0 существует равновесие Нэша для системы (3), (4) со значениями переменных, вычисляемых по формулам

$$u_{ik}^e = -R_i^{-1}\overline{B}_i^T(M_{ik+1}\Lambda_k^{-1}\overline{A}z_k^e + \xi_{ik}) \quad k = 0,\ldots,N-1, \quad i = 1,\ldots,s, \tag{5}$$

$$z_{k+1}^e = \Lambda_k^{-1}(\overline{A}z_k^e + \eta_k), \quad k = 1,\ldots,N-1, \quad z_0^e = \begin{pmatrix} Cx_{01} - y_{z1} \\ \vdots \\ Cx_{0S} - y_{zS} \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Алгоритм управления на основе выражений (5) и (6) назовем Алгоритм 1. Теперь рассмотрим другой алгоритм управления на основе некооперативной игры на базе МРС-подхода, представленный в работе [9] (Алгоритм 2). Для упрощения изложения возьмем случай 2-агентов. Тогда система (3) примет вид

$$z_1 = Az_1 + B_{11}u_1 + B_{12}u_2 + c_1,$$
$$z_2 = Az_2 + B_{21}u_1 + B_{22}u_2 + c_2.$$

Введем обозначения

$$v = \begin{pmatrix} u_1(0) \\ z_1(1) \\ \vdots \\ u_1(N-1) \\ x_1(N) \end{pmatrix}, \qquad H = diag(\begin{pmatrix} R_1 & Q_1 & \ldots & R_1 \end{pmatrix}).$$

Тогда задача управления первого агента заключается в минимизации критерия

$$J_1 = v^T Hv + z_1(0)^T Q_1 z_1(0), \tag{7}$$

при условии

$$Dz = d, \tag{8}$$

где

$$D = \begin{pmatrix} B_{11} & -I & & & & \\ & A & B_{11} & -I & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & A & B_{11} & -I \end{pmatrix}, \qquad d = \begin{pmatrix} Az_1(0) + B_{12}u_2(0) + c_1 \\ B_{12}u_2(1) + c_1 \\ \vdots \\ B_{12}u_2(N) + c_1 \end{pmatrix}.$$

Для решения задачи (7), (8) в [9] предложена формула

$$\begin{pmatrix} H & -D^T \\ -D & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\tilde{A} \end{pmatrix} z_1(0) + \begin{pmatrix} 0 \\ -\tilde{B}_{12} \end{pmatrix} u_2, \tag{9}$$

где

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda(1) \\ \lambda(2) \\ \vdots \\ \lambda(N) \end{pmatrix}, \qquad \tilde{A} = \begin{pmatrix} A \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad \tilde{B}_{12} = \begin{pmatrix} B_{12} & & & \\ & B_{12} & & \\ & & \ddots & \\ & & & B_{12} \end{pmatrix}.$$

Решая уравнение (9) и выделяя соответствующие строки из вектора v, можно получить вектор оптимального управления u_1^o. Аналогично формулируется и решается задача управления для второго агента.

2. Анализ алгоритмов

Проанализируем работу рассмотренных алгоритмов для случая двух агентов и простейшей абстрактной модели теплообмена в помещении, учитывающей только поступление тепла от климатического оборудования и его потери через ограждающие конструкции. Сравним алгоритмы по скорости сходимости, устойчивости к изменению свойств объекта и взаимного влияния каналов управления. Кроме того, оценим возможности алгоритмов учитывать ограничения на управляющие и выходные переменные

$$y_{\min} \le y_k \le y_{\max}, \quad k = 1,...,N-1, \tag{11}$$

$$u_{i\min} \le u_{ik} \le u_{i\max}, \quad i = 1,...,S, k = 0,...,N-1. \tag{12}$$

Ограничение (11) задает пределы изменения контролируемых параметров. Ограничение (12) определяет минимальное и максимальное количество ресурса для i-го агента.

Главным отличием Алгоритма 1 от Алгоритма 2 является то, что для этого алгоритма значения оптимального управления и соответствующие переменные состояния рассчитываются по итерационной процедуре на каждом k-м шаге, $k = 0,\ldots, N-1$, а для Алгоритма 2 значения оптимального управления и соответствующие переменные состояния находятся сразу для $N-1$ шагов.

Для оценки работы Алгоритма 1 по формулам (5), (6) проведены расчеты в пакете MATLAB. Результат расчетов для $x_{01} = 23$, $y_{z1} = 22\,^\circ\text{C}$ и $x_{02} = 17$, $y_{z2} = 18\,^\circ\text{C}$ и $N = 100$ представлен на рисунке 1. Численные эксперименты показали, что для Алгоритма 1 изменение свойств объекта из-за изменения значений коэффициентов матрицы A в широких пределах не влияют на существование равновесия Нэша, но значительно влияют на его положение. Влияние каналов управления друг на друга оценивалось по величине коэффициен-

тов матриц B_{12} и B_{21}. Первоначально все матрицы B_{ij}, $i,j = 1,2$ устанавливались равными $B_{11} = B_{12} = B_{21} = B_{22}$. Это означает, что каждый агент может одинаково влиять как на свои, так и чужие каналы. Установлено, что для Алгоритма 1 даже относительно небольшое уменьшение значений коэффициентов матриц B_{12} и B_{21} по сравнению с соответствующими коэффициентами матриц B_{11} и B_{22} приводит к тому, что равновесие Нэша перестает существовать.

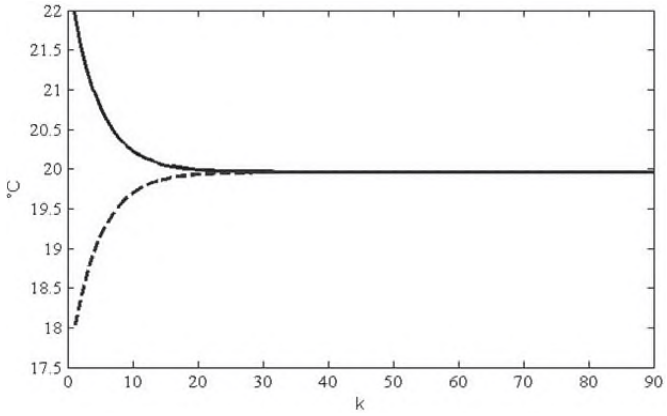


Рис. 1. Графики $z_{1k} + y_{z1}$ (сплошная) и $z_{2k} + y_{z2}$ (пунктирная) для Алгоритма 1

Используемая в Алгоритме 1 итерационная процедура расчета позволяет легко обеспечивать выполнение ограничений (11), (12). Было установлено, что изменение значений u_{imin} и u_{imax} в достаточно широких пределах не влияет на равновесие Нэша. Изменение y_{min} и y_{max} также не влияют на равновесие Нэша, если значения задания и начальная точка удовлетворяют заданным ограничениям.

Расчеты для Алгоритма 2 производились по формуле (9) для тех же условий, что и для Алгоритма 1. Результат расчетов приводится на рисунке 2.

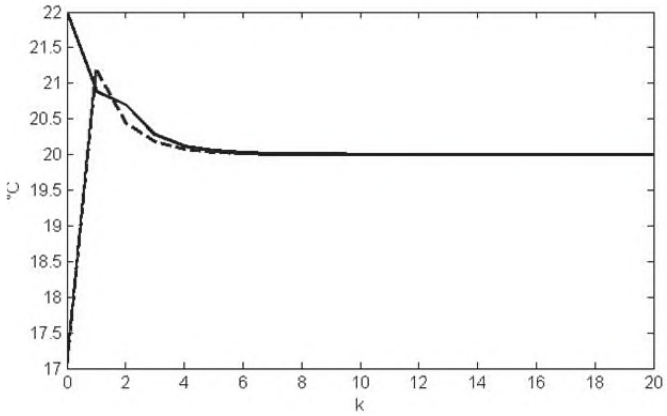


Рис. 2. Графики $z_1 + y_{z1}$ (сплошная) и $z_2 + y_{z2}$ (пунктирная) для Алгоритма 2

Анализ рисунков показывает, что Алгоритм 2 обеспечивает гораздо более быструю сходимость, чем Алгоритм 1. Численные эксперименты подтверждают, что для Алгоритма 2 изменение свойств объекта из-за изменения значений коэффициентов матрицы A в широких пределах не влияют на существование равновесия Нэша. При этом они практически не изменяют его положение. Кроме того, установлено, что для Алгоритма 2 даже относительно большое уменьшение значений коэффициентов матриц B_{12} и B_{21} по сравнению с соответствующими коэффициентами матриц B_{11} и B_{22} не влияет на существование равновесия Нэша. Анализ влияния ограничений (11), (12) для Алгоритма 2 дал результаты, аналогичные тем, что были получены для Алгоритма 1.

Также установлено, что значение температуры, соответствующее найденному равновесию Нэша, совпадает со значением, полученным при решении задачи оптимального управления системой (1) с критерием $J = J_1 + J_2$ с помощью централизованного MPC-алгоритма. Поэтому можно утверждать, что равновесие Нэша, полученное с помощью рассмотренных алгоритмов, является решением глобальной задачи оптимального управления системой (1) с критерием J.

3. Моделирование мультиагентной системы

На основе проведенного анализа автором был выбран алгоритм на основе формулы (9), так как он лучше подходит для управления смешанной системой. Моделирование MAS управления микроклиматом и энергопотреблением производилось в составе разработанного ранее программного комплекса для компьютерного моделирования инженерных систем здания [10]. Одна из основных частей программного комплекса — система имитационного моделирования AnyLogic. За основу компьютерной модели в системе AnyLogic взята модель, представленная в [5], включающая различные типы агентов: агентов, связанных с человеком, локальных и зональных агентов. Выбранный алгоритм управления на основе некооперативной игры на базе MPC-подхода реализован в моделях специальных локальных агентов системы отопления, вентиляции и кондиционирования.

Среда AnyLogic позволяет моделировать поведение людей внутри здания и работу простого климатического оборудования, систем энергоснабжения, освещения и безопасности. Однако система AnyLogic не имеет встроенных возможностей по выполнению сложных матричных операций, функций оптимизации и оптимального управления в процессе моделирования. Поэтому в состав программного комплекса включен пакет MATLAB/Simulink, который применяется для моделирования микроклимата здания, сложного оборудования и алгоритмов системы управления.

Для взаимодействия между AnyLogic и MATLAB/Simulink используется интерфейс OPC и специально разработанный OPC-сервер. Для доступа к OPC-серверу со стороны AnyLogic разработана внешняя Java библиотека,

выполняющая роль OPC-клиента. Для доступа к OPC-серверу со стороны MATLAB/Simulink применялись функции OPC Toolbox. Они позволяют подключиться к OPC-серверу, добавлять группы и теги, читать и записывать значения тегов.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрена задача управления микроклиматом помещения с помощью множества агентов. Проведен анализ алгоритмов управления на основе некооперативной игры на базе MPC-подхода, на основе которого был выбран алгоритм, наиболее подходящий для управления смешанной системой. Выполнена реализация модели MAS управления микроклиматом и энергопотреблением в системе AnyLogic. Учитывая общую тенденцию широкого распространения распределенных систем на базе киберфизических устройств, такой подход к построению систем управления становится все более популярным.

Список литературы

1. *Shaikh P.H., Nor N.M., Nallagowngen P. et al.* Review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 34. P. 409—429.

2. *Maestre J.M., Negenborn R.R.* Distributed Model Predictive Control Made Easy. Springer, 2014.

3. *Abras S., Ploix S., Pesty S. et al.* A multi-agent home automation system for power management // Third International Conference in Control, Automation and Robotics. 2006. P. 59—68.

4. *Klein L., Kwak J., Kavulya G. et al.* Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multiagent systems // Automation in Construction. 2012. Vol. 22. P. 525—536.

5. *Марьясин О.Ю.* Проектирование мультиагентной системы управления зданием с использованием онтологий // Онтология проектирования. 2018. №3. С. 387—399.

6. *Колодкина А.С., Марьясин О.Ю.* Энергоэффективное управление при смешанном отоплении здания // Сборник трудов XXVIII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28», Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2015. Т. 9. С. 39—43.

7. *Марьясин О.Ю., Белов М.А.* Моделирование системы смешанного управления с разными типами регуляторов // Межвузовский сборник научный трудов «Математика и естественные науки. Теория и практика». Ярославль : Издат. дом. ЯГТУ, 2018. Вып. 13. С. 223—233.

8. *Stieler M., Baumann M.H., Grüne L.* Noncooperative Model Predictive Control for Affine-Quadratic Games // 89th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics. 2018. Vol. 1. P. 1—2.

9. *Rawlings J.B., Mayne D.Q.* Model Predictive Control: Theory and Design. Nob Hill Publishing, 2016.

10. *Марьясин О.Ю.* Программный комплекс для моделирования инженерных систем зданий // Труды XVII международной научно-практической конференции «Си-

стемы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2017, Москва, 12—14 декабря 2017 г.). М. : ИПУ РАН, 2017. С. 24—27.

И. В. Матюшкин
Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Москва, Зеленоград, Россия
e-mail: imatyushkin@niime.ru

КОННЕКЦИОНИСТСКИЕ СИСТЕМЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФОРМАЛИЗМА КЛАССИЧЕСКИХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция гибридизации и синтеза формальных концепций, выступающих под «зонтиком» парадигмы коннекционизма и эволюционного моделирования. Автор работает в области клеточных автоматов (КА), что обусловливает выбор цели работы — компаративный анализ КА и других коннекционистских систем, прежде всего нейронных сетей и мультиагентных систем, а также обогащение области КА смежными концепциями. Другая цель — соотнесение нетрадиционных КА, широко используемых в практике моделирования, и дефиниции классического КА.

1. История вопроса

Если вглядеться в историю науки XX в., то после успехов естествознания XVII—XIX вв. главным предметом изучения XX—XXI вв. стал человеческий мозг и структура психики. Начало положили физиологи, пытаясь узнать механизмы раздражимости нервной ткани; отсюда первая модель биологического нейрона [1], датируемая 1907 г., и представления о мозге как сети нейронов, что дает нам предысторию коннекционизма. Важнейшую роль в интеграции междисциплинарного знания сыграли семинары, организованные Норбертом Винером в 30—50-е гг. XX в. в медицинском центре при Гарвардском университете. Другим идейным вдохновителем проблематики интеллекта, прежде всего искусственного, был Алан Тьюринг. Хотя его работы имели преимущественно логический уклон [2], до сих пор не утратил значение труд 1952 г. (за два года до смерти гения) по клеточной дифференциации [3], продолжающий традицию Артуро Розенблютта и Норберта Винера.

Совместная вовлеченность математиков, биохимиков и актуальность создания ЭВМ привела к появлению базовых концепций, «варившихся в общем котле»: формального нейрона (1943), конечного автомата (Эдвард Мур, 1956), архитектуры ЭВМ (фон Нейман, первый отчет по ЭНИАК/ЭДВАК, 1945) и первых коннекционистских систем (1952 — фон Нейман, клеточные автоматы; 1957 — Фрэнк Розенблатт, перцептрон и само название «коннек-

© Матюшкин И. В., 2020

ционизм»; 1969 — Михаил Львович Цетлин, мультиагентная система [4]). Официальный отчет фон Неймана содержал вольные биологические аналогии; представления о «клетке» характерны для наиболее известного КА, игры «Жизнь» (1970 — Дж. Конвэй), а второй отец КА (1969 — небольшая работа «Rechnender Raum»), Конрад Цузе одновременно изобретатель немецкого компьютера (1941/8). Представление о мультиагентных системах как о чем-то недавно изобретенном ошибочно. Наверное, истоки надо искать у Тьюринга, рассматривавшего динамику сети логических элементов типа «И-НЕ», объединенных случайными связями. Базовые концепции не раз переизобретались, часто меняя название; так, «итерированные массивы» 50—60-х гг. стали в 70—80-е гг. «однородными структурами», а с начала 90-х гг. получили современное название «клеточные автоматы». Так и у Цетлина еще нет понятия «мультиагентная система», но вполне на высоком математическом уровне описано взаимодействие конечных автоматов.

Коннекционизм [5], известный в психологии по работам Торндайка начала XX в. и родственный нейросетям, сблизился, благодаря работам Румельхарта (1985) и понятию «актор» [6], с символьной динамикой и мультиагентными системами. Вопросы обучения, о важности которых писал еще Тьюринг [2], неразрывны с наукой нейросетей, но повлияли и на область КА через работы Лэнгтона [7] и Кречфилда 80-х гг. [8]. Направление эволюционного моделирования и генетических алгоритмов развивается в середине 70-х гг. (Дж. Холланд, 1975), но его истоки опять же следует отнести к тому же «общему котлу» [9], т. е. идеям искусственного разума (Тьюринг), искусственной жизни (Лэнгтон) и эволюции.

Определим «коннекционистскую систему» как такую систему, сложное поведение которой объяснимо через свойства относительно простых однотипных элементов, ее составляющих, и через структуру связей между ними, причем второй фактор более значим.

2. Классический клеточный автомат

Определение КА в настоящее время имеет тенденцию к размытию [10], поэтому введем термин «классический клеточный автомат» (ККА) в соответствии с определением КА финским математиком Ярко Кари [11,12].

Пусть S — конечное множество (например, алфавит), $\mathbb{Z}^d$ — бесконечная d-мерная целочисленная решетка. (Глобальной) конфигурацией КА назовем отображение решетки на множество состояний $c:\mathbb{Z}^d \to S$ и введем множество всех конфигураций $C(d,S) \equiv S^{\mathbb{Z}^d}$. Шаблон окрестности представляется кортежем d-мерных векторов $N = \langle \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_n \rangle, \mathbf{x}_i \in \mathbb{Z}^d, i = \overline{1,n}$. Локальной функцией перехода (ЛФП, local rule) называется $f: S^n \to S$. За один ход симуляции происходит изменение конфигурации $c \to e \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow \left(\forall \mathbf{x} \in \mathbb{Z}^d\right)\left(e(\mathbf{x}) = f\left(\mathbf{x}+\mathbf{x}_1, \ldots, \mathbf{x}+\mathbf{x}_n\right)\right)$, и такое изменение порождает гло-

бальную функцию перехода (global transition function) $e = G(c), G : C \to C$. Таким образом, классический КА определяется тройкой $\langle S, N, f \rangle$, не считая d или решетки $\mathbb{Z}^d$, а также дискретного множества моментов времени T. ККА обладает свойствами: *однородности элементов* (т. е. каждый элемент/ячейка устроен одинаково, прежде всего по структуре своего состояния и предписанных ему локальных правил перехода); *локальности связей* (т. е. выбирается способ индексирования или именования ячеек КА и постулируется универсальность выбора соседей для каждой ячейки, кроме, быть может, граничных; по сути, выбирается топология КА, и в самом простом случае мы говорим об 1D, 2D, 3D-автоматах и ради удобства восприятия ассоциируем каждую ячейку с узлом решетки); *синхронности работы* (т. е. будущее состояние ячейки зависит от прошлых состояний самой ячейки и ее соседей, что автоматически означает одновременное выполнение локальных функций перехода по всему полю КА; тем не менее известно множество асинхронных КА-моделей); *дискретности состояния* (это свойство наследовано из определения конечного автомата); с содержательной точки зрения семантика КА, по нашей терминологии, эксплицируется в трех подходах: традиция Неймана (клеткам соответствуют фиксированные физические объекты, состояния смежных клеток определяют новое состояние клетки); традиция Цузе (клетка есть математическая абстракция — конечный объем, виртуальный резервуар для мигрирующих и взаимодействующих между собой физических частиц); традиция Цетлина (клетки-индивидуумы могут путешествовать по физическому пространству, т. е. координаты клетки «вкладываются» в состояние ячейки, и, следовательно, менять структуру своих связей; КА есть мультиагентная система).

3. Сравнение с нейронными сетями. Синтез концепций в виде адаптивного нейрона

Классическим определением нейросети НС может служить определение Ф. Розенблатта [13], отражающее общее понимание 60-х гг. XX в. нейрона как обработчика сигнала. Более современное понимание отражено у С. Хайкина [14]: Нейронная сеть — это направленный граф, состоящий из узлов, соединенных синаптическими и активационными связями, который характеризуется следующими четырьмя свойствами: каждый нейрон представляется множеством линейных синаптических связей, внешним порогом и, возможно, нелинейной связью активации. Порог, представляемый входной синаптической связью, считается равным +1; синаптические связи нейрона используются для взвешивания соответствующих входных сигналов; взвешенная сумма входных сигналов определяет индуцированное локальное поле каждого конкретного нейрона; активационные связи модифицируют индуцированное локальное поле нейрона, создавая выходной сигнал.

Парадоксально, но по формальной модели нейрон не обладает памятью и не предназначен для хранения информации. Привычные веса и пороги лишь

константы, определяемые до обучения для индивидуации каждого нейрона. В последнее время стали популярны сверточные нейронные сети; но что такое свертка, как не самоограничение полносвязности сети принципом локальности в КА? А наложение шаблона весов на окрестность нейрона не есть ли повторение очень старой идеи тоталистичных КА? Есть, однако, небольшое идеологическое отличие: суммирование нужно в НС для понижения размерности многих входов в размерность выхода, а в КА это способ добиться пространственной симметрии. Обе концепции очень близки, но полезно видеть их индивидуализирующие отличия. Первый их синтез известен как «клеточная нелинейная (нейронная) сеть». В [15] мы предложили свой вариант синтеза под названием «адаптивный нейрон», допустив свободу выбора функции активации и функции суммирования, а ее лучше называть функцией свертки за счет явного наделения нейрона памятью. Этот выбор может достигаться как при обучении, так и в процессе работы сети; последнее, очевидно, открывает большие перспективы в аспекте робастности.

Следует отметить, что используемые в современной практике искусственные нейроны и НС расширяют узкие рамки своего классического определения; известны, например, мультипликативные нейроны. Будет ли подпадать под классическое определение НС сеть, если мы отменим пороговый характер функции активации, заменив ее, скажем, функцией четности или синусоидой, как сделано в КА Фредкина? Суммируем сходства и различия КА и НС в таблице.

Свойство	*Нейронная сеть*	*Клеточный автомат*
Память элемента	Нет понятия «состояние», используется термин «сигнал» между элементами	Центральное понятие «состояние»; термин «сигнал» понимается как устойчивая конфигурация состояний нескольких ячеек, движущаяся по полю КА
Локальность связей	Как правило, не выполняется, вплоть до полносвязности «каждый связан с каждым» (включая самого себя); в многослойной сети, если не оговорено обратное, нейроны последующего слоя связаны с каждым нейроном предыдущего слоя; при операции конволюции свойство локальности восстанавливается	Существенное требование; вводится «радиус окрестности»
Однородность элементов	Требование не оговорено; обычно в пределах одного слоя нейроны функционируют одинаково (по функции активации)	Состояние ячеек стандартизовано; большая часть ячеек однородна по ЛФП; в общем случае ячейки могут быть разбиты на *небольшое* число классов

Окончание табл.

Свойство	*Нейронная сеть*	*Клеточный автомат*
Дискретность состояния	Сигналы могут быть как дискретные, так и аналоговые; для аппаратных реализаций характерен дискретный тип сигналов	Состояние обычно полагается дискретным, но изредка — непрерывным или смешанным
Дискретность времени при работе	Несущественное требование; при аппаратных реализациях желательно, так как часто сигналы имеют характер меандра	Существенное и абсолютное требование
Синхронность срабатываний переходов	Обычно сеть синхронна	В классическом варианте синхронность, но достаточно много и асинхронных реализаций
Особенности функции перехода	Всегда двухстадийна: 1) в классическом подходе — взвешенная сумма, сводящая векторный вход к скалярному выходу, 2) в классическом подходе — нелинейная функция активации: либо имеет характер порогового переключения из 0 в 1, либо имеет сигмоидальный вид $\frac{x}{ax+b}$	В общем виде предполагает табличное задание. Для одномерных двоичных (элементарных) автоматов задается вольфрамовской нумерацией. Популярны тоталистичные и полутоталистичные КА с функциями: $x := f\left(\sum_i x_i\right),$ $x := f\left(x, \sum_i x_i\right)$
Особенности обучения	Подбирают веса и пороги — параметры функции перехода	Если проблема ставится, то подбирают таблицы переходов (истинности). Возможно введение целочисленных параметров в ЛФП с последующим подбором значений (например: ламбда-параметр Лэнгтона, вероятности переходов в КА с альтернацией); такая техника присуща «evolving CA»
Возможность обратных связей	Могут быть введены в структуру НС; обычно сигнал идет от входа к выходу, но в интеллектуальных сетях по другому	Присутствуют изначально; нет понятий «входа» и «выхода», при циклическом задании границ КА можно установить аналог «удаленной» обратной связи
Область применения	Задачи распознавания, классификации, параллельных вычислений, обратные задачи математической физики	Задачи распознавания, нелинейной динамики и самоорганизации, параллельных вычислений, прямые задачи математической физики

4. Связь с сетями Петри

КА наиболее «бедная» структура из всех коннекционистских. Нейронные сети лишены таких ее ограничений, как регулярность и локальность связей, хотя на практике и существует тенденция уйти от полносвязной архитектуры к блочной, а подчас и решеточной. Но НС имеют ограничение по сравнению с КА, назовем это «стигмат двухстадийности», в произвольности выбора функции локального перехода. Характерными же чертами сетей Петри является акцент на асинхронности и концепция фишек. Двудольность графа также интересная особенность, проявление частичной гетерогенности; если бы мы составили КА по образцу сети Петри, то ввели бы ячейки класса А и класса Б с собственными «классовыми» правилами перехода. На наш взгляд, это было бы допустимым расширением дефиниции ККА. По признаку шаблона окрестности сети Петри, конечно, ближе к НС, чем к КА.

Концепция фишек весьма сходным образом реализуется в семантике КА, по Цузе, в тех КА, часто блочных и вероятностных, моделирующих химическую кинетику и гидродинамику. Следует также обратить внимание на сходство с методами PIC (particles-in-cell). Асинхронность в сетях Петри используется гораздо гибче, чем в КА. Формальная модель ККА расширяема для учета асинхронности через последовательность порядка исполнения ЛФП, но детерминация этого порядка выведена за пределы модели, и на практике такая детерминация примитивна. Асинхронность режима работы сети Петри обычно контекстно-зависима.

5. Расширения ККА

Существует многообразие КА на практике моделирования, но есть и формализм ККА. Являются ли эти КА действительно, в строгом смысле определения, клеточными автоматами? Вопрос носит сущностно-субъективный характер, и в попытке его сузить возникает проблема эквивалентности данного КА некому ККА, проблема редукции. В некоторых случаях она решается успешно.

Учет конечности поля КА и границ. ККА бесконечен, реальный КА как программная структура в памяти ЭВМ всегда конечен. Проблему легко решить введением расширенного поля КА; например, в 2D-случае квадрат размера $n \times n$ мультиплицируется на бесконечной плоскости. Но естественным образом возникает неоднородность на границах, и какие-то ячейки приходится объявить граничными. Для этого применяется искусственный прием: во множество состояний вводится дополнительное «#», а граничные ячейки для начальной конфигурации им маркируются с соответствующим расширением арности ЛФП. По мнению автора, на практике это излишнее и нужно следовать правилу «для граничных ячеек правила ЛФП особые».

Учет многокомпонентности. Практика КА моделирования часто показывает, что разумно разделять данные и управляющие конструкции, например, типа логических флагов (битов или тритов). С одной стороны, решение ба-

нально: вместо дискретного множества S вводится декартово произведение базовых множеств, т. е. $S = S_1 \times \ldots \times S_K$. С другой стороны, часто возникает соблазн делать какую-то из компонент состояния непрерывной или условно непрерывной (например, при адаптации КА к разностной схеме решения дифференциальных уравнений) при инкапсуляции данных, в частности для реализации мультиагентности.

Учет блочности КА и реконфигурируемости окрестности. Изначально блочные КА были предложены для моделирования диффузии Н. Марголусом; он же придумал и «лекарство» — ввести в состояние ячейки флаг (активного) соседства с правилом ЛФП инверсии во времени.

Учет переноса вещества. Это может быть реализовано асинхронно-парными или синхронно-парными КА. Для детерминированного случая вполне подходит способ Марголуса (флаг блочности или соседства). Но при розыгрыше вероятностных сценариев ЛФП модифицирует весь блок, а не одну «центральную» ячейку, требуется согласованность изменения соседних ячеек, если бы КА был обычным. И здесь уже редукция не может быть полной как для детерминированных парных переходов.

Заключение

Мультиагентные системы вряд ли могут быть легко «транскрибированы» с помощью формализма ККА. Очень близка к ним в рамках традиции Цетлина концепция подвижных КА, предложенная Смолиным и Псахье для моделирования трещин в хрупких материалах; но тут еще возможна эквивалентность подвижного КА классическому КА. Для известной сегрегационной модели Шеллинга (1978), которую относят к мультиагентной клеточно-автоматной, такая редукция вряд ли возможна.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-07-00409.

Список литературы

1. *Abbott L. F.* Lapicque's introduction of the integrate-and-fire model neuron (1907) // Brain Research Bulletin. 1999. Vol. 50, № 5/6. P. 303—304.

2. *Тьюринг А.* Может ли машина мыслить? (С приложением статьи Дж. фон Неймана «Общая и логическая теория автоматов») / пер. и прим. Ю. В. Данилова. М. : ГИФМЛ, 1960.

3. *Turing A. M.* The chemical basis of the morphogenesis. Phil. Trans. R. Soc. London, 1952. B 237. P. 37—71.

4. *Цетлин М. Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М. : Наука, 1969.

5. *Medler D.* A Brief History of Connectionism // Neural Computing Surveys. 1998. No. 1 (2). P. 18—72.

6. *Rumelhart D., McClelland J.* and the PDP Research Group, editors. Parallel Distributed Processing, volume 1: Foundations. MIT Press, Cambridge, MA, 1986.

7. *Langton C. G.* Is There a Sharp Phase Transition for Deterministic Cellular Automata? W.K Wootters, Physica D, 45, 1990.

8. *Crutchfield J. P., Young K.* Computation at the Onset of Chaos // Complexity, Entropy and the Physics of Information, W. Zurek, editor, SFI Studies in the Sciences of Complexity, VIII, Addison-Wesley, Reading. Massachusetts. 1990 P. 223—269.

9. *Barricelli N.* Numerical testing of evolution theories. Part II. Preliminary tests of performance, symbiogenesis and terrestrial life // ActaBiotheoretica. 1963. №16. P. 99—126.

10. *Матюшкин И. В., Заплетина М. А.*, Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. №11:1. С. 9—57.

11. *Гаврилов С. В., Матюшкин И. В., Стемпковский А. Л.* Вычислимость в клеточных автоматах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. №1. С. 18—36.

12. *Kari J.* Theory of cellular automata: A survey // Theoretical Computer Science. 2005. №334. P. 3—33.

13. *Розенблатт Ф.* Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга. М. : Мир, 1965.

14. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. Изд. 2-е, испр. М. : Вильямс, 2008.

15. *Матюшкин И. В., Соловьев Р. А.* Модель адаптивного нейрона и его аппаратная реализация на ПЛИС // Электронная техника. Серия 3 : Микроэлектроника. 2017. №3 (167). С. 53—61.

И. В. Матюшкин[1], П. Д. Рубис[2]

[1] Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Москва, Зеленоград, Россия
[2]Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, Зеленоград, Россия
e-mail: [1]imatyushkin@niime.ru, [2]prubis@niime.ru

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПЕРМУТАЦИЙ МАТРИЦ

Введение

Пермутация, или перестановка элементов, матрицы — один из способов генерации псевдослучайного числа. Простейшие пермутации — поворот, отражение и транспонирование матрицы. Актуальность поиска эффективных способов псевдослучайной пермутации матрицы обусловлена тем, что эта операция находит множество применений в различных областях, прежде всего в обработке и визуализации табличных данных [1; 2]. Генерация тестовых последовательностей в логических блоках современных СБИС также может требовать случайной перестановки данных внутри матричного блока, например схемы с программируемой логикой (ПЛИС). Помимо генерации случайных чисел перестановка матричных элементов непосредственно используется в криптографии [3—5]. Обычно вводится псевдослучайная функция $\{0,1\}^k \times \{0,1\}^n \to \{0,1\}^n$, где первая часть декартова произведения относится к *k*-битному ключу, а вторая — к *n*-битному сообщению. При задании поискового поведения интеллектуального агента также может понадобится таблица псевдослучайных чисел.

© Матюшкин И. В., Рубис П. Д., 2020

Цель работы состоит в изучении и модификации ранее предложенного алгоритма [4] перестановки матриц. Кратко будем называть его схема «1:1», поскольку каждый элемент матрицы за две итерации смещался на одну строку и столбец, двигаясь по диагонали. Алгоритмы даются в клеточно-автоматной (КА) формализации, хотя с точки зрения результата это имеет вторичное значение. В данной работе будем исследовать два других случая: когда угол падения равен $\operatorname{arctg} 2$ (смещению на единицу по вертикали отвечает смещение на два по горизонтали), назовем его схема «1:2», и когда сдвиги происходят с пропуском одного столбца или строки — схема «1:0:1».

1. Схемы алгоритмов

Кратко рассмотрим сначала идею основного алгоритма, предложенного автором в [4], так как последующие два — его модификации. Квадратная матрица $n \times n$ помещена в поле КА с замыканием границ (тороидальная решетка). Алгоритм состоит из четырех периодически повторяющихся этапов, каждый из которых представляет циклический сдвиг (рис. 1): нечетные столбцы сдвигаются вверх, четные — вниз; нечетные строки сдвигаются вправо, четные — влево; нечетные столбцы сдвигаются вниз, четные — вверх; нечетные строки сдвигаются влево, четные — вправо.

Преобразование матрицы за один этап здесь и далее будем называть шагом, или тактом, а за все этапы — проходом. Чередующиеся смещения по столбцам и строкам объясняют название алгоритма — «схема 1:1».

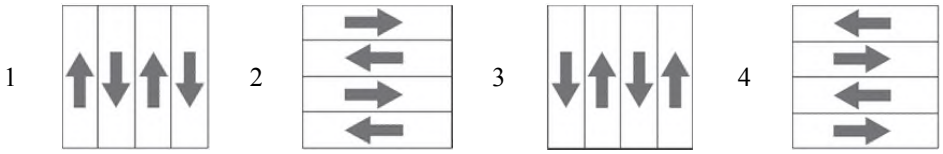


Рис. 1. Визуализация «схемы 1:1»

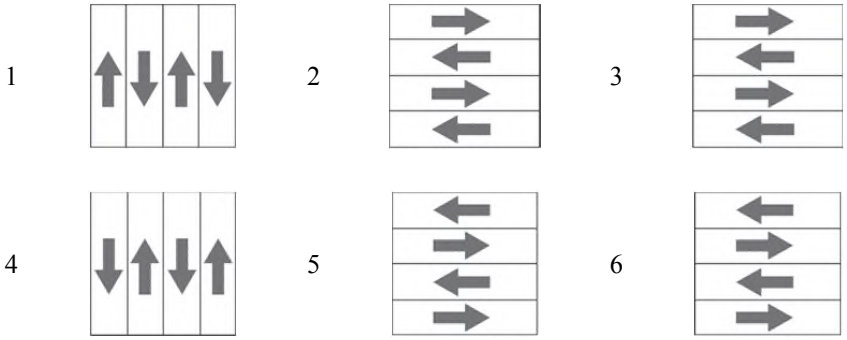


Рис. 2. Визуализация схемы «1:2»

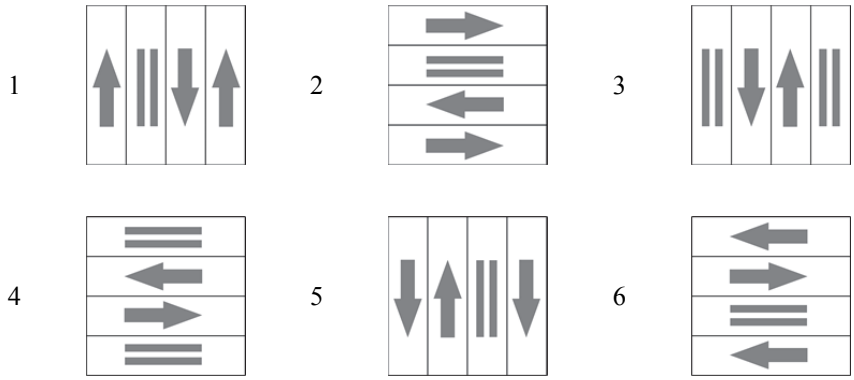


Рис. 3. Визуализация схемы «1:0:1»

Проход схемы «1:2» состоит из шести шагов, за счет повторения этапов 2-й и 4-й схемы «1:1» на следующем после них шаге алгоритма, т. е. смещению на 1 по вертикали отвечает смещение на 2 по горизонтали. КА-формулировка не представляется, так как модификации в компонентах состояния клеток КА и локальной функции перехода (ЛФП) незначительны. Схема «1:0:1» также имеет шесть шагов в проходе из-за периода направлений смещения (табл. 2).

Теперь представим КА-формулировку «схемы 1:0:1». Состояния ячеек определяются четырьмя компонентами $\langle v, g, b, s \rangle$, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Описание компонент клетки $\langle v, g, b, s \rangle$ схемы «1:0:1»

Название	Флаг вертикального перемещения	Флаг горизонтального перемещения	Логический флаг	Регистр данных
Обозначение	v	g	b	s
Множество значений	$v \in \{\uparrow, \updownarrow, \downarrow\} \equiv \{1, 0, -1\}$	$g \in \{\rightarrow, \leftrightarrow, \leftarrow\} \equiv \{1, 0, -1\}$	$b \in \{0, 1\}$	Произвольное
Описание	Отвечает за вертикальное перемещение элементов матрицы.	Отвечает за горизонтальное перемещение элементов матрицы.	Обеспечивает чередование вертикальных и горизонтальных перемещений.	Данные $M = \|\|m_{ij}\|\|$

Таблица 2

ЛФП схемы «1:0:1»

Условие перехода		Формула перехода	
$b=1$	$v=1$	$s := s_{\uparrow}\ ;\ v := 0$	$b := \overline{b}$
	$v=0$	$s := s\ ;\ v := -1$	
	$v=-1$	$s := s_{\downarrow}\ ;\ v := 1$	
$b=0$	$g=1$	$s := s_{\rightarrow}\ ;\ g := 0$	
	$g=0$	$s := s\ ;\ g := -1$	
	$g=-1$	$s := s_{\leftarrow}\ ;\ g := 1$	

2. Сложность алгоритмов

Эмпирически установлено, что через некоторое число проходов алгоритмы переводят матрицу в исходное состояние, что принято нами за условие останова алгоритма. Это следует и теоретически из конечности числа перестановок, которое для матрицы $n \times n$ для попарно различных элементов не превосходит $\left(n^2\right)!$. Уточним, что период алгоритма N вводится не только для компоненты данных s, а также и для флагов, определяющих направление сдвига элемента. То есть пермутация совпадает с исходной матрицей, если компоненты всех ее элементов принимают начальные значения. Если же для флагов перемещения совпадения нет, то такую ситуацию назовем *самопересечением*.

Кратко рассмотрим сначала периоды схемы «1:1». Для четных порядков матриц период равен $n/2$, а для нечетных порядков была доказана [4] следующая зависимость по закону наименьшего кратного: $N(n) = HOK(3,5,\ldots,2n-1)$, что соответствует скорости роста, большей экспоненциальной.

Структура зависимости $N(n)$ в схеме «1:2» и схеме «1:0:1» имеет более сложную природу (табл. 3, 4). На основе рассчитанных значений периодов для начального натурального участка были получены эмпирические формулы, на данный момент требующие доказательства.

Эмпирические зависимости $N(n)$ в схеме «1:2» проще показать, представив n как совокупность классов вычетов по делителю 4 (табл. 3).

$N(n)$ в схеме «1:0:1» описывается похожим образом, через представление n в качестве группы вычетов по делителю 3. Для классов $n = 3k+1$ и $n = 3k+2$ точная структура зависимости сложна и требует введения законов и для k: $k(m)$, $m \in \mathbb{N}$ (табл. 4).

Таблица 3

$N(k)$ и $N(n)$ схемы «1:2»

$n(k)$	Условие для k	$N(k)$	$N(n)$
$4k$	нет	k	$n/4$
$4k+2$	нет	$2k+1$	$n/2$
$4k+1$	$k \bmod 3 \neq 2$	$(4k+1)(6k+3)$	$(3/2)n(n+1)$
	$k \bmod 3 = 2$	$(4k+1)(2k+1)$	$(1/2)n(n+1)$
$4k-1$	$k \bmod 3 \neq 1$	$(2k+1)(4k-1)(6k-1)$	$(1/4)n(3n+1)(n+3)$
	$k \bmod 3 = 1$	$(1/3)(2k+1)(4k-1)(6k-1)$	$(1/12)n(3n+1)(n+3)$

Таблица 4

$N(m)$ и $N(n)$ схемы «1:0:1»

$n(k)$	$k(m)$	$N(m)$	$N(n)$
$3k$	m	$2m$	$(2/3)n$
$3k+1$	$2m-1$	$2(2m+3)(2m+1)$	$(2/9)(n+5)(n+11)$
	$4m-2$	$4m(2m+1)$	$(1/18)(n+5)(n+11)$
	$4m$	$8(m+1)(2m+1)$	$(1/9)(n+5)(n+11)$
$3k+2$	$12m$	$2(12m+7)(24m+3)(12m+1)$	$(2/27)(n+19)(2n+5)(n+1)$
	$12m+4$	$2(12m-7)(24m-13)(12m-1)$	
	$12m+6$	$2(12m-5)(24m-9)(12m+1)$	
	$12m+10$	$2(12m+5)(24m-1)(12m-1)$	
	$12m+3$	$24(3m-2)(8m-5)(6m-1)$	$(1/27)(n+19)(2n+5)(n+1)$
	$12m+7$	$8(3m-1)(24m-7)(6m+1)$	
	$12m+2$	$6(4m-3)(24m-17)(4m-1)$	$(2/81)(n+19)(2n+5)(n+1)$
	$12m+8$	$6(4m+1)(24m-5)(4m-1)$	
	$12m+1$	$4(3m+2)(24m+5)(6m+1)$	$(1/54)(n+19)(2n+5)(n+1)$
	$12m+9$	$12(3m+1)(6m-1)(8m-1)$	
	$12m+11$	$24(2m+3)(24m+25)(m+1)$	$(1/81)(n+19)(2n+5)(n+1)$
	$12m+5$	$12(m+1)(24m+13)(2m+1)$	$(1/162)(n+19)(2n+5)(n+1)$

Зависимость $N(n)$ матриц порядка $n = 3k + 2$ в схеме «1:0:1» имеет еще более сложную структуру и делится на шесть ветвей по разным законам $k(m)$ (рис. 4). Данная группа также представляет особый интерес из-за *выпадающих* точек, присутствующих в некоторых ветвях, период которых не аппроксимируется эмпирическим формулам из таблицы 4.

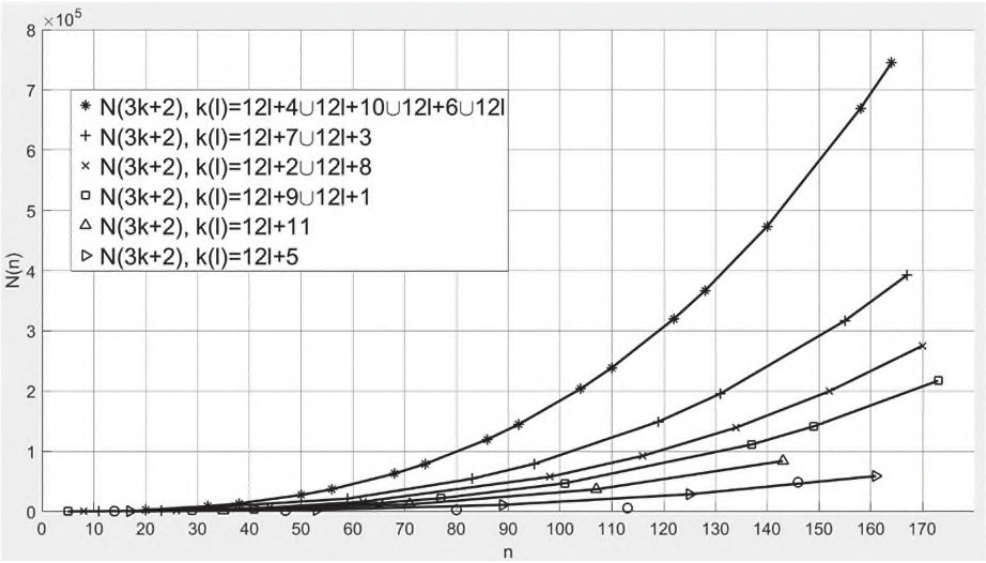


Рис. 4. Зависимости рассчитанных значений периодов схемы «101» от $n = 3k + 2$. Круглыми маркерами отмечены точки, в которых нарушаются эмпирические формулы $N(n)$ из таблицы 4.

3. Индивидуальные траектории элементов

Полученные периоды обусловлены индивидуальными траекториями элементов и их длинами (ДИТ), которые лучше рассматривать на расширенном поле КА.

ИТ в схеме «1:1» напоминают путь бильярдного шара (рис. 5), а граница поля играет роль стенки. ДИТ зависит от начального положения элемента. ДИТ в схеме «1:2» менее разнообразны: для матриц четных порядков существует всего один вид траекторий, равный соответственно периоду алгоритма. Для нечетных же существуют три ДИТ, отличных от единицы (рис. 6, *а*) и зависящих от *n* линейно.

Наличие нескольких путей элементов и линейная зависимость их длин от порядка матрицы также характерны для схемы «1:0:1». Однако траектории элементов здесь имеют более необычную форму с возвращениями и колебаниями на границах из-за нарушения чередования значений флагов смещения.

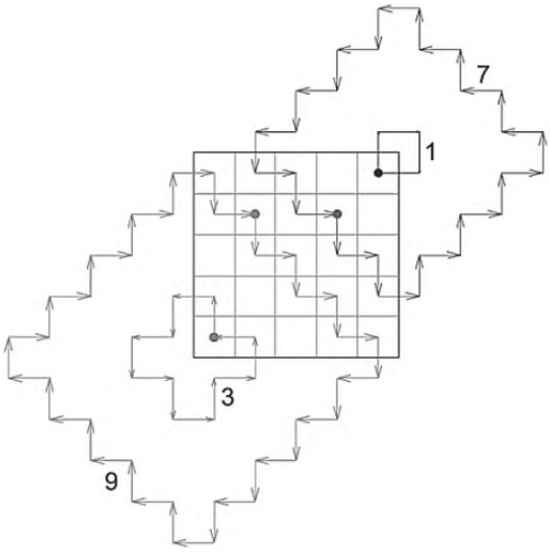
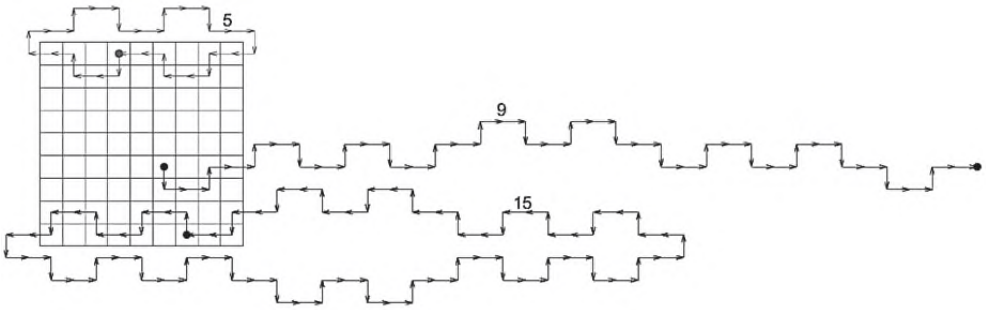
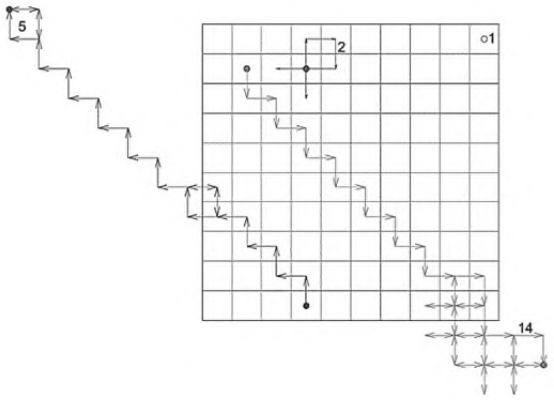


Рис. 5. Индивидуальные траектории некоторых элементов матрицы 5×5 в расширенном представлении для схемы «1:1». В конце каждой траектории указана ее ДИТ в проходах



а



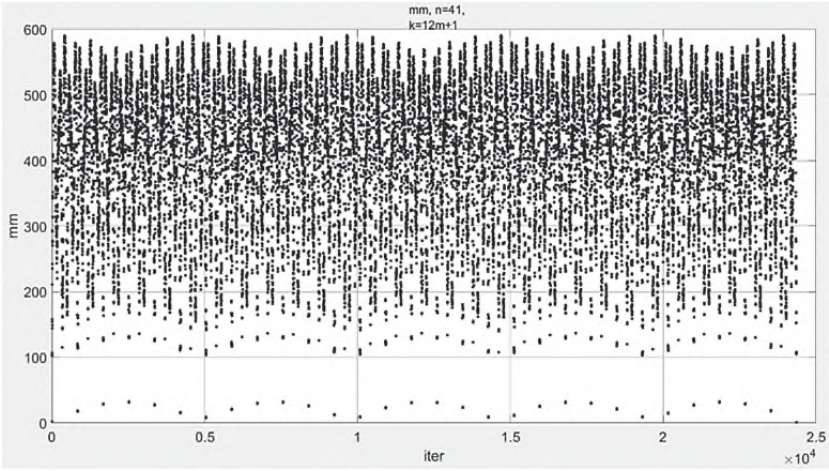
б

Рис. 6. Индивидуальные траектории некоторых элементов матриц 5×5 и 10×10 в расширенном представлении для схем «1:2» (*а*) и «1:0:1» (*б*); в конце каждой траектории указана ее ДИТ в проходах

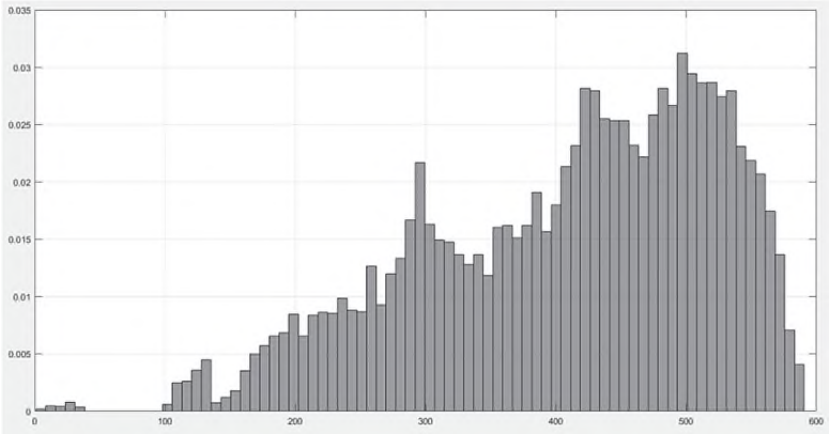
4. Анализ динамики алгоритмов с помощью «метрик перемешанности»

Каждый ход КА дает перестановку матрицы относительно начальной (считаем все элементы различными). Для описания динамики КА существуют числовые характеристики «удаленности» текущей перестановки от начальной. Воспользуемся введенными ранее [5; 6] «метриками» *mm* (*matrix mixedness*) и *lm* (*linear mixedness*), применив их на каждом шаге *iter* алгоритма (рис. 7).

На рисунке 7 приведены визуализация значений *mm*-метрики на всем периоде в схеме «1:0:1» (*а*) и гистограмма распределения перестановок по метрикам: «доля от общего числа перестановок — значение метрики» (*б*), рассчитанные для матрицы 41×41.



а



б

Рис. 7. *mm* метрика последовательных конфигураций матрицы 41×41 в схеме «1:0:1» (*а*) и гистограмма распределения перестановок по метрикам: «доля от общего числа перестановок — значение метрики» (*б*)

Заключение

Зависимости предложенных алгоритмов показывают очевидное преимущество схемы «1:1» над его модификациями с точки зрения криптографической эффективности. Остальные две схемы пермутации матриц показывают нетривиальное распределение «метрик перемешанности» и лакуны значений на гистограммах этих метрик. Методика исследования всех трех схем одинакова: в начале вычисляется период алгоритма, затем исследуются индивидуальные траектории элементов на расширенном поле КА, длины этих траекторий (из чего следует значение периода), а также поведение и статистика проходимых КА конфигураций с помощью «метрик перемешанности». Эмпирически полученные зависимости периода от порядка матрицы в схемах «1:2» и «1:0:1» в лучшем случае имеют кубическую зависимость $N(n)$.

Полученные результаты могут быть интересны специалистам по комбинаторике и дискретной математике. При аппаратной реализации интеллектуальных систем генерация псевдослучайной матрицы с помощью специализированной СБИС предложенные алгоритмы потенциально будут востребованы в практических задачах эвристического поискового поведения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-07-00409.

Список литературы

1. *Girau B., Vlassopoulos N.* Evolution of 2-dimensional cellular automata as pseudorandom number generators // Cellular automata: 10th Intern. conf. on cellular automata for research and industry. Proc. B. ; Hdbl. : Springer, 2012. P. 611—622.

2. *Behrisch M., Bach B., Riche N. et al.* Matrix Reordering Methods for Table and Network Visualization // Computer Graphics Forum 2016 : John Wiley & Sons Ltd, 2016.

3. *Patidar V., Pareek N.K., Purohit G. et al.* A robust and secure chaotic standard map based pseudorandom permutation-substitution scheme for image encryption // Optics Communications. 2011. Vol. 284, № 19. P. 4331—4339.

4. *Матюшкин И.В., Кожевников В.С.* Клеточно-автоматный алгоритм пермутации матриц // Математика и математическое моделирование. 2019. № 3. С. 1—24

5. *Матюшкин И.В., Кожевников В.С.* Клеточно-автоматные алгоритмы пермутации матриц // ТРУДЫ МФТИ. 2019. Т. 11, № 1. С. 39—52.

6. *Deza E., Deza M.M.* Dictionary of distances. Elsevier., 2006.

Э.И. Мухитов
Управление Балтийского флота, Калининград, Россия
e-mail: mukh70@yandex.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ БЛОКЧЕЙНА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ

Современные мультиагентные системы создаются на основе интеллектуальных агентов, обладающих следующими свойствами: автономностью, коммуникативностью, декларативной и процедурной информацией. Это поз-

© Мухитов Э.И., 2020

воляет применять мультиагентные системы для решения широкого спектра задач, к примеру распределенных вычислений, управления информационными потоками в различных сетевых структурах, производственно-логистических комплексах. Защищенный канал связи и шифрование хранимых данных повышают безопасность мультиагентной системы от несанкционированного доступа к данным и позволяют ей сохраняться при внешних и внутренних отрицательных воздействиях.

Мультиагентные системы создают конкурентную среду, которая может использовать различные варианты реализации интеллекта с точки зрения их эффективности [1]. Для такой среды требуется обмен информацией, и информация должна быть одинаково понимаемой и интерпретируемой участниками системы независимо от их индивидуальных потенций, отличий и возможных «конфликтов интересов».

Но для этого необходимо проектировать и создавать алгоритм достижения согласованности в интерпретации тех или иных фактов в мультиагентной среде, где нет доверия между ее участниками. Технологии блокчейна как раз и предоставляют такие алгоритмы и такой механизм обмена информацией между конкурирующими искусственными интеллектами в одной или различных средах.

Когда мы говорим о цифровизации экономики, то наряду с автоматизацией систем управления и производства, интернетом вещей и другими технологиями с использованием больших данных мы также имеем в виду «связку» блокчейн-технологий и искусственного интеллекта. Пока уровень этой интеграции по сравнению с другими технологиями очень невысок (рис. 1).

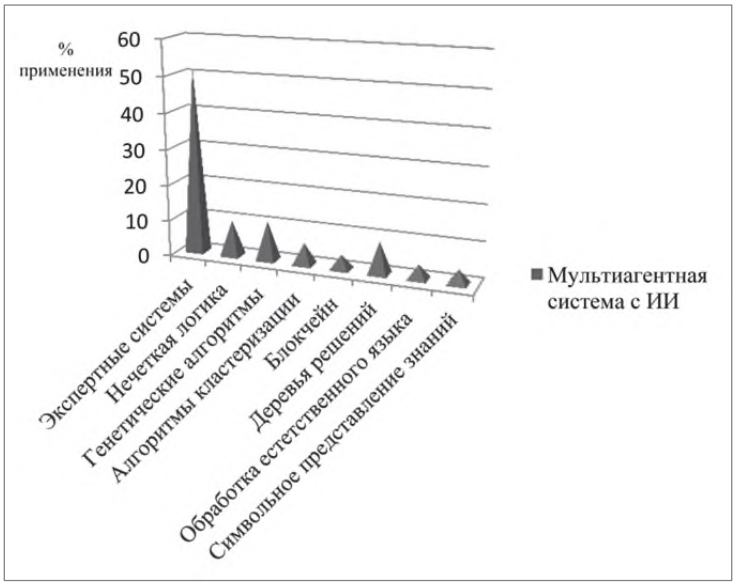


Рис. 1. Диаграмма применения технологий и знаний
в мультиагентных системах с искусственным интеллектом

Тем не менее в свете экономики будущего блокчейн все шире находит самое разнообразное применение в отечественных компаниях и показал себя как устойчивая технология, решающая большой спектр задач. Особенно в различных областях логистики: внедрение смарт-контрактов, контроль цепочек поставок, оптимизация документооборота, проведения платежей, а также токенизации традиционных финансовых инструментов.

С практической точки зрения внедрение технологий блокчейна дают для компаний массу преимуществ, а именно: отсутствие бумажного документооборота (т. е. снижение затрат на производство, хранение транспортировку и передачу документов), существенное уменьшение временных затрат для принятия управленческих решений (от нескольких часов до секунд), снижение трудовых затрат (меньше сотрудников — меньше работы с контрагентами и внутри компаний), сокращение издержек на судебные и рекламационные документы за счет обеспечения полной прозрачности и контроля выполнения контрактов. По оценкам исследовательской группы Mindsmith (резидент Фонда Сколково), это дает до 30% снижения издержек ежегодно, скорость бизнес-процессов во многих индустриях возросла на два-три порядка, а снижение накопления невостребованных запасов материально-технических ресурсов достигла 80%. Скорость создания контракта составляет в среднем 15 минут против, как минимум, 24 часов, необходимых для подготовки документов, не считая необходимости личного присутствия и возможных очередей. Технология будет дальше проникать на рынок, где требуется сложное и децентрализованное взаимодействие между разными участниками (рис. 2).

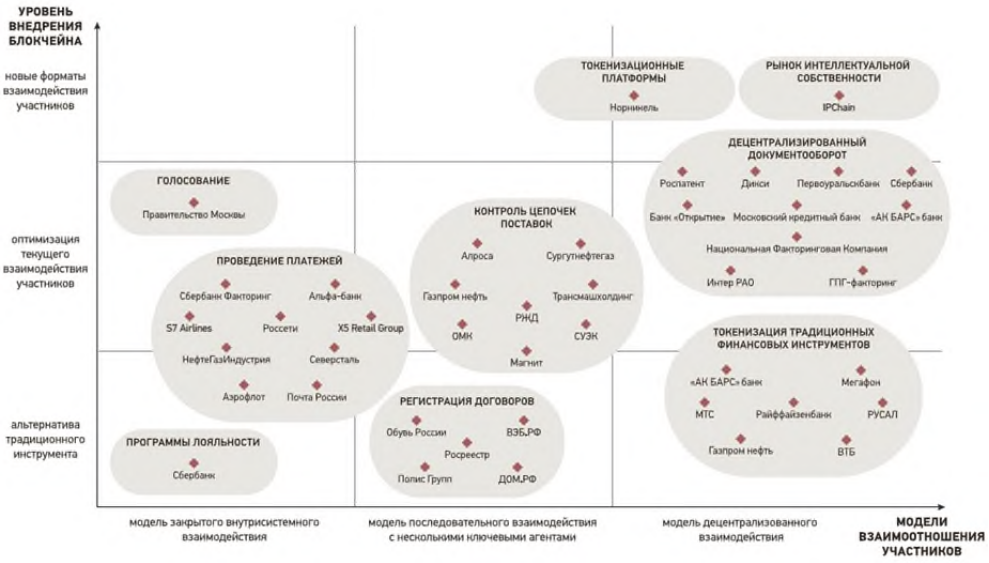


Рис. 2. Модели и уровни внедрения блокчейна в России

В первую очередь — это рынок интеллектуальной собственности, где блокчейн-инфраструктура позволяет прозрачно и в реальном времени взаимодействовать авторам, корпорациям, органам власти и инвесторам как в части охраны и защиты прав каждого из участников, так и в совершении сделок с каждым из них.

Во вторую очередь — рынок распределенных ресурсов (токенизированные платформы). Это, например, системы, требующие множества небезопасных подключений недоверенных контрагентов, работающих с публично проверяемой информацией: поставки критически важных деталей и компонентов для высокотехнологического производства (энергетического, авиационного, судостроительного, IT и т. п.), платформы для проведения публичных тендеров и аукционов, выпуск временных электронных разрешений (допуск к объектам, пропуска на грузы, накладные на вывоз-ввоз и т. п.).

Технология блокчейна позволит решить все вышеперечисленные проблемы с данными [2]. Благодаря криптографическим техникам и многочисленным отметкам, присваиваемым данным, которые нельзя подделать, записанная в блокчейн информация будет надежной и легко проверяемой. При этом даже если в определенный момент в систему начнет поступать недостоверная информация, ее будет куда проще отследить, чем сейчас, и понять, на каком именно этапе произошла ошибка и на какие данные в текущей базе она влияет. Ошибку можно будет быстро устранить, а искаженные данные не включать в модель, которую будет строить ИИ. Общая точность моделей искусственного интеллекта благодаря правильности и надежности данных повысится и позволит вырабатывать качественные управленческие решения (рис. 3).

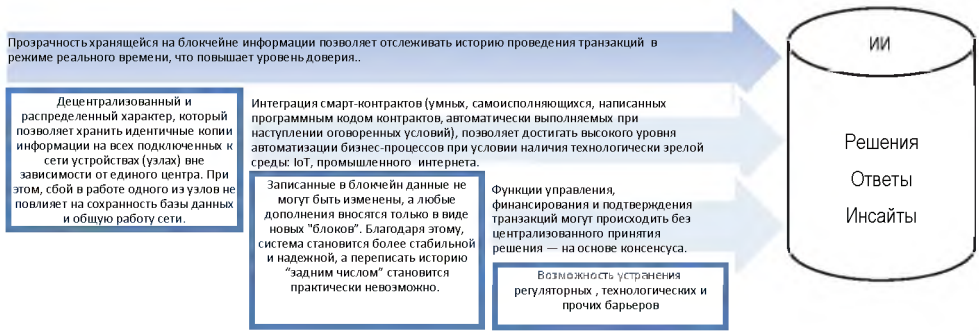


Рис. 3. Интеграция блокчейна и искусственного интеллекта

Однако интеграция блокчейна и ИИ в единую систему энергозатратна, потребует обработки огромных информационных потоков и глобального потребления вычислительных мощностей [3]. Возникает необходимость не только более эффективно обрабатывать вычисления, но и развивать как аппаратное, так и программное обеспечение, чтобы удовлетворить интеграцион-

ные потребности. Это подводит нас к важному моменту: существует явная необходимость перейти от традиционных чипов блокчейна к низкоэнергетическим, масштабируемым и устойчивым нейроморфным чипам [4]. Вычисления с помощью таких чипов могут решить проблему большой вычислительной мощности, выполняя всю обработку и функционирование в самих микросхемах, а не отправляя сообщения назад и вперед с более мощным сервером (облаком), и, будучи управляемыми событиями и работающими только при необходимости, они будут имитировать работу человеческого мозга. Однако пока основная масса разработок были посвящены только программному обеспечению, а не аппаратному обеспечению. Поэтому нейроморфные вычисления и микросхемы вносят столь необходимую эволюцию в компьютерное оборудование, позволяя нам не только расширять возможности ИИ для ликвидации сложных проблем, которые требуется решить для будущего человечества, но и предоставлять нам масштабируемую и устойчивую модель (будущего).

В качестве заключения необходимо отметить, что, несмотря на преимущества блокчейна и ИИ, существует ряд препятствий для повсеместного внедрения технологии. Одно из таких препятствий — нормативные и правовые барьеры. В России еще не разработали специального законодательства для регулирования процессов, которые были бы изменены с использованием технологии блокчейна. Другим существенным вызовом остается негативное и осторожное отношение к блокчейн-индустрии после взломов криптовалютных кошельков и утечек личных данных, а также мошеннической активности, связанной с ICO и криптобиржами. По мере эволюционного (или революционного) развития блокчейна в различных видах индустрии его внедряемость и интеграция совместно с другими видами человеческой деятельности, а особенно с разработками в области искусственного интеллекта, будет только увеличиваться. Для этого необходимы зрелость самих технологий и готовность участников рынка к ее внедрению, что включает в себя изучение бизнес-модели внутри каждого типа блокчейн-проектов, их технологическую архитектуру и возможные ограничения [4]. Интеграция блокчейна и ИИ не сможет применяться в реальном и виртуальном мире без достижения достаточного уровня сотрудничества между образовательными и научными сообществами, операторами систем и государственными органами, и к достижению такого уровня обществу следует каждодневно стремиться.

Список литературы

1. URL: http://forklog.com›…tehnologii…iskusstvennogo-intellekta…

2. URL: http://chainmedia.ru›articles/blockchain-and-ai/

3. *Мухитов Э.И.* Измерение информационной мощности сетевой структуры технического обеспечения флота // Морской сборник. 2019. №8. С. 35—38.

4. URL: http://novator.io›…iskusstvennogo-intellekta-s…blokcheyna Peter O'Donovan, and Dominic TJ O'Sullivan. «A Systematic Analysis of Real-World Energy Blockchain Initiatives.» Future Internet 11.8 (2019): 174.

С. Б. Румовская
Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН, Калининград, Россия
e-mail: sophiyabr@gmail.com

СПЛОЧЕННОСТЬ В МАЛОМ КОЛЛЕКТИВЕ ЭКСПЕРТОВ, РЕШАЮЩИХ ПРОБЛЕМЫ: ПОНЯТИЕ, ОСОБЕННОСТИ, МОДЕЛИ

Введение

Проблемы, возникающие в практике принятия решений, характеризуются неоднородностью, недоопределенностью, неточностью, нечеткостью, слабой формализацией, субъективностью, динамичностью, сетевым характером условий и целей [1]. Для преодоления данных особенностей создаются группы экспертов под руководством лица, принимающего решения (ЛПР), успех работы которых во многом зависит от способности лидера создать из малой группы коллектив. Вопросы интеграции знаний и рассуждений малой группы экспертов под руководством ЛПР исследованы в рамках гибридных интеллектуальных многоагентных систем (ГиИМАС) [2]. Однако из поля зрения их разработчиков выпадал существенный аспект — формирование сплоченного коллектива агентов, которое особенно актуально при создании агентов различными автономными коллективами разработчиков.

Цель исследования — новый класс интеллектуальных информационных систем — сплоченные ГиИМАС (СГИМАС). Моделирование групповой сплоченности (ГС) коллектива экспертов с использованием ГиИМАС позволит обеспечить учет проблемной и инструментальной неоднородности, улучшить эффективность коллективной работы по конструированию решений, повысить релевантность ГиИМАС коллективам экспертов, решающих проблемы «за круглым столом», а также ускорить и упростить восприятие пользователями состояний и процессов системы за счет применения средств когнитивной графики и визуального мышления.

В рамках данного исследования будем рассматривать «малый коллектив» (не более десяти человек) [3] как элементарное звено структуры социальных отношений, обретающее через межличностные контакты структурные, динамические, феноменологические характеристики, отражающие признаки группы как целостной системы социальных и психологических отношений. Малый коллектив экспертов при этом относим к группам по решению проблем (М. Аргайл [4]) — модель коммуникативных малых коллективов, задача которых принимать эффективные решения, а их участники должны владеть навыками организации информационного обмена, достижения внутригруппового согласия и т. п.

В настоящей работе рассмотрено понятие сплоченности в малых коллективах, ее особенности, модели, а также влияние на результаты коллективной работы.

© Румовская С. Б., 2020

1. Сплоченность: понятие, особенности

Сплоченность группы — сложный феномен. Можно выделить три направления понимания сплоченности.

В рамках первого направления приоритет отдается эмоциональным элементам межличностных отношений (эмоционально-психологической привлекательности членов малых групп, группы в целом и задаче). Здесь рассматривают сплоченность как взаимную привлекательность членов группы (Я. Морено, Л. Фестингер, Г. Хоманс, А. Лотт и др.) и/или привлекательность группы для ее членов (Е. Бовард, Дж. Джексон, П. Саги, С. Шахтер и др.).

В первом случае сплоченность — сугубо эмоциональный феномен, так как ее содержание составляют межличностные симпатии и вытекающая из них аттракция. Например, у Я. Морено (социометрическая теория) [5] в основе сплоченности группы лежат структурные составляющие социального атома — «теле», которое описывает самое простое эмоциональное единство между двумя индивидами, процесс, лежащий в основе притяжений и отталкиваний между индивидами.

«Теле» имеет два компонента: проективный, т. е. исходящий от индивида, и «ретроективный», т. е. возвращающийся к нему. «Теле» побуждает индивидов создавать позитивные или негативные отношения. Преобладание первого типа отношений будет определять более высокую сплоченность группы. Для измерения сплоченности использовался социометрический тест или специально разработанные шкалы.

А. Л. Журавлев в [6] отмечает, что сплоченность применяется для обозначения социальных характеристик малой группы: степень психологической общности, единство малой группы, теснота межличностных взаимоотношений, степень эмоциональной привлекательности группы для ее членов.

В теории деятельностного опосредствования межличностных отношений (ДОМО) признается эмоционально-межличностная природа сплоченности, но с некоторыми ограничениями [7]: предлагается рассматривать сплоченность с точки зрения иерархизации групповых процессов, которая происходит в процессе освоения членами группы целей и содержания совместной деятельности.

В диффузной группе, не имеющей иерархически структурированных процессов, доминируют относительно непосредственные эмоциональные отношения, а значит, в ней имеет место только социоэмоциональная сплоченность. В группе высокого уровня развития существует иерархизация процессов и более важное значение приобретает сплоченность на уровне межличностных отношений, опосредованных совместной деятельностью и/или нормами, ценностями группы. За рубежом такая сплоченность называется инструментальной.

Одновременно в отечественной литературе критикуется понимание групповой сплоченности сквозь призму эмоционального компонента внутригрупповых отношений [8], ввиду игнорирования при таком подходе целей и содержания совместной деятельности, норм и ценностей группы.

В случае рассмотрения сплоченности с позиции социальной аттракции симпатия к другим членам группы основана на их принадлежности к группе и на том, что они воплощают или представляют ее основные черты [9]. Индивидуальные характеристики не играют определяющей роли. Индивиды когнитивно представляют группы и их членов в терминах прототипов — размытого множества взаимосвязанных атрибутов, которые одновременно фиксируют подобия и структурные отношения внутри групп и различия между группами и предписывают обусловленное групповым членством поведение.

При постановке на первый план групповой аттракции внимание фокусируется на привлекательности для индивидов группы в целом (теория взаимозависимости Г. Келли и Д. Тибо [10]; модель групповой сплоченности Д. Картрайта).

Например, Д. Картрайт [11] понимал сплоченность как результат действия определенных сил, побуждающих индивидов к сохранению членства в группе. Совокупность этих сил представлена следующим набором переменных: 1) мотивационная основа привлекательности группы, включающая в себя совокупность потребностей и ценностей индивида (потребность в безопасности, признание и пр.); 2) соответствующие мотивационной основе побудительные свойства группы, отраженные в ее целях, программах, способе действий, престиже и других признаках; 3) ожидание индивидом благоприятных (отрицательных) последствий от членства в группе; 4) индивидуальный уровень сравнения (эталон), с помощью которого индивид оценивает «привлекательность» отношений, последствия его пребывания в разных социальных группах. Яркий минус подхода Д. Картрайта — невозможность операционализации модели и ее излишний эмпиризм ввиду обращения к мотивационной основе групповой сплоченности (на уровне индивидов).

В рамках второго направления акцент делается на изучении когнитивных аспектов внутригрупповой активности — анализ социальной перцепции членов группы в межиндивидных связях (теория социального сравнения Д. Фестингера [12], воззрения Т. Ньюкома [13] и теория ДОМО [14]) и в индивидно-групповых связях (теория социальной идентичности (Г. Тэджфел и Д. Тернер) [15] и теория самокатегоризации (Д. Тернер и др.) [16]).

В первом случае за основу берут согласованность/сходство мнений, представлений, ценностных ориентаций, интересов членов группы — чем выше мера подобного сходства, тем выше уровень групповой сплоченности. Здесь методы исследования всегда включают оценку предлагаемых объектов посредством фиксированного числа признаков, которые оцениваются в баллах, ранжируются или выбираются по заданной инструкции.

Согласно теории социального сравнения люди имеют потребность в оценке своих суждений и способностей, т. е. в самооценке. ГС определяется сходством членов группы, устанавливаемым на основе процессов межличностного социального сравнения — чем большее количество людей оценивают себя как сходных с большим количеством других членов группы, тем выше будет ГС.

Т. Ньюком использует понятие «согласие» — существование между двумя или более индивидами сходных ориентации по отношению к каким-то значимым для них ценностям. Фактически акцент делается на эмоционально-межличностных условиях проявления сходства в ориентациях. Однако не всегда высокий уровень согласия свидетельствует о высокой сплоченности группы, так как сходство установок как таковое служит основой притяжения лишь для некоторых типов отношений, тогда как для других взаимопривлекательность характерна при дополнении ценностей, установок (по принципу взаимодополнения противоположностей).

Вернемся к теории ДОМО [7]. А.В. Петровский и его коллеги (стратометрический подход) выделили такой феномен, как ценностно-ориентационное единство (ЦОЕ) и рассматривали как аспект ГС — сходство мнений, позиций членов группы по отношению к объектам наиболее значимым для группы в целом. С одной стороны, схож с идеей Т. Ньюкома. Однако есть существенные отличия (в том числе и от других авторов): 1) ЦОЕ не предполагает совпадение оценок и позиций членов группы во всех отношениях. ЦОЕ в коллективе — это сближение оценок в подходе к целям и задачам совместной деятельности; 2) сплоченность понимается как иерархически организованная система интегративных процессов, которые не являются чем-то искусственно привнесенным в группу, а представляют собой порождение и отражение устойчивого воспроизводства структуры внутригрупповой активности. В рамках теории ДОМО разработан ряд процедур оценки ЦОЕ.

Согласно теории социальной идентичности ГС будет тем выше, чем больше людей станет осознавать свою принадлежность к группе, с одной стороны, и чем больше людей будет высоко оценивать позитивность своего членства в этой группе, с другой стороны.

В теории самокатегоризации ГС, как и некоторые другие феномены, объясняется через принцип метаконтраста, который является центральным в этой теории. Принцип метаконтраста (Д. Тернер) заключается в том, что вероятность категоризации группы стимулов как «единой сущности» зависит от того, насколько меньше эти стимулы отличаются друг от друга (по релевантным параметрам), чем от других стимулов. При образовании категорий непременно должно быть выполнено одно требование: различия между разными категориями должны быть больше различий внутри одной какой-либо категории. ГС будет тем выше, чем меньше будет субъективно воспринимаемая разница между ее членами и больше разница между ними и представителями других групп.

Третье направление — рассматривается символико-интерпретативная активность индивидов [17]. В рамках данного направления исследуется: как члены группы используют символ (слова, объекты или действия, которые замещают или представляют что-то иное); как действует использование символа на индивидуальные и коллективные процессы и результаты; каким образом группа и групповая динамика являются продуктом символической активности. Здесь ГС — это продукт символической активности взаимодействую-

щих индивидов (в том случае, если ее члены усваивают, разделяют и используют единые символы/символические действия). Интеграция символов и создание единого символического пространства — основное условие сплоченности группы с позиции рассматриваемой перспективы.

Отдельно необходимо выделить *подход А. В. Сидоренкова* — социально-психологическую концепцию малой группы, которая вбирает воззрения первых двух направлений [18] (подробнее см. ниже).

Все рассмотренные выше подходы в различной степени вносят вклад в формирование природы конструкта «сплоченность малой группы» — это сложный и многоплановый феномен.

2. Модели сплоченности

В работе [19] представлены все модели сплоченности, описанные в различных источниках. Рассмотрим их кратко.

Четырехфакторная модель (*В. Видмеер, Л. Брэули и А. Кэррон — многомерная модель сплоченности спортивной команды* [*20*]*, 1980-е гг.*). Здесь выделяются два измерения сплоченности: GI — групповая интеграция (индивидуальные представления о сплоченности группы, сходстве членов, целостности, степени единства группового пространства) и ATG — индивидуальная привлекательность группы (мотивация оставаться в группе и персональные отношения к группе); T — инструментальное основание (стремление достигать организационных целей; коллективные действия, стремления и потребности) и S — социальное основание (мотивация к развитию и поддержанию социо-эмоциональных отношений в группе).

Сочетание этих измерений задает четырехфакторную модель сплоченности: инструментальная групповая интеграция (GI-T); социальная групповая интеграция (GI-S); индивидуальная привлекательность групповой инструментальности (ATG-T); индивидуальная привлекательность групповой социальности (ATG-S).

Однако мера представленности каждого из четырех аспектов сплоченности разная для разных групп или для одной и той же группы на разных этапах ее существования. Одновременно многоплановость сплоченности не позволяла разработать релевантный действительности измерительный метод Их Опросник групповой среды (Group Environment Questionnaire, GEQ) подходит для спортивных команд.

Трехфакторная модель. В конце 1990-х гг. С. А. Карлесс и К. Д. Паола адаптировали GEQ для рабочих групп и проверили четырехфакторную модель сплоченности в исследовании групп служащих государственных учреждений [21]. Полученные результаты опровергли первую модель и привели к выделению трехфакторной модели: инструментальная сплоченность; социальная сплоченность; индивидуальная аттракция группы. Здесь конструкт индивидуальная аттракция может быть соотнесен с идеей об аттрактивной природе групповой сплоченности, поэтому должен быть отнесен, скорее,

к источникам сплоченности, тогда как инструментальная и социальная сплоченность — к различным аспектам данного феномена, что свидетельствует о необходимости перехода к двухфакторной модели.

*Двухфакторная (отечественная) и двухмерная модель (зарубежная).*В начале 1990-х гг. К. Боллен и Р. Хоул предложили двухмерную модель групповой сплоченности, а точнее, восприятия сплоченности [22] — индивидуальное чувство принадлежности к группе и ощущение моральной связанности с членами в группе. Чувство принадлежности — это социокогнитивный аспект сплоченности, который сильно связан с социальными результатами. Чувство морали — аффективный аспект сплоченности, более сильно связанный с личностными результатами. Была разработана Шкала восприятия сплоченности (Perceived Cohesion Scale, PCS).

Согласно отечественной теории ДОМО, в процессе освоения группой совместной деятельности происходит иерархизация групповых процессов по отношению к целям и содержанию этой деятельности. ГС рассматривается на двух стратах: межличностных отношений, опосредованных содержанием совместной деятельности и принятыми в группе нормами и ценностями (сплоченность в виде ЦОЕ и предметно-ценностного единства, которое выступает в качестве модификации ЦОЕ на уровне групповых «ядерных» процессов, выражается в акте опосредствования индивидуальных деятельностей единым ценностным содержанием предмета совместной деятельности); относительно непосредственных межличностных отношениях (личностно-аттрактивная природа сплоченности).

Есть еще две «глубинные» страты: «ядерная и непсихологическая» (содержание и социальная характеристика совместной деятельности) и «отношение каждого члена группы к групповой деятельности, ее целям, мотивация деятельности, ее социальный смысл для каждого человека».

Экспериментальное исследование сплоченности на уровне межличностных отношений, опосредованных совместной деятельностью, проводилось по нескольким направлениям: 1) выявлялся круг ценностей, единство которых особенно значимо для группы в условиях различного типа деятельности; 2) выявление корреляции между сплоченностью (ЦОЕ) и другими параметрами группы — ее работоспособностью, организованностью и т. д.; 3) изучение ядерного слоя групповой активности, в частности, каким образом в практической деятельности конкретных групп проявляется совпадение ценностных ориентаций, касающихся совместной групповой деятельности.

Микрогрупповая модель (социально-психологическая концепция малой группы А.В. Сидоренкова, эмпирически проверена А.Л. Мондрус [*19*]*).* А. В. Сидоренков [18] выделил два вида ГС: предметно-деятельностная (ПДС) — это восприятие индивидами единства группы относительно выполняемой совместной деятельности; и социально-психологическая (СПС) — восприятие единства группы в межличностной сфере жизнедеятельности. Сплоченность группы основывается на отношениях между подгруппами, а не только на отношениях между отдельными индивидами, индивидами и груп-

пой в целом. Сплоченность проявляется не только по группе в целом, но и в каждой неформальной подгруппе (совокупность членов группы, объединенных на основе психологических более общих и значимых для них признаков на данный момент по сравнению с другими членами группы).

Результаты анализа описанных во втором и третьем разделах подходов к пониманию СП и ее моделей сведены в таблицу.

Анализ отечественного и зарубежного понимания ГС

Подходы к пониманию сплоченности / модели сплоченности	Эмоциональный аспект	Когнитивный аспект	Процедуры оценки сплоченности	Социометрические тесты / шкалы	Возможность моделирования в рамках методологии ГиИМАС
Социометрическая теория Я. Морено [5]	+		+	+	
Теория деятельностного опосредствования межличностных отношений (ДОМО), двухфакторная модель сплоченности [7]	+–	+	+	+	+
СП с позиции социальной аттракции [9]	+				
Теория взаимозависимости Г. Келли и Д. Тибо [10]	+		+		
Модель ГС Д. Картрайта [11]	+		+		
Теория социального сравнения Д. Фестингера [12]		+		+–	+
Воззрения Т. Ньюкома [13]		+		+–	+
Теория социальной идентичности Г. Тэджфела и Д. Тернера [15]		+	+–		+
Теория самокатегоризации (Д. Тернер и др.) [16]		+	+–		+
Символико-интерпретативный подход [17]			+–		
Социально-психологическая концепция малой группы А. В. Сидоренкова, микрогрупповая модель сплоченности [18]	+	+	+	+	+–
Четырехфакторная модель ГС [20]	+	+–	+–	+–	+–
Трехфакторная модель ГС [21]	+–	+–		+–	+–
Двухмерная модель ГС [21]		+–		+–	+–

Обозначения: ГиИМАС — гибридные интеллектуальные многоагентные системы; +– — в рамках соответствующего подхода есть ограничения и/или противоречия по выделенному критерию; ГС — групповая сплоченность.

Модель, предложенную в рамках теории ДОМО, возьмем за основу дальнейших исследований как наиболее проработанную с методической точки зрения, учитывающую все аспекты формирования и функционирования коллектива и реализуемую гибридными интеллектуальными многоагентными

системами (моделирование социально-психологических, эмоциональных аспектов формирования и развития коллективов не развито в искусственном интеллекте).

3. Проявление сплоченности в различных сферах жизнедеятельности и ее влияние на результаты работы коллектива

Чем сплоченней [23] группа, тем жестче групповой контроль над взглядами и поступками ее членов. В сплоченной группе создается атмосфера внимательного отношения и взаимной поддержки. Сплоченность порождает эмоциональную привязанность членов группы и лояльное отношение к общим задачам, обеспечивает группе стабильность. Взаимная зависимость членов группы, объединенных стремлением к общей цели, обусловливает их готовность разделять трудности и сглаживать личностные расхождения. Сплоченность приводит к росту участия каждого члена в жизни группы и к росту адаптации к группе, что способствует снижению тревожности, повышению самооценки и развитию чувства безопасности.

Степень групповой сплоченности показывает уровень развития группы, близость ее к коллективному уровню. А. В. Петровский [7] выделяет несколько уровней развития группы, принимая во внимание критерий сплоченности: диффузная группа (наименее сплоченная), ассоциация (более сплоченная), кооперация (сплоченность на основе личных интересов, эффективное достижение которых возможно при совместных усилиях), корпорация (превалирование личных интересов, примерно одинаково направленных; непременный признак корпорации — внутренняя конкуренция); коллектив (сплоченность на основе совместной деятельности и эмоционально богатого общения).

Минусы чрезмерной сплоченности: нежелание ее членов мыслить критически и принимать серьезные решения вследствие развития группового единомыслия, ввиду склонности членов группы быстро сходиться во мнениях и из-за готовности соглашаться друг с другом, не считаясь с возможностью ошибки. Несмотря на это, сплоченность желательна в группе.

В рамках микрогрупповой теории выделяется предметно-деятельностная сплоченность [19], которая проявляется в сфере индивидуальной и совместной деятельности и представляет собой стремление членов группы объединять усилия, согласованно действовать и содействовать друг другу в процессе деятельности по реализации коллективных целей. ПДС [19] влияет на профессионально-предметную (экономическую и социальную) эффективность институализированной группы и стабильность ее совместной деятельности. К промежуточным факторам связи сплоченности и продуктивности деятельности также можно отнести мотивацию групповой деятельности, сверхнормативную активность, эффект социальной лености.

Однако высокая предметно-деятельностная сплоченность может приводить и к снижению продуктивности групповой работы: 1) при решении творческих задач необходимо разнообразие точек зрения, а высокая сплоченность

может приводить к вредному единомыслию; 2) при направленности группы на решение задач, отличных от заданных руководством, несет вред решению основных задач и взаимодействию группы с руководством. Кроме того, очень высокий уровень ПДС часто приводит к повышению конформности, инертности, консерватизму. Следствием этого также может быть снижение профессионально-предметной эффективности.

Заключение

Аналитический обзор по материалам открытой печати показал разнообразие подходов к определению понятия сплоченности, построению ее модели (преимущественно описательной) и анализа сплоченности коллектива. Используя опыт представлений сплоченности в теории ДОМО [7], будет разработана модель сплоченности в ГиИМАС.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00104 А.

Список литературы

1. *Спиридонов В. Ф.* Психология мышления: решение задач и проблем. М. : Генезис, 2006.

2. *Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б. и др.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М. : ИПИ РАН, 2011.

3. *Румовская С. Б., Кириков И. А.* Методы моделирования и визуального представления конфликта в малом коллективе экспертов, решающих проблемы (обзор) // Информатика и ее применения. 2019. Т. 13, № 3. С. 122—130.

4. *Small* Groups and Social Interaction. Vol. 1 / ed. by H. Blumberg, A. Hare, V. Kent, M. Davies. Chichester : Wiley, 1983.

5. *Морено Я. Л.* Социометрия: экспериментальный метод и наука об обществе. М. : Акад. проект, 2001.

6. *Журавлев А. Л.* Социальная педагогика. М., 2002.

7. *Психологическая* теория коллектива / под ред. А. В. Петровского. М. : Педагогика, 1979.

8. *Донцов А. И.* Проблемы групповой сплоченности. М. : МГУ, 1979.

9. *Кричевский Р. Л., Дубовская Е. М.* Социальная психология малой группы. М. : Аспект Пресс, 2001.

10. *Келли Г., Тибо Д.* Межличностные отношения. Теория взаимозависимости // Современная зарубежная социальная психология. Тексты / под ред. Г. М. Андреевой, Н. Н. Богомоловой, Л. А. Петровской. М. : Изд-во МГУ, 1984. С. 61—81.

11. *Кричевский Р. Л.* Проблема сплоченности малых групп в зарубежной социальной психологии // Вопросы психологии. 1973. № 3. С. 174—184.

12. *Тернер Д.* Социальное влияние. СПб. : Питер, 2003.

13. *Ньюком Т.* Исследование согласия // Социология сегодня. М. : Наука, 1965.

14. *Социальная* психология : учеб. пособ. для студ. пед. институтов / под ред. А. В. Петровского. М. : Просвещение, 1987.

15. *Тэджфел Г.* Эксперименты в вакууме // Современная зарубежная социальная психология. Тексты / под ред. Г.М. Андреевой, Н.Н. Богомоловой, Л.А. Петровской. М. : МГУ, 1984. С. 229—243.

16. *Сушков И.Р.* Социально-психологическая теория Д. Тернера // Психологический журнал. 1993. №3. С. 115—125.

17. *Frey L.R.* The Symbolic-interpretive perspective on group dynamics // Small group research. 2004. Vol. 35, №3. P. 277—306.

18. *Сидоренков А.В.* Микрогрупповая концепция // Российский психологический журнал. 2006. №1. С. 21—40.

19. *Мондрус А.Л.* Социально-психологические особенности сплоченности малой группы и неформальных подгрупп : дис. … канд. психол. наук. Ростов н/Д, 2008.

20. *Carron A.V., Brawley L.R., Widmeyer W.N.* The measurement of cohesiveness in sport groups // Advances in sport and exercise psychology measurement / ed. J.L. Duda. Morgantown, WV: Fitness Inform. Techn., 1998. P. 213—226.

21. *Carless S.A., Paola C.* The Measurement of Cohesion in Work Teams II Small Group Research. 2000. Vol. 31, №1. P. 71—88.

22. *Bollen K.A., Hoyle R.H.*. Perceived cohesion: A conceptual and empirical examination II Social Forces. 1990. Vol. 69, №2. P. 479—504.

23. *Донцов А.И.* Проблемы групповой сплоченности. М. : Изд-во МГУ, 1979.

М.В. Тарачков[1], А.В. Каленик[2]

[1,2]ООО «Интеллектуальная робототехника», Калининград, Россия

e-mail: [1]mishklgpmi@mail.ru, [2]sasharewq@mail.ru

РАЗРАБОТКА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДР-1

Введение

В статье описывается процесс разработки, изготовления и тестирования прототипа робота-манипулятора ДР-1 (дельта-робот №1). Приводится методика расчета элементов конструкции и электроники, блок-схемы упрощенной системы управления и возможности ее усовершенствования.

Кинематическая схема дельта-манипуляторов позволяет им быстро выполнять манипуляционные действия в ограниченном пространстве [1]. Рассматриваются задачи, которые могут быть решены дельта-манипулятором, в особенности задачи, выполняемые над конвейерной линией. Приводится оценка эффективности разработки.

1. Постановка задачи для разработки робота-манипулятора

Процесс разработки робота-манипулятора во многом обусловливается той задачей, которую ему предстоит решить. Перед авторами статьи была поставлена задача трамбовки наггетсов (рис. 1), перемещающихся в коробках

© Тарачков М.В., Каленик А.В., 2020

по конвейерной ленте. Трамбовка необходима для того, чтобы на этапе упаковки коробку с наггетсами можно было закрыть. В настоящее время на производственной линии эту задачу решают люди. Работа тяжелая, монотонная и проводится в холодном цеху. Кроме того, на пищевом производстве существует ужесточенный санитарный контроль.

Рис. 1. Процесс трамбовки наггетсов на производственной линии

Отметим, что уже предприняты попытки автоматизировать данный процесс, но эффективность примененные методы не показали. За одну минуту по конвейерной линии перемещаются около 70 коробок с наггетсами. Ввиду высокой скорости работы после оценки существующих кинематических схем промышленных роботов была выбрана дельта-кинематика как наиболее быстродействующая. Поскольку роботу-манипулятору необходимо помимо собственного веса поднимать рабочий орган (вибрационную машинку), а также оказывать воздействие на замороженные наггетсы, грузоподъемность была выбрана равной 2 кг. Для задачи трамбовки наггетсов точность позиционирования не менее 1 см может быть приемлемой. Работа осуществляется в цеху, в котором будут находиться люди, поэтому уровень шума не должен превышать 50 дБ.

Климатическое исполнение робота-манипулятора — УХЛ-2, класс защищенности — IP54. Поскольку на производстве может проходить мойка оборудования, случайно попавшие капли на робота не должны нанести ему вред.

Роботу-манипулятору необходимо находиться над конвейерной линией, поэтому в качестве крепления для него была выбрана сборная рама. Она позволяет разместить конвейер под роботом, а также обеспечить доступ к роботу-манипулятору со всех сторон.

Щит управления роботом-манипулятором не закреплен на раме, может быть расположен вблизи рамы в зависимости от того, как собрана конвейерная линия. Провода прокладываются в кабель-канале. Такое решение позволяет сделать робота-манипулятора более конфигурируемым и универсальным.

2. Разработка конструкции робота-манипулятора

Прежде всего был проведен анализ существующих на рынке конструкций дельта-роботов. Установлено, что лишь небольшое их количество поставляется со встроенной системой технического зрения. А наличие камер технического зрения и алгоритмов обработки визуальной информации дает возможность роботу не использовать дополнительные датчики и упрощает пускона-

ладочные работы на объекте. Кроме того, после анализа возможных задач для разрабатываемого робота-манипулятора выяснено, что его можно использовать для задач сортировки и упаковки, поэтому рационально разрабатывать робота со сменным рабочим органом. Описанные выше особенности являются конкурентными преимуществами и особенностями данной разработки.

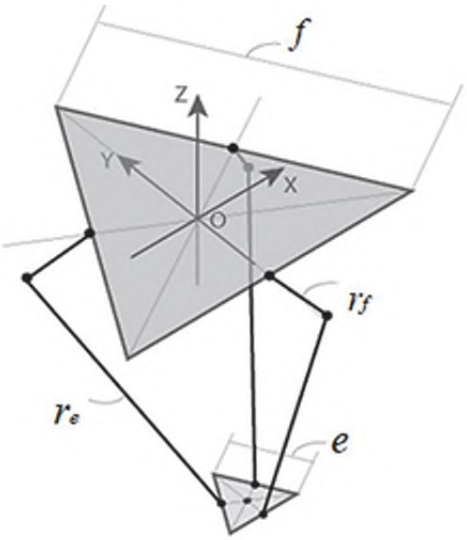
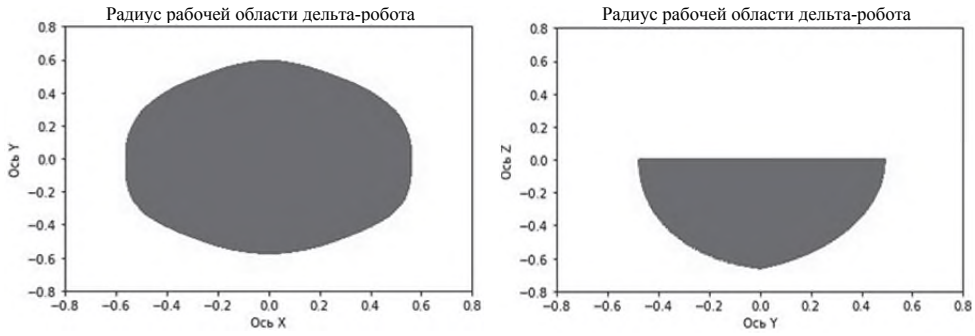


Рис. 2. Геометрический чертеж дельта-манипулятора, используемый в построении математической модели

Для определения размеров конструкции робота-манипулятора была построена его математическая модель, в которой использовались длина верхней платформы f, нижней – e, длина рычага r_f, длина штанги r_e. Геометрический чертеж параметров, участвующих в математической модели, приведен на рисунке 2 [2]. Решив задачу обратной кинематики [3] для всех возможных углов поворота электродвигателей, можно получить рабочую область, т.е. точки пространства, в которые может быть перемещен рабочий орган.



а *б*

Рис. 3. Рассчитанная рабочая область дельта-манипулятора

На рисунке 3, *б* область обрезана сверху, это связано с тем, что в расчетах не учитывались элементы сборной рамы, и из-за них рабочий орган не сможет достичь этих точек.

Размеры штанг и рычагов робота-манипулятора подобраны таким образом, чтобы рабочая область соответствовала размерам, приведенным на ри-

сунке 3, *а*, *б*. Это связано с высотой расположения конвейера и сборной рамы, с шириной конвейера 30 см и необходимостью перемещать объекты с конвейера в располагающуюся рядом коробку.

Проведен анализ прочности элементов конструкции робота-манипулятора в программе SolidWorks [4]. Особое внимание уделялось расчету шаровых опор. Расчет прочности позволит облегчить элементы конструкции (рис. 4).

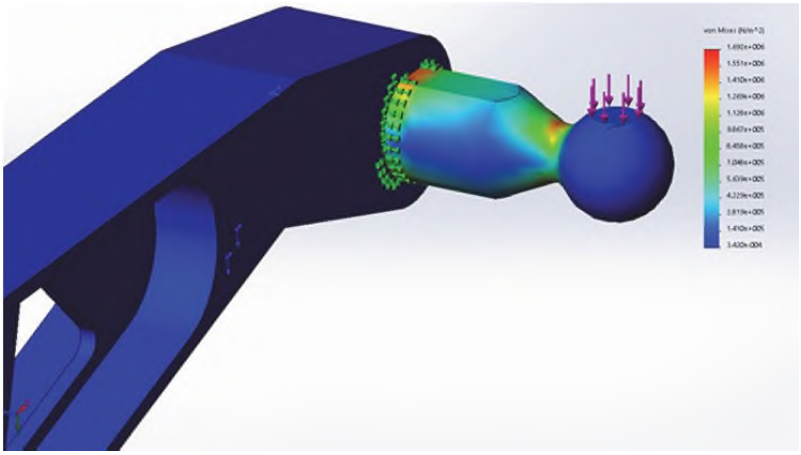


Рис. 4. Окно с результатами прочностного анализа в программе Solidworks

Узнав количественные характеристики элементов конструкции робота-манипулятора, стало возможным рассчитать необходимую грузоподъемность электродвигателей. Подходящими оказались электродвигатели СПШ-34100 [5], так как они обладали необходимыми характеристиками и содержали встроенные блоки управления (рис. 5).

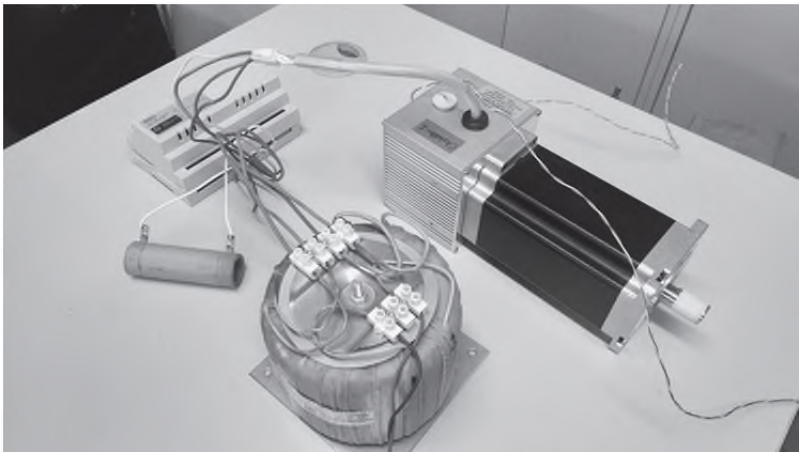


Рис. 5. Электродвигатель СПШ-34100, блок питания и питающий трансформатор

После того как стали известны все параметры робота-манипулятора, спроектирована сборная рама. Она создавалась с запасом прочности, потому что элементы робота-манипулятора могли быть заменены в процессе испытаний, и разборной, чтобы всю конструкцию можно было перевозить в микроавтобусе.

3. Разработка электроники робота-манипулятора

Управление роботом-манипулятором осуществляется со встроенного в щит управления компьютера, так как необходимо обрабатывать данные от системы технического зрения. Компьютер через интерфейс Ethernet отдает команды микроконтроллеру, который, в свою очередь, по интерфейсу CAN взаимодействует с блоками управления электродвигателями робота-манипулятора. Также предусматривается наличие интерфейса RS-485, дискретных входов и выходов для взаимодействия с существующим на производстве оборудованием (рис. 6).

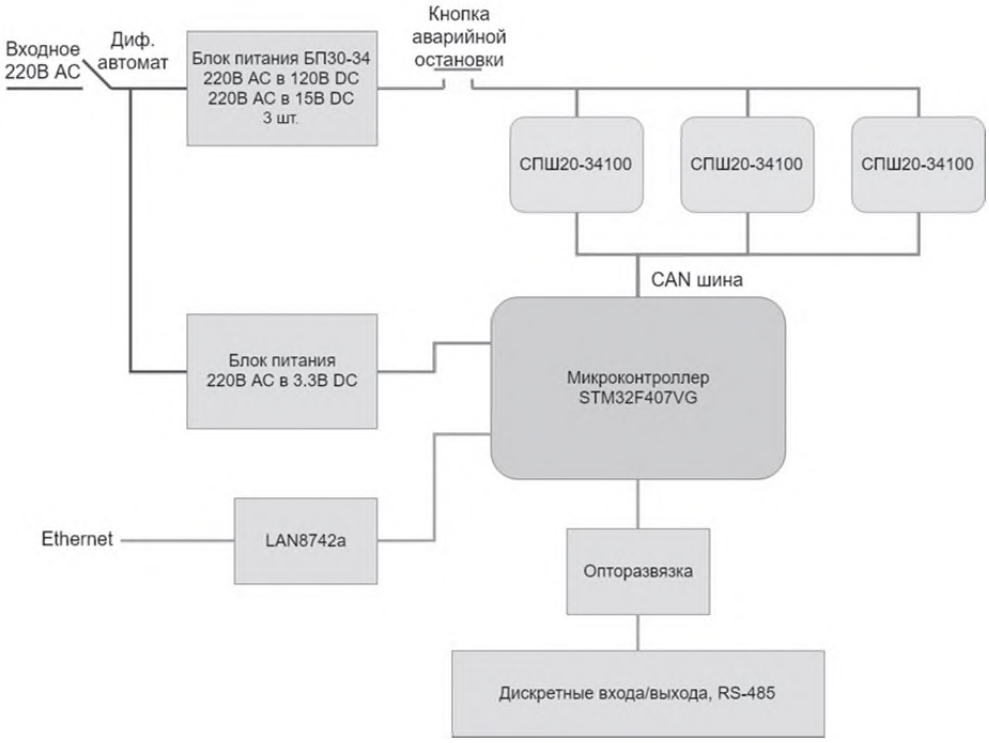


Рис. 6. Электрическая схема управления роботом-манипулятором

Предусматривается наличие защитной автоматики, кнопок «Пуск», «Стоп» и «Аварийная остановка».

4. Изготовление элементов робота-манипулятора, входной контроль, сборка конструкции и щита управления

Для изготовления деталей конструкции робота использовались фрезерный и токарный станок с ЧПУ. После изготовления детали проверялись на соответствие чертежам. Также были испытаны электродвигатели на соответствие заявленным производителям параметрам.

В первую очередь была собрана и окрашена рама. Затем на нее закреплена верхняя плита дельта-робота, опоры двигателей, двигатели, рычаги и штанги на шаровых опорах. Общий вид собранного робота-манипулятора приведен на рисунках 7, 8.

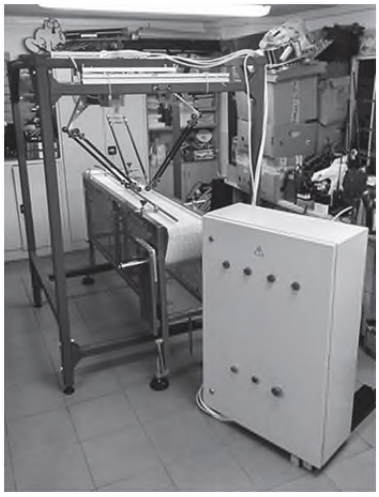


Рис. 7. Общий вид собранного робота-манипулятора и щита управления

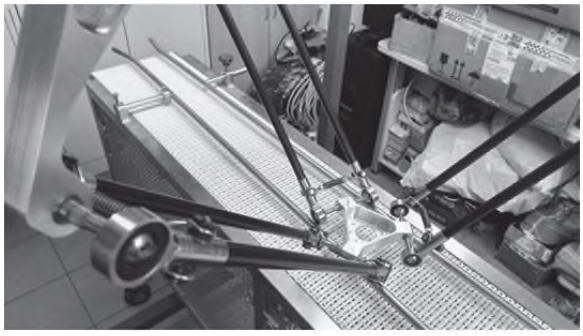


Рис. 8. Штанги и нижняя плита робота-манипулятора

На рисунке 9 — щит управления без установленного внутрь него компьютера и контроллера. На нижней платформе робота-манипулятора закреплен рабочий орган для трамбовки наггетсов (рис. 10).

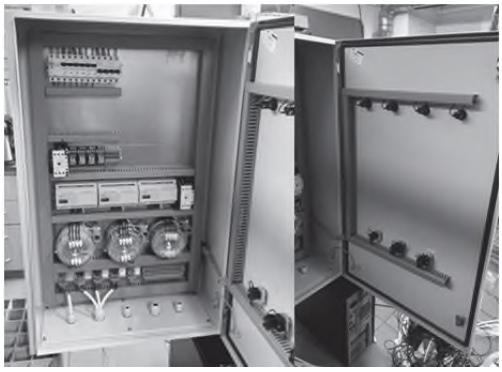


Рис. 9. Щит управления роботом-манипулятором

Рис. 10. Закрепленный на нижней плите рабочий орган для трамбовки наггетсов

5. Упрощенная система управления

Для проверки характеристик собранного робота-манипулятора была реализована упрощенная система управления, которая состояла из программы для микроконтроллера, принимавшей команды по TCP-соединению от компьютера и передавала их по CAN-шине на блоки управления электродвигателями. На компьютере реализована программа, позволяющая задавать углы поворота для каждого двигателя.

6. Проведение испытаний

С использованием упрощенной системы управления робот-манипулятор был проверен на соответствие характеристикам, описанным в пункте 2 данной статьи: измерены грузоподъемность, уровень шума, точность позиционирования рабочего органа (рис. 11).

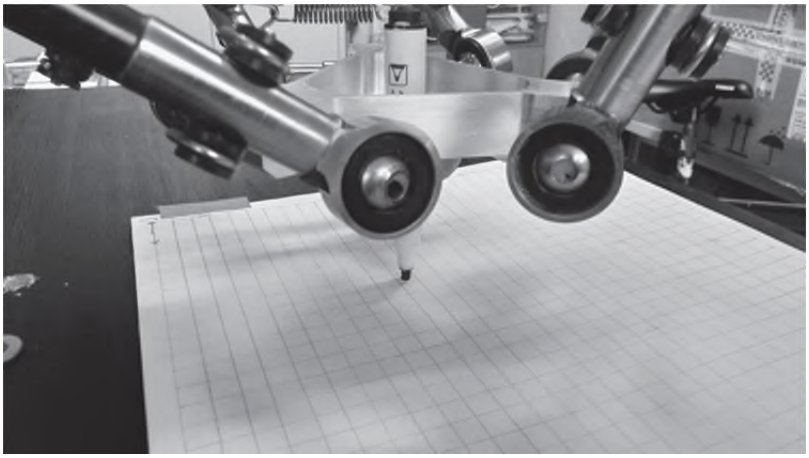


Рис. 11. Проверка точности позиционирования рабочего органа

Климатическое исполнение робота-манипулятора подтверждается документами комплектующих, из которых он собран. Рабочий ресурс рассчитывается также из подтверждающих документов, а для деталей, которые изготовлены собственноручно, проведены испытания на ресурс, например для шаровых опор и постелей для них.

7. Планируемые усовершенствования

В первую очередь речь идет о применении камер технического зрения для позиционирования рабочего органа робота-манипулятора. Ведется работа над применением и отладкой работы алгоритма построения карты глубины и облака точек [6]. Эти данные (фотографии и облако точек) будут использованы нейронной сетью для определения положения объектов [7] на конвейерной линии.

Второе усовершенствование — применение ROS (Robot operating system) [8] для задачи управления роботом. Это распределенная платформа для ОС Linux, которая позволяет объединить разнородные программы посредством обмена сообщений. ROS — свободно распространяемое ПО, обладает большим сообществом разработчиков.

Заключение

В ходе работ по разработке робота-манипулятора был спроектирован, изготовлен, собран и протестирован прототип ДР-1. Робот обладает заявленными характеристиками и после проведения усовершенствований в виде добавления системы технического зрения готов к натурным испытаниям.

Была налажена кооперация между малыми производственными предприятиями в Калининграде, Москве и Санкт-Петербурге.

Рассматриваются варианты использования данного робота-манипулятора для решения задач сортировки и упаковки на конвейерной линии, для этого необходимо заменить вибрационную машинку на захватывающее устройство.

Список литературы

1. *Zsombor-Murray P. J.* Descriptive Geometric Kinematic Analysis of Clavel's «Delta» Robot. McGill University, Department of Mechanical Engineering, 2004.

2. *Хабрахабр.* Кинематика дельта-робота. URL: https://habr.com/ru/post/390281/

3. *Робокрафт*. Кинематика: прямая и обратная задачи. URL: http://robocraft.ru/blog/mechanics/756.html

4. *Solidworks* simulation. Статический анализ детали (напряжения). URL: https://cadregion.ru/solidworks-simulation/staticheskij-analiz-detali-napryazheniya.html

5. *Сервотехника*. Электродвигатели СПШ34-100. URL: http://servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=18

6. *OpenCV* documentation. URL: https://docs.opencv.org/3.4.0/

7. *Soroush* Seifi, Tinne Tuytelaars. How to improve CNN-based 6-DoF camera pose estimation. URL: https://arxiv.org/pdf/1909.10312v2.pdf

8. ОС ROS. URL: https://www.ros.org/

А.Я. Фридман[1], Б.А. Кулик[2]

[1]Институт информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Россия
[2]Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: [1]fridman@iimm.ru, [2]ba-kulik@yandex.ru.

КОГНИТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ В СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Введение

Начало развития сетецентрического подхода связано с военными приложениями [1], поскольку динамичность развития боя не позволяет решать все

© Фридман А. Я., Кулик Б. А., 2020

возникающие проблемы через центр. Стратегические цели сетецентрической войны предполагается достигать с помощью информационно-коммуникационной сети (ИКС).

В настоящее время ИКС используются практически во всех сколько-нибудь сложных компьютеризованных средах, и разнообразие приложений, характеризуемых авторами как сетецентрические, просто поражает. Чтобы попытаться структурировать эти среды, для начала разделим их на военные приложения [2] и приложения гражданского назначения (ПГН) и сразу исключим из дальнейшего рассмотрения первую категорию как недоступную для детального анализа по соображениям секретности. Соответственно, не будем рассматривать игровые методы анализа и синтеза таких сред, поскольку в анализируемых далее задачах и структурах не предполагается наличие сознательного противодействия принимаемым решениям. Для наших целей достаточно учитывать неизбежные неопределенности в рамках парадигмы так называемых «игр с природой» [3].

Однако и оставшиеся области использования термина «сетецентрический» также весьма многочисленны: бизнес-структуры и транспортные сети [4], собственно компьютерные среды [5], социально-экономические образования [6], роевые объединения [7] и т. д., и т. п. [8; 9].

Первое, что настораживает при анализе перечисленных и других публикаций, — отсутствие сколько-нибудь формализованного или стандартизованного определения концепта «сетецентрический». Одни авторы утверждают, что сетецентрические структуры альтернативны и оппозиционны иерархическому подходу [10], не меньшее количество авторов не считает эти подходы несовместимыми, включая иерархические подсистемы в состав сети [11] или даже строя сетецентрическую структуру как трехслойную иерархию [12]. В большинстве публикаций декларируется необходимость и важность комплексного использования информации, но крайне редко обсуждаются цели, принципы и тем более алгоритмы такого использования. К сетецентрическим относят и мультиагентные системы [13], и сетевые организации [14], и распределенные системы [15], и активные системы [16], и прочее [17; 18].

Строго говоря, даже правомерность сочетания терминов «сетецентрический» и «система» в описаниях большинства приложений вызывает серьезные сомнения, поскольку по общепринятому в системном анализе принципу любая система должна включать только подсистемы и элементы, при отсутствии которых цель системы не достигается (необходимое условие существования системы — целостность), но их наличие гарантирует появление новых свойств, которых не было у составных частей системы (достаточное условие существования системы — эмерджентность) [19].

Разумеется, в сложных системах требование целостности ослабляется из-за необходимости обеспечить структурную избыточность для достижения робастности — способности системы достигать своей цели (возможно, с меньшей эффективностью) при отказе некоторых ее составных частей или связей. Однако требование эмерджентности никто не отменял, а его обоснование в проанализированных публикациях найти не удалось, хотя без детали-

зированных объяснений утверждается и самоорганизация [20], и живучесть [21], и синергетический эффект [22], и другие приятные для слуха свойства существующих сетецентрических структур.

В связи с изложенным ниже сделана попытка рационализировать понятие «сетецентрическая система» на основе концепции ситуационной осведомленности (СО) (например, [23]), которая изначально присутствовала в работах по сетецентрическим системам [24], но не имела (насколько можно судить по открытым публикациям) конструктивного воплощения.

1. Основные характеристики сетецентрической системы

Чтобы соблюсти корректность терминологии, условимся считать, что сетецентрическая структура функционально и территориально представляет собой сеть, каждый узел (вершина) в которой имеет свою цель, задаваемую некоторым критерием качества, и принимает решения так, чтобы критерий качества принимал экстремальное (для определенности — максимальное) значение. Все иерархические связи «скрываются» во внутренней структуре узлов, поэтому последняя может иметь произвольную сложность в пространственном и функциональном отношении. В зависимости от сложившейся ситуации, каждый узел сети может стать центром некоторой связной части или всей системы в целом, в таком случае он получает право и возможность координировать взаимодействия узлов, ставших ему подведомственными (вошедших в его зону ответственности — ЗО [25]). Изначально сеть является пиринговой (одноранговой) не только и не столько в чисто сетевом смысле этого термина, сколько в равноправии узлов в плане принятия решений. В ходе работы такой сетецентрической системы (СЦС) ранги узлов меняются в зависимости от количества подведомственных им узлов. Для определения текущего ранга и ЗО каждого узла СЦС предлагается применять уже упомянутую концепцию СО [23], основные положения которой исследуются в следующем разделе.

2. Принципы достижения СО

В настоящее время концепция СО (от situation(al) awareness, см., например, [23; 26]) описывает наиболее общие принципы подготовки и обработки информации для реализации ситуационного подхода в динамических предметных областях. Ситуационная осведомленность включает в себя осознание того, что происходит в окружающей среде, чтобы понять, как информация, события и собственные действия будут влиять на цели и задачи в текущий момент и в ближайшем будущем. Недостаточную или неверную СО считают одним из основных факторов, связанных с несчастными случаями, которые вызваны «человеческим фактором» [27]. Таким образом, осведомленность о ситуации особенно важна в профессиональной деятельности, где поток информации может быть довольно высоким, а плохие решения могут привести к серьезным последствиям. Это особенно явно проявляется в высокодина-

мичных предметных областях (например, пилотирование самолета, военные действия, обращение с тяжелобольными или ранеными пациентами и т.п.), однако, по мнению авторов, требует учета также в задачах проектирования и эксплуатации СЦС, где время принятия решений может быть достаточно велико, но остальные аспекты СО весьма существенны.

В России эта концепция пока не пользуется популярностью. Удалось обнаружить всего несколько работ [28—30], рассматривающих задачи обеспечения СО в различных предметных областях и носящих в основном постановочный характер. Во многих работах по СЦС (например, [24]) выдвигается требование формирования областей СО как необходимого условия функционирования больших динамических систем сетецентрического типа, но не дается ни определения таких областей, ни методов формирования СО в них.

Причина такого положения, на наш взгляд, в том, что этот подход преимущественно качественный и, возможно, излишне общий, за что его критикуют некоторые исследователи (см., в частности, [26]). Представляется, что базовые принципы СО действительно становятся реалистичными только применительно к конкретной модели принятия решений в той или иной предметной области. Поэтому далее они интерпретируются для СЦС в рамках данного выше определения. В качестве ближайшего прототипа СЦС используется ситуационная система моделирования (ССМ) (например, [31]) на базе ситуационной концептуальной модели (СКМ), предложенной авторами для исследования промышленно-природных комплексов (ППК), к каковым без существенной натяжки можно отнести и большинство СЦС, которым, как и ППК, имманентны пространственная структура и изменения характеристик во времени. Основное отличие ППК от СЦС состоит в иерархичности структуры ППК и постоянстве ЗО для каждого ЛПР (она может измениться только при модификации СКМ), что вносит специфику в задачу формирования СО в СЦС, так как здесь требуется оперативно определять ЗО для каждого ЛПР. Предполагается, что структуру (концептуальную модель) СЦС можно описать графом с альтернативными подграфами, причем в каждый момент времени реализуется только одна безальтернативная структура, соответствующая достаточной ситуации в ССМ. При таком предположении возможны достаточно обширные аналогии между СКМ и моделью СЦС, структура которой аналогична вычислительной сети [31], получающейся при имитационном моделировании динамики ППК.

Для удобства основные положения СО далее приводятся *курсивом*, обычным шрифтом описаны особенности их применения в СКМ и модификации с целью применения в СЦС.

Для достижения СО необходимо обеспечить корректную обработку информации на трех уровнях: восприятие элементов окружающей среды, понимание ситуации и прогноз будущего статуса [23]. В ССМ восприятие моделируется заданием исходной ситуации (перечня интересующих ЛПР величин), понимание — формированием полной ситуации (связного фрагмента СКМ, гарантирующего моделирование этих величин), прогнозирование —

выбором желательного класса ситуаций и имитационным моделированием поведения ППК при наилучшей достаточной ситуации в выбранном классе. Для СЦС смысл уровней СО такой же, но ЗО для каждого ЛПР строится динамически по правилам, описанным в следующем разделе.

Корректная установка приоритетов при отборе и последующем анализе доступной информации — одна из главных проблем достижения приемлемого уровня СО [23]. Для этого в ССМ разработан ряд методов обработки ситуаций [31]: средства детального контроля корректности СКМ на всех этапах ее жизненного цикла, алгоритмы классификации и обобщения ситуаций, в том числе в рамках когнитивного подхода [32], средства оценки эффективности доступных альтернатив реализации ППК и т. д. Когнитивный метод классификации ситуаций на базе предложенной семантической иерархической метрики близости ситуаций позволяет учитывать экспертные оценки важности уровней иерархической модели ППК. Для СЦС в следующем разделе будет предложен аналогичный когнитивный метод классификации узлов сети по уровню достижения СО с целью определения ЗО узла, имеющего максимальную СО в своей ЗО. Назовем его узлом принятия решений (УПР).

Вход в процедуры достижения СО — состояние окружающей среды, затем следует принятие решения и действие [23]. Поскольку в ССМ модель опасных ситуаций есть расширение модели нормального функционирования, каждый процесс/объект должен иметь не менее одного исполнителя модели нормального функционирования и не менее одного исполнителя модели функционирования в опасной(ых) ситуации(ях). Последние подключаются при выходе заданных переменных за безопасный диапазон. Технологически это выполняется анализом экспертно формируемых условий и степени опасности выхода значений ресурсов за безопасный диапазон (SR — Safety Range [31]) с подключением другого исполнителя того элемента модели, на который влияют нарушения SR. Степень опасности текущей ситуации необходимо учитывать и при оценке СО, что позволяет искать критические процессы и объекты, проблемы в которых сильно снижают СО.

В отличие от «классических» областей применения СО, в СКМ есть возможность не только выявлять момент перехода некоторого объекта из режима нормального функционирования в нештатный режим, но и рассчитывать степень потери СО при таких переходах, если производить моделирование в унифицированном дискретизированном пространстве [31], допускающем как числовые, так и строковые переменные в векторе состояния объекта. Таким образом, «обычное» концептуальное пространство (например, [33]) расширяется и становится применимым также для опасных режимов работы ППК. Эту же парадигму предлагается использовать для СЦС.

Наборы критических ключей (характеристик) позволяют использовать ментальную схему для индикации и мгновенной классификации и понимания прототипических ситуаций [23]. В ССМ это существенное и быстрое превышение единичного значения показателем обобщенных затрат некоторого элемента модели (при условии корректных значений его входных ресурсов),

и выход значений существенных ресурсов [31] за безопасный диапазон, указывающее на возможность появления инициирующих событий. Тот же метод исследования нештатных и чрезвычайных ситуаций применим и в СЦС.

СО — это внутренняя ментальная модель состояния окружающей среды, имеющаяся у оператора (в нашем случае — ЛПР). *Она строится путем применения системных знаний, знаний об интерфейсе программной среды и об окружающем мире. Достижение СО, принятие решений и эффективная деятельность есть различные этапы, взаимовлияющие в непрерывном цикле, который может быть разорван и другими факторами* [23]. Результат применения СО в ССМ — выбор исходной ситуации (это системное знание об основных параметрах, характеризующих состояние и поведение ППК) и после анализа соответствующей полной ситуации выбор нового (или сохранение прежнего) класса ситуаций для дальнейшего функционирования ППК или его части, а также выбор среди предложенных альтернатив (достаточных ситуаций) реализации выбранного класса ситуаций. При нормальном функционировании СЦС расширение исходной ситуации до полной не должно приводить к выходу за пределы ЗО данного УПР, в противном случае необходимо инициировать процедуру перераспределения ЗО.

При анализе динамических характеристик СО М. Эндсли указывает на важность учета скорости изменения окружающего мира, которой должна соответствовать скорость принятия решений оператором [23]. В СКМ с этой целью можно использовать величины градиентов (приращений) [31] критериев качества объекта, на котором находится ЛПР, и средства анализа чувствительности предлагаемых решений к изменениям параметров этих критериев. Величины градиентов критериев естественным образом показывают возможный временной интервал прогнозирования поведения объекта моделирования: чем они больше, тем короче интервал достоверного прогноза из-за неизбежных неопределенностей в оценке характеристик ППК и окружающей среды. В общем случае, в СЦС узлы с быстро меняющейся СО не должны быть узлами принятия решений, поскольку нельзя доверять их прогнозам будущего состояния ЗО.

Авторами найдены и другие аналогии между различными аспектами СО в «классической» интерпретации и характеристиками предлагаемой методологии достижения СО в СЦС, но уже изложенное подтверждает перспективность разрабатываемого подхода, поэтому далее излагается основной результат конкретизации этой парадигмы для СЦС — методы использования количественной оценки СО.

2. Числовые оценки СО в СЦС

Формульные зависимости для числовой оценки степени достижения СО (ССО) и трех ее этапов (см. п. 2) для ППК имеются, например, в [25], здесь они не приводятся из-за ограниченного объема публикации. С учетом изложенного выше, эти зависимости, по аналогии с когнитивной классификацией

в концептуальных пространствах [31], предлагается применять в СЦС для оперативного определения ЗО каждого УПР следующим образом: вычисляется текущее значение ССО для всех узлов сети, среди них выделяются узлы, имеющие локальные максимумы ССО, эти узлы есть УПР; в ЗО каждого УПР включаются ближайшие к нему узлы с меньшей ССО. В задачах, где важны информационные потоки, расстояние определяется по конфигурации компьютерной сети, для материальных потоков используется географическое расстояние. Узлы, попадающие в ЗО нескольких УПР, распределяются по дополнительным критериям или случайно.

После формирования ЗО каждый УПР решает вопросы координации действий (распределения заданий) для узлов, входящих в его ЗО. Методы координации в общем случае зависят от предметной области СЦС, видимо, в большинстве систем можно применять градиентную координацию [31].

УПР переназначаются, если в СЦС диагностируется существенное изменение ССО для каких-либо узлов.

Заключение

Показано, что использование числовых оценок СО позволяет оперативно строить ЗО различных УПР в СЦС и таким образом улучшать координируемость действий узлов системы.

Работа частично поддержана грантами РФФИ (проекты № 18-29-03022-мк, 18-07-00132-а, 18-01-00076-а и 19-08-00079-а).

Список литературы

1. *Cebrowski A.K., Garstka J.J.* Network-Centric Warfare: Its Origin and Future. U.S. Naval Institute Proceedings. Annapolis (Maryland), 1998.

2. *Arquilla J. Ronfeldt D.F.* Networks and netwars: the future of terror, crime, and militancy. Santa-Monica: Rand Corporation, 2001.

3. *Экономико-математические* методы и модели / под ред. С.И. Макарова. М. : Кнорус, 2009.

4. *Капустян С.Г., Дьяченко А.А.* Распределенная информационно-управляющая система автоматизированного мультиробото-технического транспортно-складского комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7. С. 34—39.

5. *Тома Ю.Г.* Дифференциация уровней применения сетецентрической концепции на примере существующих информационных систем и децентрализованных финансовых ресурсов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Т. 9, № 6 (2017). URL: https://naukovedenie.ru/PDF/15EVN617.pdf

6. *Своеволин В.Ю.* Сетецентрический принцип управления социально-экономическими системами // Terra economicus. 2013. Т. 11, № 4-2. С. 12—15.

7. *Matrenin P.* Описание и реализация алгоритмов роевого интеллекта с использованием системного подхода // Программная инженерия. 2015. С. 27—34.

8. *Маслобоев А.В.* Технология поддержки принятия решений в системе сетецентрического управления региональной безопасностью // Информационно-технологический вестник. 2019. № 2. С. 117—126.

9. *Рязанов В.А.* Сетецентрический подход в управлении силами пожарной охраны // Пожары и ЧС. 2010. № 3. С. 61—69.

10. *Карпова А.В.* Сетецентрическая концепция — новая реальность в современной экономике // Экономика и бизнес: теория и практика. 2016. № 10. С. 146—149.

11. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. М. : МПСИ, 2005.

12. *Иванюк В.А., Абдикеев Н.М., Пащенко Ф.Ф. и др.* Сетецентрические методы управления // Стратегический менеджмент. 2017. № 1. С. 26—34.

13. *Маслобоев А.В.* Когнитивная технология динамического формирования и конфигурирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 748—760.

14. *Сетецентрический* подход. URL: http://www.kg.ru/technology/network-centric/

15. *Трахтенгерц Э.А., Пащенко Ф.Ф.* Некоторые особенности сетецентрического управления в крупномасштабных сетях // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 4. С. 12—21.

16. *Новиков Д.А., Смирнов И.М., Шохина Т.Е.* Механизмы управления динамическими активными системами. М. : ИПУ РАН, 2002.

17. *Кудж С.А., Цветков В.А.* Сетецентрическое управление и киберфизические системы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2 (19). С. 86—92.

18. *Савкин В.И., Прока Н.И., Крыгин А.А.* Сетецентризм в государственной поддержке малых форм хозяйствования аграрного сектора экономики России // Экономический анализ: теория и практика. 2014. № 47 (398). С. 45—52.

19. *Альбеков Н.Н.* Эмерджентность как объект современной науки // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 421.

20. *Арсеньев Д.А., Толмачев С.Г., Шкодырев В.П.* Адаптивно-стохастические модели самоорганизации и управления в сетецентрических системах // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016) : материалы 9-й мультиконференции по проблемам управления. СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 90—95.

21. *Ашарина И.В., Лобанов А.В., Гришин В.Ю. и др.* Проблемы создания живучих сетецентрических систем управления группировками космических аппаратов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2017. № 1. С. 325—332.

22. *Трахтенгерц Э.А., Пащенко Ф.Ф.* Синергетические эффекты в сетецентрических системах // Датчики и системы. 2017. № 11 (219). С. 3—12.

23. *Endsley M.R.* Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures // J. of Cognitive Engineering and Decision Making. 2015. Vol. 9, No. 1. P. 101—111.

24. *Абросимов В.К.* Формирование ситуационной осведомленности в больших сетецентрических системах // Управление развитием крупномасштабных систем : материалы Десятой междунар. конф. : в 2 т. М. : ИПУ РАН, 2017. С. 300—303.

25. *Кулик Б.А., Фридман А.Я.* Количественная оценка ситуационной осведомленности в системе концептуального моделирования // Системный анализ в проектировании и управлении : сборник научных трудов XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 3. СПб. : Изд-во Политех-Пресс, 2019. С. 449—460.

26. *Banbury S., Tremblay S.* A cognitive approach to situation awareness: Theory and application. Aldershot, UK: Ashgate Publishing, 2004. P. 317—341.

27. *Lundberg J.* Situation Awareness Systems, States and Processes: A holistic framework. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2015.

28. *Попович В.В., Прокаев А.Н., Сорокин П.П. и др.* О распознавании ситуации на основе технологии искусственного интеллекта // Труды СПИИРАН. СПб. : Наука, 2008. Вып. 7. С. 93—104.

29. *Афанасьев А.П., Батурин Ю.М., Еремченко Е.Н. и др.* Информационно-аналитическая система принятия решений на основе сети распределенных ситуационных центров // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. №2. С. 3—14.

30. *Ямпольский С.М., Костенко А.Н.* Ситуационный подход к управлению организационно-техническими системами в планировании операций // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8, №2. С. 62—69.

31. *Фридман А.Я.* Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Saarbrucken, Germany: LAP, 2015.

32. *Фридман А.Я., Кулик Б.А.* Когнитивная категоризация в многокритериальных задачах ситуационного управления // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016 (3—7 октября 2016 г., г. Смоленск, Россия) : труды конференции : в 3 т. Смоленск, 2016. Т. 2. С. 225—234.

33. *Gärdenfors P.* Conceptual Spaces: The Geometry of Thought. A Bradford Book. Cambridge, MA: MIT Press, 2000.

Секция 4

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ, ОНТОЛОГИИ, МЯГКИЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Руководители секции — проф. И. Б. Фоминых
проф. С. М. Ковалев

И. А. Андреев[1], К. П. Мулянова[2], М. О. Синдюкова[3], А. В. Шараборина[4]
Ульяновский государственный технический университет, Россия
e-mail: [1]ares-ilya@yandex.ru, [2]kseniya7396@gmail.com, [3]sindyukova.m@gmail.com, [4]sharaborinaanyutik@mail.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ ОКРАСКИ ТЕКСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО СЛОВАРЯ SENTIWORDNET 3.0

Введение

Задача анализа эмоциональной окраски текстов приобретают все большую актуальность в связи с огромной аудиторией сети, публикующих свое мнение на различные товары и услуги, растущим средним временем нахождения в ней.

Для решения задач анализа эмоциональной окраски текста в компьютерной лингвистике применяются методы контент-анализа, общее название для которых — Sentiment Analysis (анализ тональности текста). Крупные компании используют социальные сети для исследования мнений о своих продуктах. Такой подход, в отличие от опросов на сайте производителя и работы фокус-групп, обеспечивает большую широту изучения мнений [9].

Цель — исследование и разработка метода определения эмоциональной окраски с помощью расширенного словаря SentiWordNet 3.0. Для достижения поставленной задачи необходимо определить, является ли текст (отзыв на различные товары и услуги) положительным, отрицательным или нейтральным по своему влиянию на репутацию конкретного объекта.

Наиболее прямое определение задачи: «Выражает ли текст позитивные или негативные чувства?». Обычно задается значение полярности для текста в интервале [–1, 1]. В анализируемом тексте предполагается наличие словаря «хороших» и «плохих» слов, и каждому слову присваивается оценка +1 в случае позитивной тональности, и –1 — в случае негативной. То есть система определяет «позитивный» текст или «негативный».

1. Рассмотрение аналогов

Компонент анализа тональности текста в составе систем «Аналитический курьер» и «X-files» [2] разработан компанией «Ай-Теко» и реализует метод,

© Андреев И. А., Мулянова К. П., Синдюкова М. О., Шараборина А. В., 2020

основанный на словарях и правилах. Данная система выдает пользователю массив размеченных предложений. В предложениях размечаются объекты тональности (при наличии таковых) и цепочка слов, несущая в себе тональность по отношению к ним. Кроме того, на основе найденных цепочек слов подсчитывается общая тональность для каждого предложения с использованием специальных правил.

Например, для предложения «Доктор Смит вылечил больного гриппом» есть правило, которое говорит, что сочетание позитивного глагола «вылечить» с негативной цепочкой (в данном случай «больной гриппом») приписывает позитив подлежащему (в нашем примере — «доктору Смиту»). Тональность оценивается по тернарной шкале (позитивный/негативный/нейтральный). Недостатки системы: отсутствие количественной оценки текста.

SentiStrengt [3] — система была разработана M. Thelwall, K. Buckley, G. Paltoglou и D. Cai первоначально для анализа коротких неструктурированных неформальных текстов на английском языке. Однако она может быть сконфигурирована для работы с текстами на ряде других языков, в том числе и для текстов на русском языке.

Алгоритм основан на поиске максимального значения тональности в тексте для каждой шкалы (т. е. поиск слова с максимальной негативной оценкой и слова с максимальной позитивной оценкой). При работе алгоритма учитывается простейшее взаимодействие слов (например, слова-усилители усиливают значение тональности для слова, на которое они действуют — «очень злой» будет иметь более негативную оценку, нежели просто «злой») и идиоматические выражения.

Недостатки системы: хотя SentiStrength может быть сконфигурирована для русского языка, реализованные в ней алгоритмы не учитывают его специфику, в том числе русскую морфологию, что приводит к ряду проблем. Например, для полноценной работы системы с русским языком необходимо в банке данных иметь все словоформы для каждого слова. Кроме того, система считает лишь общую тональность текста, не выделяя субъекты и объекты тональности.

2. Анализ эмоциональной окраски текста

Анализ эмоциональной окраски текста можно определить как автоматическое извлечение особенностей текста, т. е. эмоционально окрашенную лексику и отношение авторов по отношению к тому, что сказано в тексте. Таким образом, анализ тональности можно рассматривать как метод количественного описания качественных данных, реализуемый путем присваивания некоторых оценок настроения [5]. Хотя тональность в общем случае субъективна, анализ настроений находит много полезных применений. Например, анализ тональности и субъективности — основная задача оценки эмоциональной окраски текста и применяется в проверке отзывов о товаре на предмет положительности/отрицательности или в работе службы поддержки.

Один из наиболее простых подходов — использование SentiWordNet 3.0 для вычисления полярности слов и усреднения этого значения. SentiWordNet — это лексический семантический тезаурус, первая версия которого была разработана в 2006 г. На данный момент последняя версия — SentiWordNet 3.0, использование которой дает более чем 20 % прирост точности по сравнению с первой версией.

Словарь — результат автоматического аннотирования каждого WordNet синсета (набора синонимов) в соответствии с его степенью позитивности, негативности и объективности. Таким образом, каждому синонимическому ряду из WordNet присваивается три численные оценки, где каждая из этих оценок соответственно определяет объективную, позитивную или негативную составляющую синсета. Оценки принимают значения в интервале от 0 до 1, и в сумме дают единицу, т. е. каждая их этих оценок может иметь ненулевое значение. Термы с различными значениями, могут иметь и разные значения оценок.

На рисунке 1 изображена структура словаря SentiWordNet, который хранит в себе группы слов, идентификатор, позитивную и негативную оценку, само слово, вес слова и описание слова. Группы бывают следующих видов: *n* – NOUN; *v* – VERB; *a* – ADJECTIVE; *r* — ADVERB.

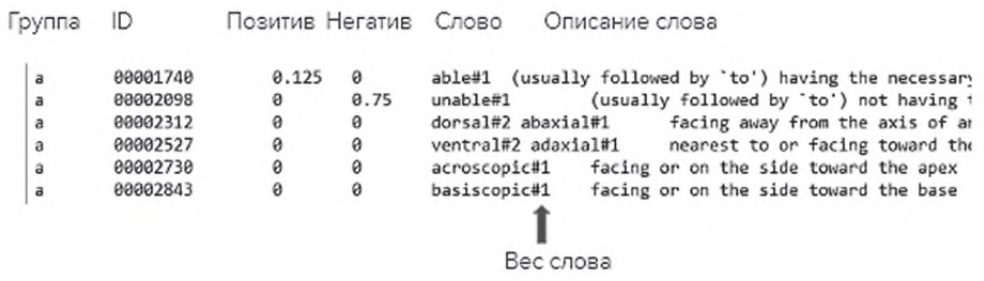


Рис. 1. Структура словаря

Так как расширенный словарь SentiWordNet 3.0 работает на английском языке, для удобства работы реализована возможность ввода текста на русском за счет перевода вводимого текста на язык словаря с помощью api GoogleTranslator [4] (рис. 2).

Для упрощения работы системы применялись NLTK теги: VB verb, base from take; VBR verb, past tense took; VBR verb, gerund/present participle-taking; JJ adjective ‘big’; JJS adjective, comparative 'bigger'; JJS adjective, superlative ‘biggest’; RBR adverb, comparative better; RBS adverb, superlative best; NN noun, singular 'desk'; NNPS proper noun, plural ‘Americans’, сокращающие время классификации слова в одну из четырех групп *n, a, r, v* в словаре SentiWordNet (рис. 3).

```
class GoogleTranslator(Translator):

    CHARACTER_LIMIT = TEXT_CHUNK_SIZE

    def __init__(self, service_urls=None, user_agent=constants.DEFAULT_USER_AGENT,
                 proxies=None, timeout=None):
        self.default_language = 'en'
        super().__init__(service_urls, user_agent,
                         proxies, timeout)

    def translate(self, text, dest='en', src='auto'):
        if len(text) > self.CHARACTER_LIMIT:
            raise CharacterLimitException()

        detection = self.detect(text[0:100])
        if detection.lang == self.default_language:
            print("Перевод не требуется")
            return text

        translation_result = super().translate(text, dest, src)
        print("Оригинальный текст: {}".format(translation_result.origin))
        print("Переведено в : {}".format(translation_result.text))

        return translation_result.text
```

Рис. 2. Класс GoogleNranslator

```
def pos_short(self, pos):
    """Конвертим тег NLTK в корректный формат"""
    if pos in set(['VB', 'VBD', 'VBG', 'VBN', 'VBP', 'VBZ']):
        return 'v'
    elif pos in set(['JJ', 'JJR', 'JJS']):
        return 'a'
    elif pos in set(['RB', 'RBR', 'RBS']):
        return 'r'
    elif pos in set(['NNS', 'NN', 'NNP', 'NNPS']):
        return 'n'
    else:
        return 'a'
```

Рис. 3. Структура словаря

Значение эмоциональной окраски текста вычисляется с помощью среднего геометрического взвешенного. Оценки отсортированы по убыванию весов. И так как в среднем геометрическом взвешенном на итоговое значение большее значение оказывают числа в начале списка, соответственно слова, имеющие больший вес, будут играть большую роль на итоговое значение анализа эмоциональной окраски текста.

На рисунке 4 изображена блок-схема алгоритма анализа эмоциональной окраски текста разработанной системы.

Рис. 4. Блок-схема алгоритма анализа эмоциональной окраски текста

3. Реализованная система

В начале работы выбирается опция: [0] — подсчет эмоциональной окраски введенного текста; [1] — подсчет эмоциональной окраски текста в файле.

Рассмотрим анализ простой фразы на русском языке «Я плохой программист» на рисунке 5.

```
Что делаем?
[0] - посчитать эмоциональную окраску введенного текста
[1] - посчитать эмоциональную окраску текста в файле
[:q] - выйти
Опция: 0
Введите текст : Я плохой программист
Оригинальный текст: Я плохой программист
Переведено в : I'm a bad programmer
Оценка : -0.3658332824707031
```

Рис. 5. Пример работы системы с введенным текстом

Результат перевода — «I`m a bad programmer», оценка тональности — отрицательная, так как в тексте присутствует слово «плохой».

На рисунках 6 и 7 показана работа системы с другими текстами.

```
Что делаем?
[0] - посчитать эмоциональную окраску введенного текста
[1] - посчитать эмоциональную окраску текста в файле
[:q] - выйти
Опция: 0
Введите текст : После проведённого времени в кафе остались приятные впечатления.
 Интерьер интересный, зал чистый. Персонал был внимателен, доброжелателен и пред
усмотрителен. Меню показалось скучноватым, но все блюда вкусные. Особенно понрав
ился стейк лосося на гриле, он был просто потрясающе вкусный. Если вы не поклонн
ик авторской кухни, а просто хотите хорошо провести вечер с друзьями, то Вам ,ко
нечно, сюда.
Оценка : 0.12407838503519696
```

Рис. 6. Пример работы системы с введенным текстом

```
Что делаем?
[0] - посчитать эмоциональную окраску введенного текста
[1] - посчитать эмоциональную окраску текста в файле
[:q] - выйти
Опция: 1
Введите путь до файла: C:\Users\Ксения\python_projects\sentiment_dictionary_
analysis\data\Text-Plus.txt
Оценка : 0.013180645772388307
```

Рис. 7. Подсчет эмоциональной окраски текста с файла

4. Эксперименты

В ходе экспериментов система показала 82 % правильных результатов анализа: 18 % ошибок анализа эмоциональной окраски текста обусловлено словами, имеющими негативное значение в положительно окрашенном тексте, и наоборот. Примеры ошибок при анализе эмоциональной окраски текста представлены в таблице.

Примеры анализа причин ошибок в экспериментах

Текст	Оценка	Экспертная оценка
Приезжаем из Москвы в Дубну несколько раз в год на турниры. Из-за отсутствия других мест заходили всегда в «Камелот». Я молчу про скорость обслуживания. Но когда мы, обнаружив таракана в еде и обратив на это внимание сотрудников заведения, получили от администратора комментарий: ну ладно в морсе таракан, но за еду-то заплатите?! Невероятный клиентский сервис, я считаю	0,0026	Эксперт оценил данный отзыв как отрицательный. Система не распознала резкий негатив из-за сарказма человека, оставившего отзыв

Окончание табл.

Текст	Оценка	Экспертная оценка
Несмотря на антураж рыцарского средневековья, главное, что Вас должно интересовать, — это вкус и качество пищи, ведь идете Вы не в музей. На 2018 год качество и вкус пищи можно охарактеризовать выражением «так себе». Вы не отравитесь тут точно, но и восторга не испытаете. Раньше, приблизительно до года эдак 2013-го, готовили в «Камелоте» действительно вкусно. Со временем ситуация изменилась в худшую сторону. Сейчас это посредственная едальня с антуражем рыцарского средневековья. Если хотите чего-то необычного или пофоткаться — Вам сюда. Если хотите вкусно поесть, наверное, не сюда.	0,0254	Эксперт оценил данный отзыв как отрицательный. Система не распознала отрицательную окраску из-за разговорных слов («едальня», «так себе»), отсутствующих в словаре, и упоминания положительного прошлого опыта по сравнению с сегодняшними днями

В экспериментах использовались тексты отзывов на товары и услуги, и в контексте отзыва на фильм ужасов слово «жуткий» имеет положительный окрас, а в рамках описания ресторана — негативный, однако словарь оценивает это слово всегда как негативное. Также неточности анализа обусловлены наличием иронии, сарказма и юмора в текстах.

Заключение

Рассмотрена и экспериментально исследована система анализа тональности текста на основе расширенного словаря SentiWordNet 3.0. При реализации системы использовались api GoogleTranslator и NLTK теги. Экспериментально полученные результаты позволяют продолжить научное исследование: создание метода, определяющего иронию, сарказм, разговорные слова и юмор в текстах, для последующего определения их эмоциональной окраски и разработки узкопрофильных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-47-730035, 18-47-732007 и 18-47-730019).

Список литературы

1. *Меньшиков И.Л., Кудрявцев А.Г.* Обзор систем анализа тональности текста на русском языке // Молодой ученый. 2012. № 12. С. 140—143. URL: https://moluch.ru/archive/47/5951/ (дата обращения: 20.01.2020).

2. *Система* извлечения знаний из текстов «Аналитический курьер» : АйТеко. URL: http://www.i-teco.ru/ac (дата обращения: 20.01.2020).

3. *SentiStrength.* SentiStrength — sentiment strength detection in short texts. URL: http://sentistrength.wlv.ac.uk/#About (дата обращения: 20.01.2020).

4. *Pypi.org*. URL: https://pypi.org/project/googletrans/ (дата обращения: 20.01.2020).

5. *Deeper* Sentiment Analysis Using Machine Translation Technology. URL: https://www.aclweb.org/anthology/C04-1071 (дата обращения: 20.01.2020).

6. *Getting* Started with Sentiment Analysis. URL: https://nlpforhackers.io/sentiment-analysis-intro/ (дата обращения: 20.01.2020).

7. *Source* code for nltk.corpus.reader.sentiwordnet. URL: https://www.nltk.org/_modules/nltk/corpus/reader/sentiwordnet.html (дата обращения: 20.01.2020).

8. *Отзывы* на ресторан «Камелот». URL: https://www.tripadvisor.ru/Restaurant_Review-g736006-d4774046-Reviews-or10-Kamelot_Restaurant-Dubna_Moscow_Oblast_Central_Russia.html (дата обращения: 20.01.2020).

9. *Воронина Е.И., Гончаров В.А.* Анализ эмоциональной окраски сообщений в социальных сетях (на примере сети ВКонтакте). Воронеж : ВГУ, 2015.

В.И. Буланова[1], М.В. Фомина[2], В.Н. Щербакова[3]
[1]ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"», Москва, Россия
e-mail: [1]valjuxa96@gmail.com, [2]m_fomina2000@mail.ru, [3]tory.sh@bk.ru

АЛГОРИТМ ОБОБЩЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ДАННЫМИ

Введение

Проблема обобщения информации — крайне важная при построении таких интеллектуальных систем, как системы обучения, системы поддержки принятия решений и экспертные системы. При помощи методов обобщения возможно получение знаний, объясняющих имеющиеся факты, а также способных классифицировать или предсказывать новые. Области применения алгоритмов обобщения — медицина, банковская деятельность, прогнозирование и многое другое. Процессы, происходящие в этих сферах, часто относятся к динамическим, поэтому массивы данных, описывающие поведение таких объектов, могут включать временные зависимости. Таким образом, актуальна проблема разработки методов и алгоритмов обобщения динамических данных. В докладе предлагается алгоритм обобщения, позволяющий учитывать фактор времени при анализе поведения таких объектов.

1. Постановка задачи обобщения информации

Обнаружение знаний в больших массивах данных тесно связано с решением задачи обобщения. Приведем ее классическую постановку [1].

Пусть $O = \{o_1, o_2, \ldots o_n\}$ — множество объектов, которые могут быть представлены в интеллектуальной системе I (например, в интеллектуальной

© Буланова В.И., Фомина М.В., Щербакова В.Н., 2020

системе поддержки принятия решений (ИСППР)). Пусть каждый объект характеризуется r признаками (атрибутами): $A_1, A_2, \ldots, A_r$. Атрибутами могут быть, например, размер, форма, вес, цвет и т. п. Определим $Dom(A_1)$, $Dom(A_2)$, ... , $Dom(A_r)$ — множества допустимых значений атрибутов. Для атрибута A_k $1 \le k \le r$, $Dom(A_k) = \{x_1, x_2, \ldots x_q\}$, где q — число различных значений атрибута A_k. Таким образом, каждый объект $o_i \in O$, $1 \le i \le n$ представлен множеством значений атрибутов, т. е. $o_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{ir}\}$, где $x_{ik} \in Dom(A_k)$, $1 \le k \le q$. Такое описание объекта назовем признаковым описанием [1].

Пусть среди всех объектов O, представленных в ИСППР, имеется множество объектов V, относящихся к некоторому классу или понятию. Назовем их положительными объектами для понятия. Все остальные объекты W представляют контрпримеры понятия. Очевидно, $O = V \cup W$, и $V \cap W = \varnothing$. Построим S непустое множество объектов такое, что $S = S^+ \cup S^-$, где $S^+ \subset V$ и $S^- \subset W$. Будем называть S обучающей выборкой. На основе обучающей выборки надо построить правило, разделяющее положительные и отрицательные объекты обучающей выборки.

Алгоритмы обобщения формируют решение в виде множества правил вида “ЕСЛИ < условия > ТО < искомое понятие >”. Множество таких правил будем обозначать $\mathbb{R}$. Решающие правила являются корректными, если они в дальнейшем успешно распознают объекты, не вошедшие первоначально в обучающую выборку.

Удобные способы представления решающих правил $\mathbb{R}$ — деревья решений. Известен ряд алгоритмов построения дерева решений. Назовем такие алгоритмы, как алгоритм ID3 (Induction of Decision trees) [2], который позволяет строить решающие деревья общего вида. Усовершенствованная версия этого алгоритма C4.5 предложена в [3] тем же автором. Известны также алгоритмы построения дерева решений CART, IDR5, EG2 [4—6] и ряд других.

При построении дерева решений крайне важен критерий, определяющий порядок выбора атрибутов для выполнения проверки. Так, в алгоритме C 4.5 с данной целью используется критерий Gain ratio, показывающий, сколько информации об объекте мы получаем, благодаря выбранному атрибуту. В алгоритме CART используется критерий Gini [4].

Признаки, задающие свойства примеров обучающей выборки, в дальнейшем будем называть просто атрибутами. Так называемый целевой атрибут — признак, определяющий принадлежность примеров обучающей выборки к тому или иному формируемому понятию, — представляет собой качественный атрибут и тоже входит в обучающую выборку.

2. Интервальные данные. Темпоральный интервальный атрибут

Атрибуты, используемые при построении дерева решений, относятся к следующим типам: количественные (числовые), качественные, логические. В описании объектов каждый атрибут принимает одно конкретное значение из области допустимых значений $Dom(A)$. Однако возможны ситуации, когда

значение атрибута может быть задано интервалом. Например, ежегодный доход фирмы может находиться в интервале от минимального до максимально возможного. Существуют алгоритмы построения дерева решений, способные эффективно обрабатывать такие атрибуты [7].

Интервальное представление данных характерно для случая, когда один из атрибутов — время. События, происходящие в течение некоторого периода, имеют начало и конец, длительность. Также одно событие может быть причиной следующего события.

Интервальный атрибут в контексте темпоральных данных имеет смысл как самостоятельный тип данных для анализа, если определены соответствующие таксономии временных отношений. Аллен описывает таксономию тринадцати основных интервальных отношений [8]. Эта таксономия задает все возможные взаимодействия между двумя интервалами, где известны отношения между конечными точками. Описанные зависимости могут быть использованы для создания временных предикатов, определяющих отношения между интервалами. Классификация отношений для временных интервалов по Аллену [8] представлена в таблице 1.

Таблица 1

Таксономия Аллена на интервалах $X = [A_x; B_x]$ и $Y = [A_y; B_y]$

Отношение	Обозначение	Графическое представление	Условия выполнения
X equals *Y*	=	*xxxx* *yyyy*	$A_x = A_y\ B_x = B_y$
X before *Y*	<	*xxx yyy*	$B_x < A_y$
X after *Y*	>	*yyy xxx*	$A_x > B_y$
X during *Y*	*d*	*xxx* *yyyyyy*	$A_x > A_y$ и $B_x < B_y$
X contains *Y*	*di*	*xxxxxx* *yyy*	$A_x < A_y$ и $B_x > B_y$
X overlaps *Y*	*o*	*xxxx* *yyyy*	$A_x < A_y$ и $B_x > A_y$ и $B_x < B_y$
X overlapped-by *Y*	*oi*	*xxxx* *yyyy*	$A_x > A_y$ и $A_x < B_y$ и $B_x > B_y$
X meets *Y*	*m*	*xxxxyyyy*	$A_y = B_x$
X met-by *Y*	*mi*	*yyyyxxxx*	$A_x = B_y$
X starts *Y*	*s*	*xxxx* *yyyyyy*	$A_x = A_y$ и $B_x < B_y$
X started-by *Y*	*si*	*xxxxxx* *yyyy*	$A_x = A_y$ и $B_x > B_y$
X finishes *Y*	*f*	*xxxx* *yyyyyy*	$A_x > A_y$ и $B_x = B_y$
X finishes-by *Y*	*fi*	*xxxxxx* *yyyy*	$A_x < A_y$ и $B_x = B_y$

В таблице 1 в столбце «Графическое представление» интервал $[A_x; B_x]$ представлен как *xxxx*, а интервал $[A_y;B_y]$ изображен как *yyyy*. Наиболее очевидные и удобные для реализации следующие операции: before, after, contains, during, equals. Они использовались в первую очередь при программной реализации алгоритма построения бинарного дерева решений.

3. Преобразование исходных данных

Рассмотрим случай, когда обучающая выборка, применяемая для построения дерева решений, содержит один или несколько атрибутов, представляющих временные зависимости. Таким образом, с каждым примером обучающей выборки (ситуацией) могут быть связаны не только числовые или качественные признаки, но и атрибуты, отражающие время. Возможны такие случаи.

Атрибут хранит точное значение момента времени, связанное с событием, например дату, устанавливающую день, когда событие произошло. Здесь время — точечное.

В списке атрибутов имеются два временных значения, которые указывают на начало и конец события (время начала события и время его окончания).

В списке атрибутов, описывающих ситуацию, могут быть представлены несколько пар временных значений, отражающих время начала и время окончания нескольких событий, связанных с конкретной ситуацией (примером в обучающей выборке).

Цель дальнейших преобразований — дополнить описание ситуаций новыми свойствами, отношениями, не представленными явно в исходных выборках. Новые свойства или отношения могут быть представлены предикатами, принимающими значение (*и, л*), что приведет к расширению набора свойств, связанных с конкретным примером обучающей выборки.

Введем основные правила преобразования данных в каждом из случаев.

В случае точечного времени и при наличии единственного признака с временной меткой имеется возможность упорядочить по времени наблюдения объекты, представленные в обучающей выборке. В работе [9] рассмотрена модификация алгоритма ID3 Куинлана, допускающая работу именно с такими данными.

Наиболее интересный с точки зрения анализа темпоральных зависимостей следующий вариант: присутствие в описании ситуации нескольких временных интервалов. Предварительная обработка временных интервалов связана с введением предикатов для установления таксономических зависимостей между интервалами.

В таблице 2 приведены исходные данные для построения обобщенного понятия, в состав которых входят три темпоральных атрибута (интервалы).

Таблица 2

Исходная обучающая выборка

Был ли урожай?	Период цветения	Период заморозков	Период обработки пестицидами
Да	02.04—12.04	14.04—17.04	15.04—16.04
	2—12	14—17	15—16
Да	01.04—10.04	11.04—12.04	11.04—15.04
	1—10	11—12	11—15
Нет	07.04—15.04	16.04—17.04	05.04—09.04
	7—15	16—17	5—9
Нет	06.04—16.04	02.04—12.04	02.04—12.04
	6—16	2—12	2—12
Нет	10.04—15.04	10.04—15.04	15.04—17.04
	10—15	10—15	15—17

Рассматривается следующая задача. Имеется ряд атрибутов, влияющих на урожай одной из сельскохозяйственных культур. Из множества всех атрибутов выделим только те, которые связаны с периодами времени. В таблице 2 представлены пять примеров обучающей выборки, относящихся к двум классам. Далее для краткости будем обозначать атрибут «Период цветения» как A_1, «Период заморозков» — A_2, «Период обработки пестицидами» соответственно A_3. Наша цель — установить, какие условия, прежде всего связанные с временными отношениями, позволяют получить урожай.

Первым этапом предварительной обработки темпоральных данных будет переход от абсолютных темпоральных значений к относительным: наименьшая временная метка, представленная в наборе данных, принимается за начало отсчета, в соответствии с заданным масштабом строится множество временных отрезков, каждый из которых задан парой (t нач, t кон). Относительные значения для временных интервалов видим в нижних строках в таблице 2.

Второй этап предварительной обработки временных данных — поиск зависимостей между событиями, представленными темпоральными атрибутами. В обучающей выборке для каждой пары темпоральных атрибутов проверяем, выполняется ли одно из соотношений: before, contains, during, equals. Каждая такая проверка рассматривается как установление истинности (ложности) предиката, сопоставленного такому отношению.

Для трех темпоральных атрибутов A_1, A_2, A_3, заданных временными интервалами, будут использованы сочетания (A_1, A_2) (A_1, A_3) и (A_2 A_3).

На примере отношения before(X, Y) истинность определяется условием $B_x < A_y$ (см. табл. 1), в обозначениях $A_1 = (A_x, B_x)$ $A_2 = (A_y, B_y)$.

Так, для примера 1 таблицы 2 интервал $A_1 = (2, 12)$, интервал $A_2 = (14, 17)$ проверяется условие $(12 < 14)$: if$(12 < 14)$ then before $(A_1, A_2) = 1$.

Результаты всех проверок для различных соотношений приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расширенное множество атрибутов

Был урожай?	before (A_1,A_2)	before (A_1,A_3)	before (A_2,A_3)	contain (A_2,A_3)	equals (A_1,A_2)	equals (A_2,A_3)
1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	1	0	1	0
Hd	1	1	3	3	3	3
pm	4	4	2	2	2	2

Новые атрибуты, полученные выше, являются бинарными, и принимают значения {0,1}. Следует отметить, что из таблицы исключаем те отношения, для которых значения на всех примерах обучающей выборки одинаковы (все нули или все единицы). Так, были исключены столбцы для отношений contains (A_1, A_2) и contains (A_1, A_3), содержащие только нулевые элементы.

4. Построение бинарного дерева решений

Рассмотрим рекурсивный алгоритм построения бинарного дерева на основе обучающей выборки *S* (далее будем называть этот алгоритм АМХ — «Алгоритм, основанный на метрике Хемминга»). Алгоритм АМХ в деталях рассмотрен в [1].

Для предъявленной обучающей выборки *S*, содержащей *M* примеров, ищется наиболее важный признак, который помещается в корневую вершину дерева. Обучающее множество *S* разделяется на два подмножества: *S1* и *S0*. Подмножество *S0* содержит те примеры из S, для которых значение выбранного признака равно нулю, *S1* содержит все примеры с единичным значением выбранного признака. Соответственно формируются две ветви дерева, которым приписываются примеры подмножеств *S0* и *S1*.

Далее для каждой подвыборки среди оставшихся атрибутов снова ищется наиболее важный признак и порождаются две новые ветви. Если получено подмножество, все примеры которого принадлежат одному классу, строится вершина — лист и расщепление по этой ветви заканчивается. Процесс завершается, когда использованы все признаки.

Стратегия нахождения наиболее важного признака основана на поиске расстояния между двумя бинарными атрибутами, один из которых является классом. Расстояние между двумя двоичными векторами по Хеммингу обозначается как *Hd* (*X,Y*) и основано на подсчете числа несовпадений в векторах *X,Y*. Из рассмотрения исключаются атрибуты, которые на всех примерах из *S* принимают одинаковые значения (все 0 или все 1).

Обозначим решающий атрибут *P*, он также является бинарным (каждый пример *S* принадлежит либо не принадлежит классу). Соответственно, на множестве объектов *S* строится бинарный кортеж длины *M*. Чтобы выбрать наиболее важный признак, ищем среди всех атрибутов *A* такой, чья связь с *P* наиболее тесная. Для этого воспользуемся правилом: ищем

$$\mathrm{pm} = \min\{\mathrm{Hd}\,(\mathrm{P},\mathrm{A}),\ \mathrm{M} - \mathrm{Hd}(\mathrm{P},\ \mathrm{A})\},$$

т. е. берем наименьшее расстояние, по Хеммингу, от *A* до *P* и от *A* до ¬*P*.

В двух последних строках таблицы 3 приведены значения *Hd* и *pm*, полученные на первом шаге построения бинарного дерева решений (*M* = 5). В качестве наиболее важного выбираются признаки с минимальным значением *pm*.

Ниже приведено описание алгоритма АМХ по шагам.

Исходными данными для алгоритма является *S* — обучающая выборка, |*S* | = *M*. Каждый пример из *S* характеризуется *r* атрибутами. Все атрибуты — бинарные. Результатом работы алгоритма является бинарное дерево решений, правильно классифицирующее все примеры обучающей выборки *S*.

Шаг 1. Построить корневой узел, все примеры обучающей выборки приписать этому узлу. Поместить корневой узел в множество текущих узлов.

Шаг 2. *Повторять рекурсивно, пока* множество текущих узлов не пусто.

1.1 Выбрать очередной узел из множества текущих узлов

1.2 Если множество примеров, приписанное текущему узлу, относится к одному классу, пометить узел как лист, приписать ему имя класса. Исключить из множества текущих узлов.

1.3 Если не все атрибуты использованы при построении дерева, выбрать атрибут для текущего узла дерева, и построить две ветви для значений этого атрибута. Критерий выбора очередного атрибута *A* — минимальное значение оценки *pm*. Сформировать две вершины – потомка текущего узла и поместить их в множество текущих узлов. Множество примеров, приписанное текущему узлу, разделить на два подмножества по значениям бинарного атрибута. Приписать каждому новому узлу свое текущее множество примеров. Исключить узел — предок из множества текущих узлов.

1.4 Если все атрибуты использованы, объявить текущую вершину листом, приписать листу имя класса, к которому принадлежат большинство примеров, связанных с узлом.

Конец рекурсивного повторения

Шаг 3. Если не все узлы дерева являются листами, то приписать листу имя класса, к которому принадлежат большинство примеров, связанных с узлом иначе КОНЕЦ, вывести построенное бинарное дерево.

Каждый атрибут, включенный на очередном шаге построения в бинарное дерево решений, исключается из выборки и критерии *Hd*, *pm* пересчитываются. Ситуация «наиболее важного атрибута нет» возникает, если все атрибуты рассмотрены, или все еще не использованные при построении дерева атрибуты имеют одинаковые значения *pm*.

Алгоритм АМХ и методы расширения таблицы временными отношениями были смоделированы программно.

В результате обработки данных, представленных в таблице 3, построено бинарное дерево решений и сформирован набор правил $\mathbb{R}$: 1) if [before(Период цветения, Период заморозков)] && [before (Период цветения, Период обработки пестицидами)] then Урожай = Да; 2) if [before(Период цветения, Период заморозков)] && [¬ before (Период цветения, Период обработки пестицидами)] then Урожай = Нет; 3) if [¬ before(Период цветения, Период заморозков)] then Урожай = Нет.

Заключение

В работе обсуждается алгоритм обобщения информации, предложен метод обработки интервальных временных атрибутов для расширения множества свойств, связанных с примерами обучающего множества. Рассмотрен алгоритм построения бинарного дерева решений с использованием расширенного множества бинарных атрибутов, даны примеры работы.

Предложенный метод позволяет успешно обрабатывать временные данные, представленные интервалами, на основе созданных программных средств, что свидетельствует о хороших перспективах его применения. В дальнейшем предлагается рассмотреть возможность использования данных алгоритмов, для работы с нечеткими данными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-57-00015 Бел_а и № 18-01-00201а.

Список литературы

1. *Вагин В.Н. Головина Е.Ю., Загорянская А.А. и др.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / под ред. Д.А. Поспелова. Изд. 2-е. М. : ФизМатЛит, 2008.

2. *Quinlan J.R.* Induction of Decision Trees // Machine Learning. 1986. Vol. 1. P. 81—106.

3. *Quinlan J.R.* Improved Use of Continuous Attributes in C 4.5 // Journal of Artificial Intelligence Research. 1996. Vol. 4. P. 77—90

4. *Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A. et all.* Classification and Regression Trees / Wadsworth, Belmont, California, 1984

5. *Utgoff P.E.* Incremental induction of Decision Trees // Machine Learning. 1989. Vol. 4. P. 161—186.

6. *Nuñez M.* The Use of Background Knowledge in Decision Tree Induction // Machine Learning. 1991. Vol. 6. P. 231—250.

7. *Tsang S., et all*. Decision Trees for Uncertain Data // IEEE International Conference on Data Engineering 2009. (ICDE'09), 2009, P. 441—444**.**

8. *Allen J.F.* Maintaining knowledge about temporal intervals // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. No. 11. P. 832—843.

9. *Vagin V., Morosin O., Fomina M.* Temporal Decision Trees In Diagnostics Systems // 2018 International Conference on Advances in Big Data Computing and Data Communication systems (6—7 august 2018, Durban, South Africa), South Africa https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8453211

А.А. Гонтарева[1], В.Г. Синюк[2]

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия

e-mail: [1]ana.gontareva@yandex.ru, [2]vgsinuk@mail.ru

МЕТОД ВЫВОДА ДЛЯ СИСТЕМ ТИПА МАМДАНИ MISO-СТРУКТУРЫ ПРИ НЕЧЕТКИХ ВХОДАХ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ

Статья посвящена проблеме временной сложности нечеткого вывода в случае систем с нечеткими входами. Рассматривается применение параллельных вычислений с целью ускорения этих процессов. Предлагается алгоритм эффективного выполнения нечеткого вывода на основе нечеткого значения истинности на графическом процессоре. Показана актуальность этого алгоритма, в том числе проведен вычислительный эксперимент, по сравнению продолжительности этих расчетов на центральном и графическом процессорах.

Введение

При отсутствии достаточно точного знания об объекте управления, традиционные методы решения задач управления оказываются неэффективными или могут быть вообще неприменимы. В этом случае можно строить нечеткие системы управления с использованием аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Основа нечеткого управления — нечеткое моделирование, разновидности которого определяются методами нечеткого логического вывода. Наиболее популярные в управлении — вывод, представленный Е. Мамдани [1; 2].

В современных пакетах нечеткого моделирования [3] вывод осуществляется только при четких значениях входных переменных системы управления. Однако в прикладных задачах входные данные могут содержать либо нечис-

© Гонтарева А.А., Синюк В.Г., 2020

ловые (лингвистические) оценки [4; 5], либо входные сигналы поступают зашумленными [6]. Как в первом, так и во втором случае они формализуются функциями принадлежности, т. е. представляют собой нечеткие входы.

Подход Мамдани сведен к вопросам интерпретации выражения « если X есть A, то Y есть B », где X и Y — лингвистические переменные, а A и В — лингвистические значения X и Y соответственно. Источник неопределенности в том, что « если X есть A, то Y есть B » может быть интерпретировано двумя различными способами. Первый и самый очевидный путь — это рассматривать такое выражение, как « X есть A и Y есть B », или как (X, Y) это $A \times \mathrm{B}$, где $A \times \mathrm{B}$ декартово произведение нечетких множеств A и В. Таким образом, в данной интерпретации « если X есть A, то Y есть B » является совместным ограничением на X и Y. Альтернативный путь — это понимание « если X есть A, то Y есть B » как условное ограничение или, что эквивалентно, импликации. При этом существует множество различных импликаций. Это направление исследовалось для систем со многими нечеткими входами в [7]. Данная работа посвящена развитию подхода Мамдани.

В [6] при нечетких входах приведены выводы для таких систем, которые основаны на операциях *max_min* или *max_product* композиции с линейной сложностью. Оператор *min* (взятие минимума) и *product* (арифметическое произведение) являются *t*-нормами [8] и соответствуют правилам вывода Мамдани [1] и Ларсена [9]. Но при других *t*-нормах, необходимость в изменении которых возникает при обучении нечетких систем, вывод при многих нечетких входах реализовать с полиномиальной вычислительной сложностью не представляется возможным. В статье рассмотрены методы, которые решают данную задачу независимо от применяемых *t*-норм.

В первом разделе выполнена постановка задачи и оценка сложности нечеткого вывода для систем управления типа Мамдани *MISO*-структуры при входах *non-singleton*. Во втором рассмотрен вывод для одного правила на основе нечеткого значения истинности. В третьем доказывается теорема о декомпозиции многомерной функции принадлежности. В четвертом и пятом разделах приведен вывод для базы нечетких правил и построение соответствующих сетевых структур на основе методов дефаззификации по среднему центру и центру тяжести.

1. Постановка задачи

Лингвистическая модель представляет собой базу нечетких правил R_k, $k = \overline{1, N}$ вида:

$$R_k : \text{Если } x_1 \text{ есть } A_{1k} \# x_2 \text{ есть } A_{2k} \# \ldots \# x_n \text{ есть } A_{nk}, \text{ то } y \text{ есть } B_k, \qquad (1.1)$$

где N — количество нечетких правил, $A_{ik} \subseteq X_i$, $i = \overline{1,n}$, $B_k \subseteq Y$ — нечеткие множества, которые характеризуются функциями принадлежности $\mu_{A_{ik}}(x_i)$ и $\mu_{B_k}(y)$ соответственно. $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — входные переменные лингвистической модели, причем $[x_1, x_2, \ldots, x_n]^T = x \in X_1 \times X_2 \ldots \times X_n$. Символами X_i, $i = \overline{1,N}$ и Y обозначаются соответственно пространства входных и выходных переменных. «#» — лингвистические связки "И" либо "ИЛИ".

Если ввести обозначение $X = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_n$ и $A_k = A_{1k} \times A_{2k} \times \ldots \times A_{nk}$, то правило (1.1) представляется в виде нечеткой импликации

$$R_k : A_k \to B_k, k = \overline{1,N}.$$

Правило R_k можно формализовать как нечеткое отношение, определенное на множестве $X \times Y$, т. е. $R_k \subseteq X \times Y$ — нечеткое множество с функцией принадлежности

$$\mu_{R_k}(x,y) = \mu_{A_k \to B_k}(x,y).$$

Модель Мамдани определяет задание функции $\mu_{A_k \to B_k}(x,y)$ на основе известных функций принадлежности $\mu_{A_k}(x)$ и $\mu_{B_k}(y)$ следующим образом [2; 6]:

$$\mu_{A_k \to B_k}(x,y) = T_1\left(\mu_{A_k}(x), \mu_{B_k}(y)\right) = \mu_{A_k}(x) \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(y), \qquad (1.2)$$

где $\overset{T_1}{*}$ — произвольная *t*-норма используется как параметр.

Ставится задача определить нечеткий вывод $B_k' \subseteq Y$ для системы, представленной в виде (1.1), если на входах — нечеткие множества $A' = A'_1 \times A'_2 \times \ldots \times A'_n \subseteq X$ или x_1 есть A'_1 и x_2 есть A'_2 и … и x_n есть A'_n с соответствующей функцией принадлежности $\mu_{A'}(x)$. В соответствии с обобщенным нечетким правилом *modus ponens* [4], нечеткое множество B'_k определяется композицией нечеткого множества A' и отношения R_k, т. е.

$$B'_k = A' \circ (A_k \to B_k)$$

или на уровне функций принадлежности

$$\mu_{B'_k}(y) = \sup_{x \in X} \left\{ \mu_{A'}(x) \overset{T_2}{*} \left(\mu_{A_k}(x) \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(y) \right) \right\}, \qquad (1.3)$$

где $\overset{T_2}{*}$ может быть любым оператором в классе *t*-норм. Сложность выражения (1.2) составляет $O\left(|X|^n \times |Y|\right)$.

2. Метод вывода с использованием нечеткого значения истинности

Для нечетких систем с одним входом, следуя (1.2), вывод описывается соотношением:

$$\mu_{B'_k}(y) = \sup_{x \in X} \left\{ \mu_{A'}(x) \overset{T_2}{*} \left(\mu_{A_k}(x) \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(y) \right) \right\}. \qquad (2.1)$$

Применяя правило истинностной модификации, получим [5]:

$$\mu_{A'}(x) = \tau_{A_k/A'}\left(\mu_{A_k}(x)\right),$$

где $\tau_{A_k/A'}(\cdot)$ — нечеткое значение истинности нечеткого множества A_k относительно A', представляющее собой функцию принадлежности совместимости $CP(A_k, A')$ A_k по отношению к A', причем A' рассматривается как достоверное [9]:

$$\tau_{A_k/A'}(v) = \mu_{CP(A_k,A')}(v) = \sup_{\substack{\mu_{A'}(x)=v \\ x \in X}} \left\{ \mu_{A_k}(x) \right\}, \quad v \in [0,1]. \qquad (2.2)$$

Перейдем от переменной x к переменной v, обозначив $\mu_{A_k}(x) = v$, получим:

$$\mu_{A'}(x) = \tau_{A_k/A'}\left(\mu_{A_k}(x)\right) = \tau_{A_k/A'}(v).$$

Тогда обобщенное правило *modus ponens* для систем с одним входом (2.1) можно записать в следующем виде:

$$\mu_{B'_k}(y) = \sup_{v \in [0,1]} \left\{ \tau_{A_k/A'}(v) \overset{T_2}{*} \left(v \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(y) \right) \right\}. \qquad (2.3)$$

3. Вывод выходного значения для базы правил на основе метода дефаззификации по среднему центру

При выполнении условия теоремы о декомпозиции многомерной функции принадлежности (1.2) и при использовании лингвистической связки "И" (1.3) примет вид

$$\mu_{B'_k}(y) = \min_{i=\overline{1,n}} \left\{ \sup_{x_i \in X_i} \left\{ \mu_{A'_i}(x_i) \overset{T_2}{*} T_1\left(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_{B_k}(y)\right) \right\} \right\}, \; k = \overline{1,N}. \qquad (3.1)$$

Выражение (3.1) можно записать через нечеткое значение степени истинности, как следует из (2.3), т.е. (3.1) приобретает вид:

$$\mu_{B_k^{'}}(y)=\min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i\in[0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A_i^{'}}(v_i)^{T_2}*\left(v_i^{T_1}*\mu_{B_k}(y)\right)\right\}\right\},\ k=\overline{1,N}. \qquad (3.2)$$

Выражение (3.2) характеризуется сложностью порядка $O(|v_i|\cdot|Y|\cdot n)$, т. е. соответствует полиномиальной.

Если $T_1=T_2=T$, то, учитывая свойство ассоциативности *t*-нормы, (3.2) можно преобразовать к виду

$$\mu_{B_k^{'}}(y)=\min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i\in[0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A_i^{'}}(v_i)^{T}*\left(v_i^{T}*\mu_{B_k}(y)\right)\right\}\right\}=$$

$$=\min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i\in[0,1]}\left\{(\tau_{A_{ik}/A_i^{'}}(v_i)^{T}*v_i)^{T}*\mu_{B_k}(y)\right\}\right\}=$$

$$=\min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i\in[0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A_i^{'}}(v_i)^{T}*v_i\right\}^{T}*\mu_{B_k}(y)\right\}=$$

$$=\min_{i=\overline{1,n}}\left\{\prod\nolimits_{A_{ik}/A_i^{'}}^{T}*\mu_{B_k}(y)\right\},\ k=\overline{1,n},$$

где

$$\prod\nolimits_{A_{ik}/A_i^{'}}=\sup_{v_i\in[0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A_i^{'}}(v_i)^{T}*v_i\right\} \qquad (3.3)$$

скалярная величина, является согласно определению [11] мерой возможности того, что A_{ik} соответствует входу $A_i^{'}$.

Рассмотрим нечеткие системы, введенные в разделе 1, и, учитывая вышеприведенные преобразования, получим четкое выходное значение, используя метод дефаззификации по среднему центру [6]. В этом случае выходное значение может быть вычислено по формуле

$$\overline{y}=\frac{\sum_{k=\overline{1,N}}\overline{y}_k\cdot\mu_{B_k^{'}}(\overline{y}_k)}{\sum_{k=\overline{1,N}}\mu_{B_k^{'}}(\overline{y}_k)}, \qquad (3.4)$$

где $\overline{y}$ — четкий выход системы, состоящей из N правил (1.1); $\overline{y}_k$ — центры функций принадлежности $\mu_{B_k}(y)$, $k=\overline{1,N}$, т. е. значения, в которых

$$\mu_{B_k}(\overline{y}_k)=\sup_{y\in Y}\left\{\mu_{B_k}(y)\right\}=1. \qquad (3.5)$$

Следуя выражениям (3.2) и (3.4), получаем

$$\overline{y} = \frac{\sum_{k=\overline{1,N}} \overline{y}_k \min\limits_{i=\overline{1,n}} \left\{ \sup\limits_{v_i \in [0,1]} \left\{ \tau_{A_{ik}/A_i'}(v_i) \overset{T_2}{*} \left(v_i \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(\overline{y}_k) \right) \right\} \right\}}{\sum_{k=\overline{1,N}} \min\limits_{i=\overline{1,n}} \left\{ \sup\limits_{v_i \in [0,1]} \left\{ \tau_{A_{ik}/A_i'}(v_i) \overset{T_2}{*} \left(v_i \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(\overline{y}_k) \right) \right\} \right\}}. \qquad (3.6)$$

Учитывая (3.5), имеем

$$\sup_{v_i \in [0,1]} \left\{ \tau_{A_{ik}/A_i'}(v_i) \overset{T_2}{*} \left(v_i \overset{T_1}{*} 1 \right) \right\} = \sup_{v_i \in [0,1]} \left\{ \tau_{A_{ik}/A_i'}(v_i) \overset{T_2}{*} v_i \right\}. \qquad (3.7)$$

Так как *t*-нормы по определению удовлетворяет граничному условию $T(a;1) = a$, то, подставляя (3.7) в (3.6), получим:

$$\overline{y} = \frac{\sum_{k=\overline{1,N}} \overline{y}_k . \min\limits_{i=\overline{1,n}} \left\{ \prod A_{ik}/A_i' \right\}}{\sum_{k=\overline{1,N}} \min\limits_{i=\overline{1,n}} \left\{ \prod A_{ik}/A_i' \right\}}. \qquad (3.8)$$

Таким образом, результат $\overline{y}$ при использовании метода дефаззификации по среднему центру при нечетких входах не зависит от нормы T_1.

Рассмотрим вывод, когда входные данные четкие [12], в этом случае:

$$\tau_{A_{ik}/A_i'}(v_i) = \delta(v_i) = \begin{cases} 1, \text{ если } v_i = v_{ik} \\ 0, \text{ если } v_i \neq v_{ik} \end{cases},$$

где $v_{ik} = \mu_{A_{ik}}(\overline{x}_i)$, $k = \overline{1,N}; i = \overline{1,n}$; $\overline{x}_i$, $i = \overline{1,n}$ — четкие входные значения, тогда

$$\Pi_{A_{ik}/A_k'} = \sup_{v_i \in [0,1]} \left\{ \delta(v_i) \overset{T_2}{*} v_i \right\} = v_{ik},$$

с учетом, что $T_2(1; v_{ik}) = v_{ik}$.

Соответственно, выходное значение вычисляется как

$$\overline{y} = \frac{\sum_{k=\overline{1,N}} \overline{y}_k . \min\limits_{i=\overline{1,n}} \{v_{ik}\}}{\sum_{k=\overline{1,N}} \min\limits_{i=\overline{1,n}} \{v_{ik}\}}. \qquad (3.9)$$

Таким образом, при четких входных данных и при методе дефаззификации по среднему центру выход системы не зависит от *t*-норм T_1 и T_2. Результат (3.9) согласуется с известными результатами [13]. Структура нечеткой системы, которая описывается соотношением (3.8), показана на рисунке 1.

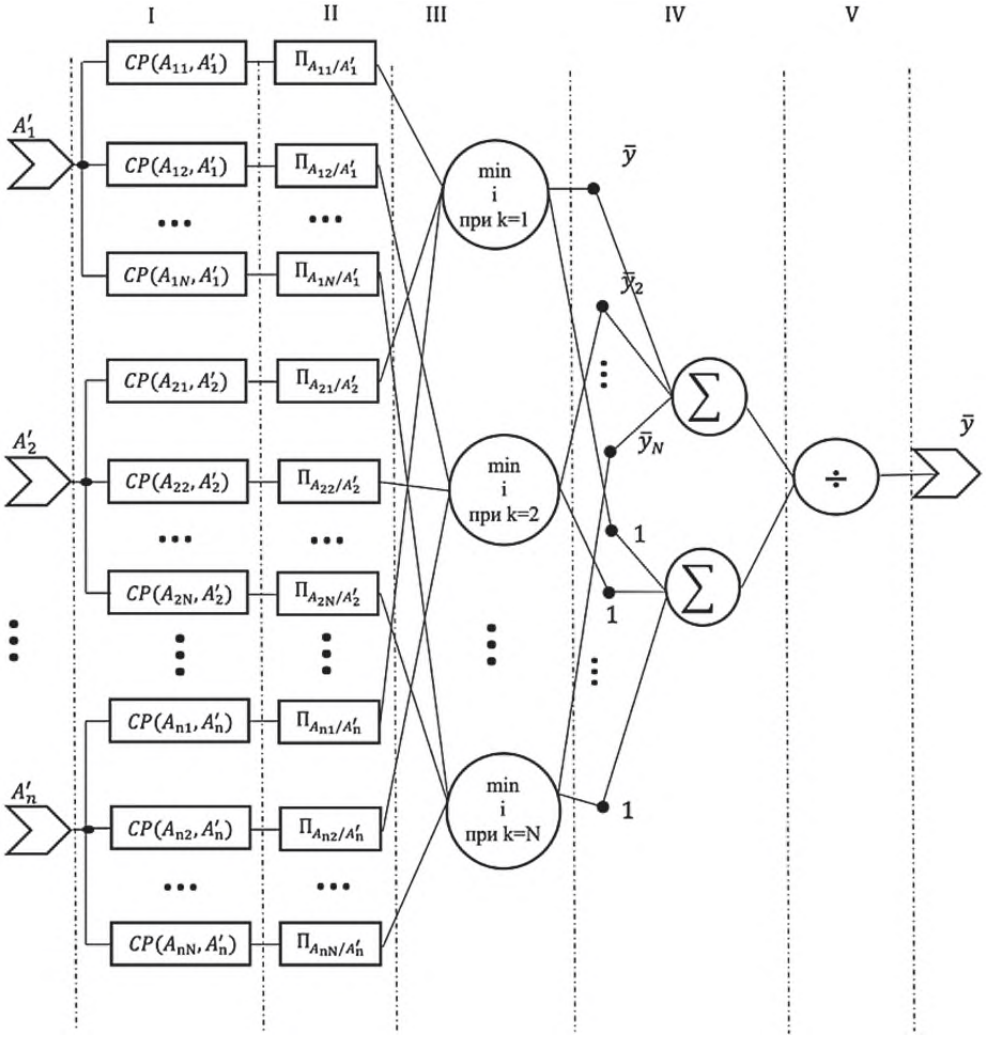


Рис. 1. Сетевая структура нечеткой системы, описываемой выражением (3.8)

4. Параллельная реализация

Вышеприведенный алгоритм был реализован с применением стандарта параллельного программирования *OpenCL*. Он включает в себя программный интерфейс (*API*) для координирования параллельных вычислений в среде разнородных процессоров и кроссплатформенный язык, используемый в определенном вычислительном окружении.

В написанной программе хост организует очередь выполнения команд. В очередь помещается нахождение соответствия каждого входа термам соот-

ветствующих лингвистических переменных, а также необходимые для этого вспомогательные вычисления. Затем по структуре, описанной на рисунке 1, полученные данные обрабатываются и выдается выход системы.

Для каждого входа требуется найти меру возможности того, что данный вход соответствует термам лингвистической переменной. Для этого сначала по заданной функций принадлежности терма на промежутке вычисляются ее численные значения с заданным шагом. Полученные значения хранятся в общем для переменной массиве на графическом процессоре (рис. 2). Функция принадлежности задана функцией $e^{-\frac{(x-a)^2}{2b^2}}$, *start* — начало отрезка, на котором определены термы.

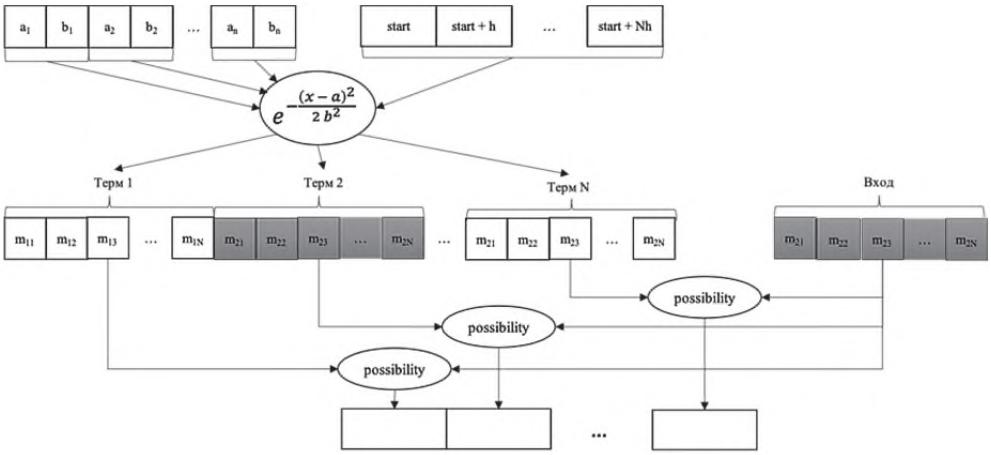


Рис. 2. Распределение данных в памяти графического процессора

Процедура вычисления соответствия входного терма заданному описывается блок-схемой, изображенной на рисунке 3. Аналитически данная процедура описывается выражениями (2.2) и (3.3). На вход процедуры поступает массив со значениями функции принадлежности *membershipArray*, индексы *inInd* и *ind* первых элементов входного и заданного термов соответственно, шаг *h, n* — размер массива, которым задана функция принадлежности одного терма. В начале процедуры создается пустой массив *resArray* для сохранения подходящих результатов. Затем создается цикл со значением *i*, которое меняется от 0 до 1 (включительно) с шагом *h.* Тело цикла начинается с вызова функции ядра *kernalCP* с размером вычислительной сетки *n.* Данная функция ядра возвращает массив длинный *n* с ненулевыми значениями функции принадлежности заданного терма, если значение функции принадлежности входного терма в той же точке с заданной точностью равно *i*. Из полученных значений выбирается максимум с помощью функции ядра *kernelFindMax,* которое поступает на вход функции *tNorma,* где второй параметр — *i.* Полу-

ченный результат записывается в массив *resArray*. После данного шага изменяется значение переменной *i* и начинается следующая итерация. После завершения цикла выбирается максимальное значение из массива *resArray,* которое и является результатом выполнения процедуры.

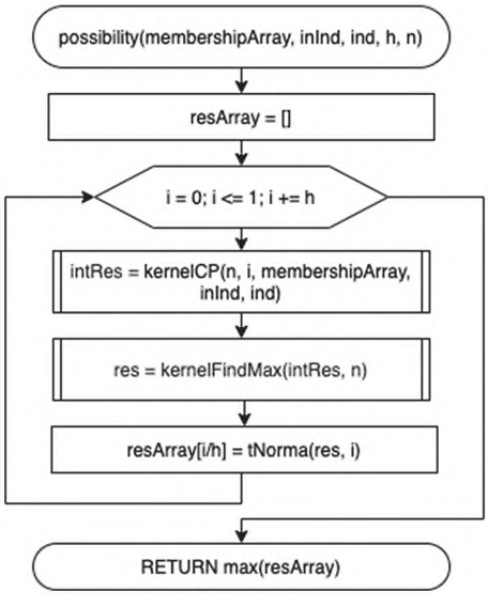


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления соответствия входного терма заданному

Для определения эффективности спроектированной и разработанной программы алгоритм был реализован без применения технологии параллельных вычислений. Также разработана система тестирования, которая генерирует тестовые данные по заданным параметрам, производит вычисление выходного значения программами с параллельной реализацией и без. Сравнение времени вычисления выходного значения в зависимости от количества входов отражено на рисунке 4, время выполнения программы с использованием *GPU* меньше в 50—100 раз.

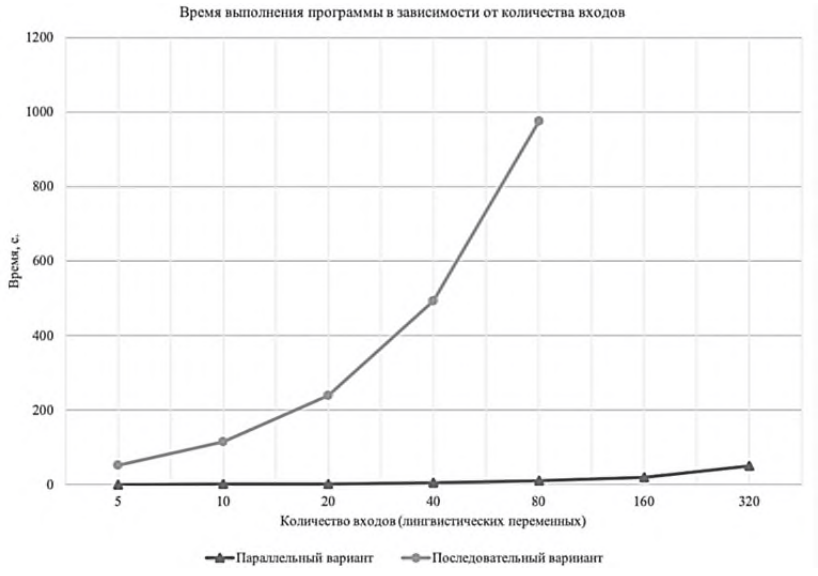


Рис. 4. График сравнения времени выполнения последовательного и параллельного вариантов

Заключение

Вывод на основе теоремы о декомпозиции делает возможным распространение подхода Мамдани для систем со многими нечеткими входами с полиномиальной вычислительной сложностью, независимо от используемых *t*-норм, изменение которых может быть использовано при обучении таких систем. Необходимо учитывать, что теорема о декомпозиции выполняется при условии, если моделирование лингвистической связки «И» в антецеденте правила (1.1) применена *t*-норма — *min*, а для лингвистической связки «ИЛИ» — *t*-конорма — *max*.

Получено соотношение выходных значений для нечетких систем типа Мамдани с использованием метода дефаззификации по среднему центру. Это соотношение применено для построения сетевой структуры, при реализации алгоритма для получения результатов с использованием параллельных вычислений и при разработке алгоритмов обучения их параметров будут преобразованы в нейро-нечеткие системы, что является задачей последующих исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-07-00030).

Список литературы

1. *Mamdani E.H.* Applications of Fuzzy Algorithm for Control a Simple Dynamic Plant // Proc. IEEE. 1974. Vol. 121, № 12. P. 1585—1588.

2. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009.

3. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ — Петербург, 2003.

4. *Zadeh L.A.* Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1973. Vol. SMC-3, № 1. P. 28—44.

5. *Борисов А.Н., Алексеев А.В., Крумберг О.А. и др.* Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. Рига : Зинатне, 1982.

6. *Zadeh L.A.* PRUF—a meaning representation language for natural languages // Int. J. Man-Machine Studies. 1978. Vol. 10. P. 395—460.

7. *Синюк В.Г.* Метод нечеткого вывода для одного класса систем MISO-структуры при нечетких входах / В.Г. Синюк, М.В. Панченко // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 4. С. 33—39.

8. *Alsina C., Frank M.J., Schweizer B.* Associative Functions: Triangular Norms and Copulas. Singapore : World Scientific, 2006.

9. *Larsen P.M.* Industrial applications of fuzzy logic control // International Journal of Man-Machine Studies. 1980. Vol. 12, № 1. P. 3—10.

10. *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М. : Радио и связь, 1990.

11. *Yager R.R.* Some relationships between possibility, truth and certainty // Fuzzy Sets and Systems. 1983. № 11. P. 151—156.

12. *Куценко Д.А., Синюк В.Г.* Косвенный метод нечеткого вывода для продукционных систем со многими входами // Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 45—47.

13. *Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М. : Физматлит, 2001.

К.И. Морев
Южный федеральный университет, Таганрог, Россия
e-mail: morev-ki@ya.ru

ИНТУИЦИОНИСТСКИЕ НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАФИКА

Введение

Работа посвящена повышению качества выполнения задачи сопровождения объектов современными робототехническими комплексами. Рассматривается алгоритм сопровождения объектов, основанный на представлении изображений в виде облаков особых точек, с применением интуиционистских нечетких множеств.

Разработанный метод учитывает геометрическую структуру сопровождаемого объекта. А истинность найденных сопоставлений особых точек изображений оценивается категориями близкими к «не совсем точно», «почти точно», «абсолютно точно».

Приведенные результаты экспериментов, а также оценки устойчивости и скорости работы алгоритма демонстрируют высокое качество выполнения задачи сопровождения объектов в видеопоследовательности.

1. Система мониторинга автомобильного трафика

Описываемая система предназначена для автоматического подсчета количества посещений автомобилями-посетителями целевого объекта. Работа рассматриваемой системы мониторинга основана на обработке сигналов, поступающих от детекторов. В роли детекторов выступают камеры видеонаблюдения. Камеры рассредоточены по территории объекта для обеспечения максимального охвата территории. Камеры высокого разрешения расположены у въезда на территорию для детального анализа въезжающих автомобилей. При анализе полученных изображений, системой автоматически формируются об-

© Морев К.И., 2020

разы въезжающих автомобилей-посетителей, ведется классификация типов кузовов этих автомобилей (легковые, крупные, грузовые), а также распознавание государственного регистрационного знака автомобиля.

Сбор информации о кодах регионов автомобилей-посетителей и о типе их кузовов представляет доступ к широким возможностям анализа посещений, следовательно, адаптации бизнес-процессов под динамическое изменение характера спроса на целевом объекте.

Для повышения удобства работы операторов охранного пункта для системы разрабатывается инструмент, позволяющий непрерывно выделять в динамике интересующий оператора объект (человек, автомобиль и т. п.) на видеопоследовательности. Например, обрамлять цветной рамкой, выбранный оператором, автомобиль-посетитель на протяжении процесса его передвижения по территории целевого объекта.

Предполагается решение задачи сопровождения объектов или трекинга. Задача заключается в определении координат сопровождаемого объекта в каждом кадре видеопоследовательности [1]. Для локализации сопровождаемого объекта в области кадра существует множество подходов, мы же используем представление изображений в виде облаков особых точек (далее — ОТ). В общем случае задача сопоставления двух облаков ОТ сводится к нахождению наиболее точных соответствий между описаниями окрестностей (направление градиента яркости, гистограмма яркости и т. д.) двух точек, принадлежащих различным изображениям [2; 3].

Предполагается решение задачи, поиска образа объекта на изображении при резких изменениях угла поворота этого объекта или проективных изменений. Для этого следует с высокой надежностью определять истинность соответствий между двумя ОТ разных изображений. Истинным называется соответствие, назначающее точке из одного изображения эту же точку в другом изображении, вне зависимости от ее смещения в пространстве, изменения яркости или размеров.

Для оценки истинности соответствий предполагается использование инструментов интуиционистской нечеткой логики.

2. Интуиционистские нечеткие множества

Основное отличие интуиционистских нечетких множеств (далее — ИНМ) от классических нечетких множеств — наличие степени неопределенности, помимо известных степеней принадлежности и непринадлежности [4]. Таким образом, ИНМ можно представить в виде [5]:

$$\{\langle x, \mu(x), \nu(x), \pi(x)\rangle \mid x \in E\},$$

где x — элемент множества E; $\mu(x)$ — степень принадлежности элемента ко множеству; $\nu(x)$ — степень непринадлежности; $\pi(x)$ — степень неопределенности.

Причем

$$\pi(x) = 1 - \mu(x) - \nu(x).$$

Основное условие ИНМ:

$$\mu(x) + \nu(x) \le 1, \quad (1)$$

и если

$$\mu(x) + \nu(x) = 1,$$

то мы имеем дело с классическим нечетким множеством — частным случаем ИНМ.

3. Предлагаемый подход

Далее будет рассматриваться устойчивый к изменениям угла поворота и изменениям масштаба алгоритм обнаружения искомого объекта в окне поиска (кадре видеопоследовательности) при помощи инструментов интуиционистской нечеткой логики. Традиционно задача сопровождения объекта с применением ОТ изображений разделяется на три этапа.

На первом этапе находятся ОТ. Результат выполнения этапа — положения ОТ и их размеры на изображениях эталона объекта и окна поиска.

На втором этапе описываются окрестности каждой из ОТ и вычисляются их ориентации (направления изменения яркости). Результат выполнения этапа — описание окрестности каждой точки, инвариантное к изменениям масштаба и угла поворота.

По результатам анализа существующих методов алгоритм BRISK был выбран как наиболее подходящий для работы при значительных изменениях масштаба, поворота и проекционных изменений в режиме реального времени на зашумленных изображениях.

Метод BRISK предполагает работу с бинарным дескриптором, что значительно ускоряет его работу, а специальная детерминированная структура шаблона для проведения тестов наделяет его высокими показателями устойчивости к изменениям угла поворота и масштаба наблюдаемой сцены [6].

Третий этап — сопоставление особых точек двух изображений, поиск соответствий. В новом методе предлагается использовать структуру ОТ изображения объекта (расстояния и углы между всеми ОТ изображения) и искать на другом изображении ОТ, расположенные в такой же структуре. Подобный подход значительно повышает устойчивость.

Так, пользуясь методом полного перебора, сравниваются описания окрестностей всех точек. Получаем количественную оценку разницы дескрипторов для всех ОТ двух изображений. Полученное множество пар соответствий фильтруется по относительному порогу:

$$f\left(dif\right)=1-\frac{dif}{desc_len},$$

$$\begin{cases} match = true, \text{ когда } f(dif) \geq 0.8, \\ match = false, \text{ когда } f(dif) < 0.8, \end{cases}$$

где *dif* — величина разницы описаний; *desc_len* — длина декскиптора, а match — проверяемое соответствие. Таким образом, из всего множества соответствий выбираются пары, различающиеся не более чем на 20 % своими описаниями.

Значение разности описаний точек используется при определении значения функции непринадлежности точек друг ко другу в паре. Вид функции непринадлежности приведен на рисунке 1, максимальное значение разницы между описаниями составляет 512 (длина используемого дескриптора). Функция непринадлежности:

$$v\left(x\right)=1-\frac{a\oplus b}{512},$$

где a — дескриптор ОТ в шаблоне объекта из соответствия x; b — дескриптор ОТ в окне поиска из того же соответствия; x — оцениваемое сопоставление.

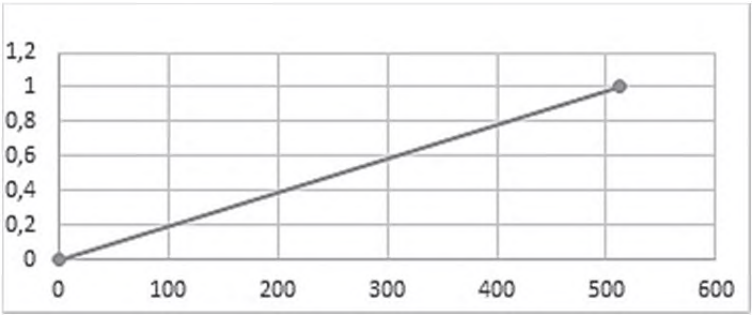


Рис. 1. Функция непринадлежности, $v(x)$

Далее, для прошедших порог соответствий вычисляется структура сопоставленных точек: случайно взятое соответствие назначается опорным, и каждой точке шаблона и окна поиска назначается расстояние и ориентация (угол) от соответствующей опорной точки.

Расстояние между точками определяется как Эвклидово:

$$D=\sqrt[2]{\left(X_i-X_j\right)^2+\left(Y_i-Y_j\right)^2},$$

где D — величина расстояния; i и j — индексы различных точек, а X и Y — координаты центров ОТ в пиксельном представлении изображений.

Угол между точками определяется как угол между вектором, соединяющим две точки (оцениваемую и опорную), и положительным направлением оси *Ox*. За начало вектора принимается опорная точка.

Так для обеих точек каждого прошедшего фильтрацию соответствия имеется расстояние и ориентация. Исходя из предположения, что истинное соответствие соединяет одну и ту же точку одного объекта на двух различных сценах, справедливо предположить, что при перемещении объекта в окне поиска, изменении его масштаба и угла поворота все истинные соответствия образуют кластер одинаково перемещающихся в пространстве точек. Структура точек не нарушится, и следовательно, дистанции и ориентации точек истинных соответствий будут изменяться прямо пропорционально. В идеальном случае истинные соответствия образуют кластер, для которого будет справедливо:

$$\begin{cases} \dfrac{M_1 dist_{obj}}{M_1 dist_{win}} = \dfrac{M_2 dist_{obj}}{M_2 dist_{win}} = \ldots = \dfrac{M_n dist_{obj}}{M_n dist_{win}}, \\ M_1 angle_{obj} - M_1 angle_{win} = \ldots = M_n angle_{obj} - M_n angle_{win}, \end{cases}$$

где $M_i dist_{obj}$ и $M_i dist_{win}$ — значения дистанций ОТ объекта и окна поиска соответственно из *i*-го сопоставления, а $M_i angle_{obj}$ и $M_i angle_{win}$ — значения угла между ОТ.

Таким образом, оценивая изменения ориентации и дистанции для истинных соответствий, определяется изменение угла поворота объекта и его масштаба. Изменение масштаба определяется как отношение дистанции между ОТ в шаблоне к дистанции в окне поиска. А поворот как разница между ориентацией точки в шаблоне и окне поиска. После нахождения истинных соответствий и определения параметров изменения объекта локализация его центра в окне поиска не составляет особого труда.

Однако в реальных условиях приходится работать с сильно зашумленными данными. Шум обусловлен особенностями работы детекторов системы, погрешностями суб-пиксельной локализации центра ОТ и ошибками при сравнении окрестностей ОТ. Исходя из предположения о нормальном распределении шума, истинными считаются соответствия, для которых изменения масштаба и ориентации будут находится в пределах:

$$\begin{cases} \delta_{scale} \pm \sigma_{scale} \\ \delta_{angle} \pm \sigma_{angle} \end{cases},$$

где δ — среднее значение, а σ — среднеквадратичное отклонение (далее — СКО) для распределения изменений масштаба (*scale*) и угла поворота (*angle*).

То есть, получив изменения дистанции и угла поворота для всех проверяемых соответствий, считается среднее значение δ и СКО σ для выборки. При отклонении изменения масштаба или ориентации соответствия от сред-

него значения более чем на σ, соответствие считается ложным. А относительное отклонение, меньшее σ, считается степенью принадлежности. Таким образом, функция принадлежности или степень истинности имеет вид

$$\mu(x) = \max(1 - \frac{|dist - \delta_{dist}|}{\sigma_{dist}}, 1 - \frac{|angle - \delta_{angle}|}{\sigma_{angle}}),$$

где *dist* — изменение дистанции OT; *angle* — изменение ее угла поворота; δ_{scale} и δ_{angle} — средние значения распределения изменение масштаба и угла поворота соответственно, а σ_{scale} и σ_{angle} — соответствующие СКО. На рисунке 2 отображена функция принадлежности.

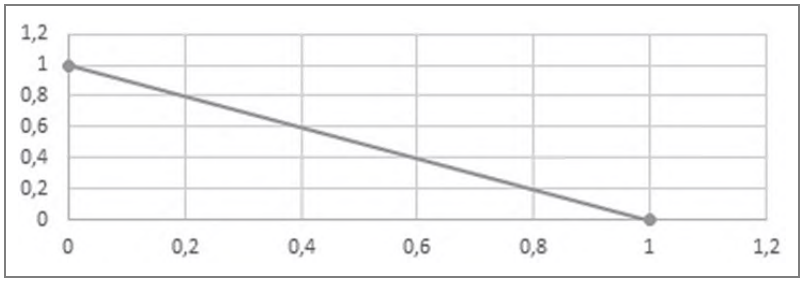
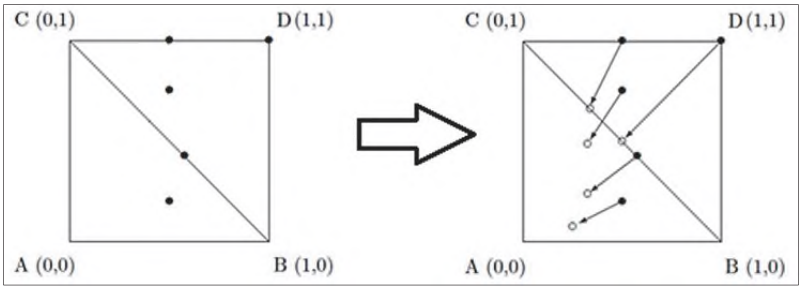


Рис. 2. Функция принадлежности, $\mu(x)$

И так для каждого соответствия определяется степень истинности и ложности.

Однако, согласно свойству (1) интуиционистского нечеткого множества, значения степени принадлежности и непринадлежности в сумме не должны превышать единицу. А при использовании приведенных выше функций соответствия и несоответствия возможны случаи нарушения упомянутого условия (рис. 3, *а*). Разрешение возникающей проблемы дано далее.



а *б*

Рис. 3. Процесс нормализации ИНМ:
а — интерпретация ИНМ при заданных нам функциях $\mu(x)$ и $\nu(x)$;
б — преобразованное в корректную форму ИНМ

Для решения этой проблемы применялся подход, предлагаемый Атанасовым К., описанный в [7]. Подход заключается в переходе от единичного квадрата, изображенного на рисунке 3, *а*, к классической треугольной интерпретации интуиционистского нечеткого множества (рис. 3, *б*).

Переход осуществляется при помощи непрерывного биективного преобразования:

$$F(n,m)=\begin{cases}\langle 0,0\rangle, \text{ при } m=n=0,\\ \left\langle \dfrac{m^2}{m+n}, \dfrac{mn}{m+n}\right\rangle, \text{ при } m,n\in[0,1] \text{ и } n\geq m \text{ и } n+m\neq 0,\\ \left\langle \dfrac{mn}{m+n}, \dfrac{m^2}{m+n}\right\rangle, \text{ при } m,n\in[0,1] \text{ и } n\leq m \text{ и } n+m\neq 0.\end{cases}$$

Далее, применяя приведенное выше преобразование к полученным значениям степени принадлежности и непринадлежности, вычисляются оценки соответствий между парами точек. В конечном итоге, итеративно назначая опорным каждое соответствие, выявляются пары взаимосоответствующих точек, сохранивших структуру в наибольшем количестве итераций. Так определяются истинные соответствия, а также параметры изменения масштаба, угла поворота и смещения объекта.

Следующим шагом, для осуществления нечеткого вывода, необходимо обработать полученные оценки соответствий для определения их истинности и ложности [6; 8]. Для этого вводятся следующие правила: А) Если $\mu(x) > \nu(x) + \pi(x)$, то соответствие истинно; Б) Если $\nu(x) \geq \mu(x) + \pi(x)$, то соответствие ложно; В) Если $\mu(x) + \pi(x) > \nu(x)$, то проводить дополнительную проверку.

При выполнении правила «В» из вышеприведенного списка, необходимо провести дополнительное исследование окрестности точки окна поиска из проверяемой пары. Причем здесь возможны два различных пути развития.

Случай 1:

$$\mu(x)+\nu(x)<\pi(x).$$

Это говорит о том, что структура особых точек сохраняется слабо, а окрестности совпадают сильно, что, в свою очередь, указывает либо на ложность соответствия, либо на изменение формы объекта, нарушившее структуру точек (например, проективное преобразование с изменением параллельности прямых). Для устранения неопределенности рассматриваются все точки в радиусе $R = 0{,}25m$, где m — наибольший габарит объекта (с применением масштаба, полученного после оценки сохранения структуры осо-

бых точек). Если больше половины особых точек, находящихся в оцениваемых областях, соответствуют друг другу — совпадение считается истинным, а объект измененным в окне поиска.

Случай 2:

$$\mu(x)+\nu(x)>\pi(x),$$

т. е. значение степени соответствия стремится к 1, а значение степени несоответствия одновременно со значением степени неопределенности — к нулю, что указывает на сохранение структуры объекта при разности окрестностей точек из оцениваемой пары. Подобная ситуация возникает при перекрытии объекта преградами (кроны деревьев, стены, элементы ландшафта и т. д.). В этом случае для устранения неопределенности производится повторный поиск точки объекта из оцениваемой пары. Радиус области поиска назначается $R = 0{,}1m$, где m — также наибольший габарит объекта. Если в указанной окрестности обнаружится особая точка, соответствующая точке объекта не менее чем на 80 %, заменить точку объекта из оцениваемой пары новой, только что найденной точкой. Иначе соответствие считать ложным.

Подробное описание обработки вышеупомянутых случаев описано в [8].

Разработанный метод сопровождения объектов был реализован на языке программирования C++. С целью оценки устойчивости и скорости работы предлагаемого метода проводились эксперименты. Используемая платформа: оснащена процессором Intel Core i7-920 тактовой частоты 2,66 ГГц и объемом оперативной памяти 4 Гб. Экспериментальное видео состояло из вращающегося по часовой стрелке изображения с шагом 5 град./кадр и увеличивался в масштабе на 16 % за кадр. Размер сопровождаемого объекта составлял 150 пикселей в ширину и 100 в высоту. А размеры окна поиска — 768×768 пикселей. В ходе экспериментов установлено, что средняя скорость поиска объекта по всему кадру — 0,2 с. Однако при уменьшении окна поиска до 300×300 пикселей достигается работа со скоростью 0,05 с, что соответствует скорости обработки 25 кадр/с. Полученные оценки устойчивости метода приведены в таблице. Более детальное представление результатов экспериментов представлено в [8].

Характеристики устойчивости метода сопровождения

Параметр	Оценка
Допустимые изменения угла поворота объекта	0° — 360°
Допустимые изменения масштаба объекта	Уменьшение и увеличение более чем в 2 раза
Допустимые изменения положения объекта	В пределах всего кадра

Заключение

Представленный алгоритм сопоставления облаков ОТ не требует высоких вычислительных мощностей, что позволяет обеспечить его работу в режиме реального времени. А качественная работа метода на зашумленных, низкокачественных изображениях подтверждает возможность его применения в современных системах технического зрения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00197.

Список литературы

1. *Тассов К.Л., Бекасов Д.Е.* Обработка перекрытий в задачах отслеживания объектов в видеопотоке // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 6 (18). С. 1—18.

2. *Bay H., Tuytelaars T., Gool L.* SURF: Speeded up robust features // European Conference on Computer Vision. 2006. P. 404—417.

3. *Salahat E., Qasaimeh M.*, Recent advances in feature extraction and description algorithms: Hardware designs and algorithmic derivatives // Computer Vision: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. 2018.

4. *Atanasov K.* On intuitionistic fuzzy sets theory. Springer. 2012.

5. *Atanassov K.* Intuitionistic fuzzy sets // Fuzzy Sets and Systems. 1986. № 20 (1). P. 87—96.

6. *Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.* BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints // Computer Vision (ICCV). 2011. P. 2548—2555.

7. *Atanassov K.* Remark on equalities between intuitionistic fuzzy sets // Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets. 2010. № 16 (3). P. 40—41.

8. *Морев К.И.* Метод сопоставления особых точек изображений для задач трекинга, основанный на интуиционистской нечеткой логике // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 282—295.

В. С. Мошкин[1], Д. С. Аверин[2], Е. А. Горлова[3], М. В. Масленникова[4], П. В. Платов[5]

Ульяновский государственный технический университет, Россия

e-mail: [1]postforvadim@ya.ru, [2]awerin960@yandex.ru, [3]gorlova.k@mail.ru, [4]mashandik@mail.ru, [5]platov@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОНТОЛОГИИ ПРИ ПОИСКЕ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ЗАПРОСОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ К АРХИВУ

Введение

Рост электронного документооборота требует новых подходов к поиску информации в большом массиве данных. Количество файлов на компьютере пользователя может достигать нескольких сотен тысяч и найти нужный в

© Мошкин В. С., Аверин Д. С., Горлова Е. А., Масленникова М. В., Платов П. В., 2020

общей массе бывает совсем не просто. Стандартный поисковик Windows не всегда работает быстро и обладает весьма скудным функционалом. В данный момент активно ведутся поиски новых более эффективных методов поиска данных, которые смогут достаточно быстро предоставить пользователю необходимую информацию по запрошенному ресурсу. Особенно в таких системах нуждается государственный сектор, но и обычным пользователям усовершенствованные поисковые системы позволяют повысить эффективность в разы за счет меньшего количества времени, затрачиваемого на поиск информации в сети.

1. Постановка задачи

Большинство поисковиков, созданных для работы с базой данных документов, не позволяют использовать поиск с учетом персонализации пользователя. Таким образом, не учитывается важная составляющая любого поиска — контекст поиска.

Основная цель персонализации поиска — предоставить пользователям наиболее актуальную и полезную информацию. По предыдущим запросам и истории поисковая система проанализирует интересы и на основе этих данных настраивает результаты поиска.

Необходимо создать систему, позволяющую проводить поиск по базе данных документов с учетом предыдущих запросов пользователя, т. е. создать систему, учитывающую контекст поиска пользователя.

2. Обзор аналогов

В качестве аналогов рассмотрим сайты научных библиотек университетов города Ульяновска.

1. Поисковая система научных трудов Ульяновского государственного технического университета [1] предоставляет мощный инструмент поиска научных трудов. Позволяет искать документы по множеству параметров, таких как автор, ключевые слова, дата поступления, год выпуска и прочее. Система не учитывает результаты предыдущих запросов пользователя.

2. Электронная библиотека полнотекстовых учебных и научных изданий Ульяновского государственного технического университета [2] предоставляет механизмы поиска документов по ключевым словам и списку атрибутов в документе. Не предполагает авторизацию пользователей и не персонализирует поиск.

3. Электронная библиотека Ульяновского государственного университета [3] предоставляет доступ к базе данных документов УлГУ, дает возможность составлять сложные запросы к электронному архиву и искать по нескольким полям документа. Не предполагает персонализацию.

3. Реализация

Для реализации программного поиска необходимо разработать представление предметной области. Информацию о запросах пользователей и предметной области архива документа можно отобразить двумя подонтологиями — онтологией запроса и онтологией предметной области. В качестве предметной области документов выбрано прикладное программирование. Формально модель онтологии определим следующим образом:

$$O = \left\langle O^A, O^K, R \right\rangle, \tag{1}$$

где O^K — онтология запросов; O^A — предметной области; R — отношения между компонентами онтологии.

Онтологию предметной области запишем в виде кортежа:

$$O^A = \left\langle C, W, R^A \right\rangle, \tag{2}$$

где C — множество классов предметной области; W — множество понятий, относящихся к предметным областям; R^A— множество отношений.

Детальная структура онтологии предметной области представлена на рисунке 1.

Рис. 1. Онтология предметной области

Онтологию запросов запишем в виде кортежа:

$$O^K = \left\langle K, R^K \right\rangle, \tag{3}$$

где K — множество классов, определяющих запросы пользователей; R^K — множество отношений.

Онтология запроса включает в себя такие классы предметной области, как: документ — класс, описывающий документ, который ищет пользователь; запрос — класс, описывающий запрос пользователя; пользователь — класс, описывающий пользователя; стоп-слова — класс, описывающий стоп-слова, которые будут игнорироваться системой; термин — класс, описывающий термин, по которому происходит поиск.

Обобщенная онтология с настроенными связями изображена на рисунке 2.

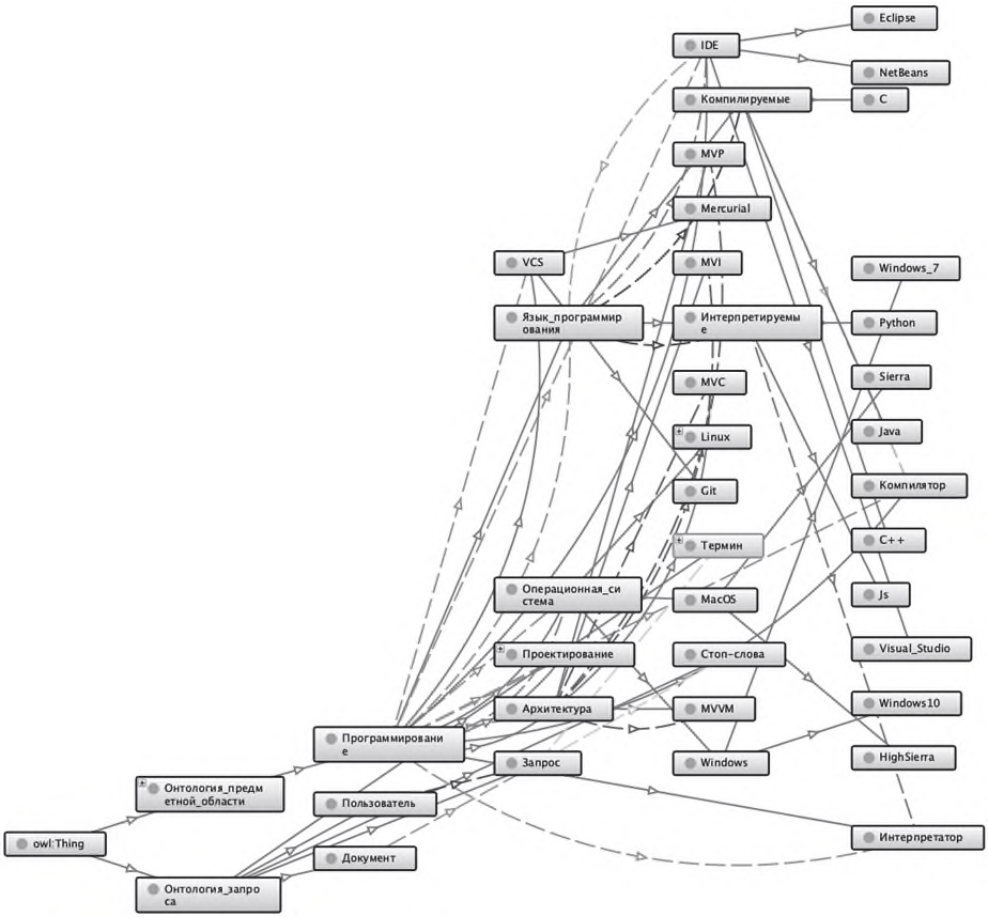


Рис. 2. Общий вид онтологии

После разработки онтологии была разработана адаптированная ER-диаграмма для обобщения онтологии. Выделены следующие таблицы: Document — отражает сущность «Документ» и включает в себя поля номера и наименования документа; KeyWord — отражает сущность «Ключевое слово» и содержит слово, номер документа; User — отражает сущность «Пользователь» и включает в себя поля уникальный номер пользователя, его имя и пароль; UserRequest — отражает сущность «Запрос», содержит поля текст запроса, номер пользователя и номер документа.

Также есть вспомогательные таблицы для реализации отношения многие ко многим — это DocumentKeyWord и KeyWordUserRequest. ER-диаграмма представлена на рисунке 3.

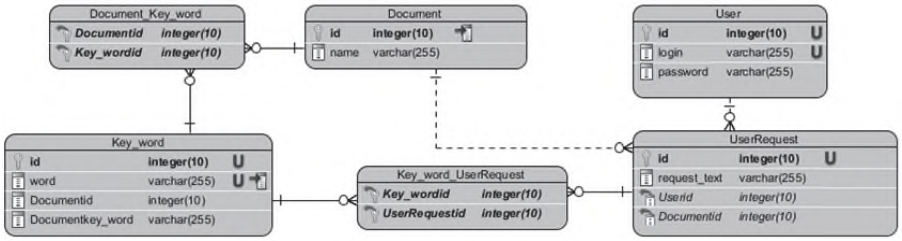


Рис. 3. ER-диаграмма системы

4. Работа программы

Работа программы начинается с авторизации пользователя. Затем пользователю необходимо ввести запрос в поисковую строку и нажать кнопку «search». При вводе запроса система ищет запись в истории запросов данного пользователя.

Если запись найдена, то она содержит в себе ключевые слова запроса и документов, с которыми ранее работал пользователь по этому запросу. По ключевым словам производится дальнейший поиск документов. Если запись о текущем запросе не найдена в истории, то она создается, запрос разбивается на ключевые слова и осуществляется поиск документов по ключевым словам. Если пользователь работает с каким-то документом в рамках текущего запроса, то все ключевые слова, принадлежащие документу, добавляются в список ключевых слов по данному запросу.

Допустим, пользователь вводит в поле поиска запрос java (рис. 4), выбирает интересующую его книгу «Java Библиотека для профессионалов», выбирает том 1 (рис. 4) и том 2 (рис. 5).

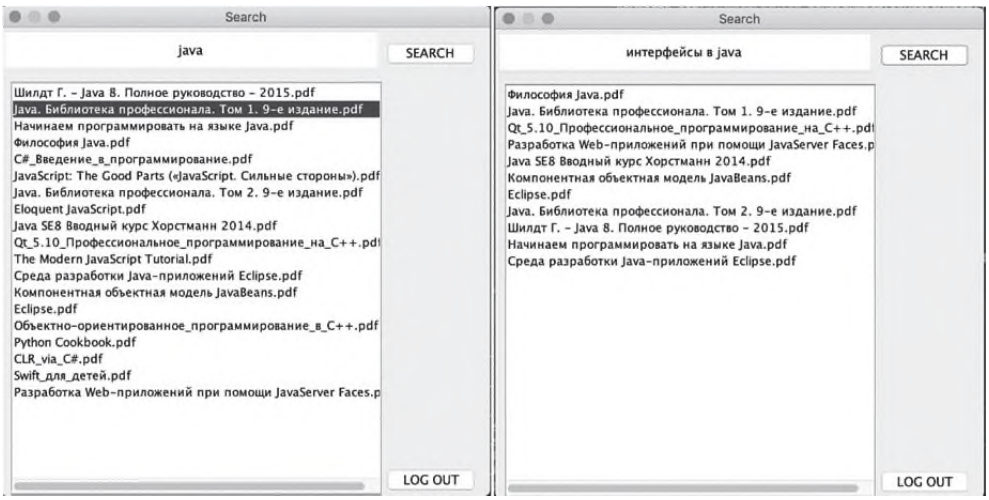


Рис. 4. Результаты по запросу java и «интерфейсы в java»

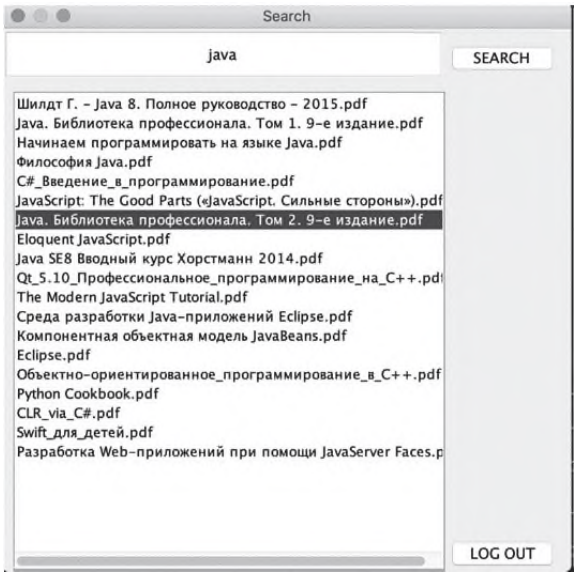


Рис. 5. Выбор книги из результата выборки

После этого пользователь решает поискать книги по запросу «интерфейсы в java» и видит там книги из предыдущего запроса (так как они имеют общие ключевые слова), это также отлично видно на рисунке 4.

При вводе запроса, содержащего только слово «наследование», система понимает, что скорее всего пользователь будет иметь в виду наследование в языке java и предложит выборку, изображенную на рисунке 6.

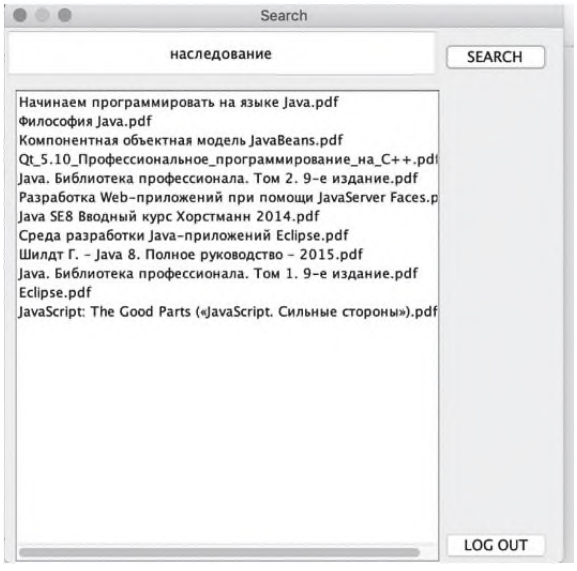


Рис. 6. Результат поиска при запросе «наследование»

Аналогичный результат со ссылкой на язык программирования java пользователь получит, если введет запрос «базы данных в языке программирования» (рис. 7).

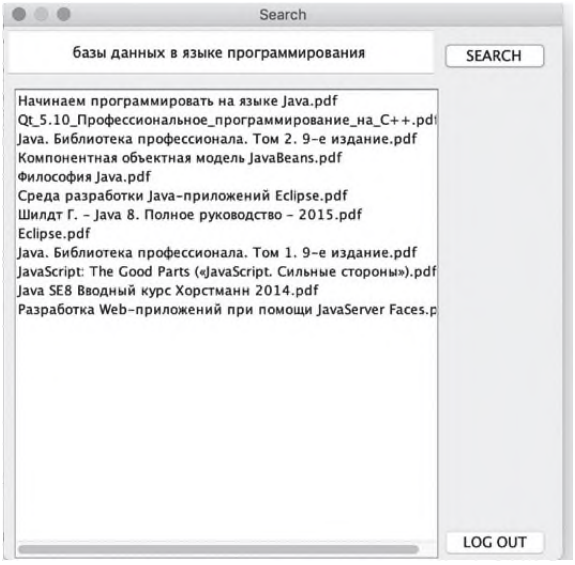


Рис. 7. Результат поиска запросе «базы данных в языке программирования»

Заключение

В работе рассмотрена проблема неперсонализированного поиска по электронным архивам документов. Изучены аналоги, проведен анализ предметной области, построена онтология.

Создана система, позволяющая проводить персонализированный поиск по базе данных документов различных предметных областей. На основе онтологии разработана система, адаптирующая созданную технологию на стек технологии для реализации системы, проведены эксперименты, доказывающие работоспособность и пригодность системы для использования в больших системах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №18-47-730035, 18-47-732007 и 19-07-00999).

Список литературы

1. *Сайт* Научная библиотека УлГТУ. URL: http://lib.ulstu.ru/

2. *Сайт* Электронная библиотека полнотекстовых учебных и научных изданий УлГТУ. URL: http://venec.ulstu.ru/lib/

3. *Сайт* Электронная библиотека УлГУ. URL: http://lib.ulsu.ru/

4. *Spring.io* Документация по фреймворку Spring. URL: https://spring.io

5. *PostgeSQL* Документация по базе данным PostgreSQL. URL: https://www.postgresql.org

6. *Создание* онтологии в Protege 5.0. URL: https://habr.com/ru/post/277413/

7. *Google* Java Style Guide. URL: https://google.github.io/styleguide/javaguide.html

8. *Open* Source management tool for Postgres. URL: https://www.pgadmin.org

9. *Работа* с csv файлами в java. URL: https://techcave.ru/posts/99-rabotaem-s-failami-csv-v-java-s-ispolzovaniem-biblioteki-opencsv.html

10. *Типы* связей в реляционных базах данных. URL: http://office-menu.ru/uroki-sql/41-tipy-svyazej-v-relyatsionnykh-bazakh-dannykh

Е.Н. Надеждин[1], Д.А. Шаранов[2]

[1]Институт информационных наук и технологий безопасности РГГУ, Москва, Россия

[2]Шуйский филиал ИвГУ, Россия

e-mail: [1]en-hope@yandex.ru, [2]dima.shar55@mail.ru

НЕЧЕТКИЙ КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕТЕВЫХ АТАК

Введение

Тенденции ускоренного развития современной интернет-инфраструктуры оказали значительное влияние на повседневную жизнь современного общества. Сетевые технологии позволяют реализовать совместное использование информации и сервисов большинством пользователей, а интеграция Интернета с беспроводными и мобильными технологиями обеспечила значительный приток подключаемых устройств.

За последнее десятилетие увеличилась зависимость организаций от сервисов и возможностей Интернета, соответственно становится крайне важным обеспечение информационной безопасности (далее — ИБ) от внешнего вторжения.

В настоящее время существует три принципиально различных вида кибератак, которые имеют целью получение доступа к конфиденциальным данным, нарушение целостности передаваемых сообщений и создание условий, при которых пользователи не могут получить доступ к информационным ресурсам (отказ в обслуживании). Среди современных информационных угроз сетевые атаки типа DoS и DDoS считаются самыми опасными и разрушительными для информационной инфраструктуры организаций различных форм собственности. На текущий момент времени такие атаки могут носить заказной характер и проводиться на предприятия и организации независимо от сфер деятельности. По данным статистики, DDoS-атаки занимают существенное место на теневом рынке: недобросовестная конкурентная борьба, махинации на электронных биржах и киберспортивных мероприятиях, шантаж и вымогательство под угрозой проведения атаки на ресурсы организации. Сегодня существует множество методов противодействия DDoS атакам.

© Надеждин Е. Н., Шаранов Д. А., 2020

Наиболее перспективными для реализации в составе систем комплексной защиты информации являются интеллектуальные методы обнаружения и идентификации сетевых атак [1; 2].

Выполненные исследования показали, что известные в настоящее время научные разработки и модели средств обнаружения информационных атак обладают рядом недостатков [2; 3]. Среди них необходимо выделить: относительно низкое качество идентификации аномалий в условиях скоростного сетевого трафика; сложность реализации традиционных методов машинного обучения; отсутствие эффективных механизмов контроля ошибок обнаружения первого и второго рода и др.

Проблема синтеза перспективных алгоритмов и программных средств идентификации сетевых атак усугубляется недостаточным развитием теории и методологии проектирования интеллектуальных средств защиты информации, а также методов анализа их проектной эффективности. Все это свидетельствует о необходимости дальнейшего развития методологии проектирования интеллектуальных средств сетевой защиты с учетом комплексного подхода задачам анализа и оценки проектной эффективности при создании таких средств. Как показали наши исследования, многие прикладные вопросы в этой проблеме могут быть решены на основе метода нечеткого когнитивного моделирования.

Анализ проектного риска создания программных средств идентификации сетевых атак с использование нечетких когнитивных карт

Постановка задачи. По материалам детального изучения предметной области и всей доступной информации о проектировании программных средств идентификации сетевых атак требуется построить многофакторную когнитивную модель и затем на ее основе оценить весовое влияние каждого фактора в отдельности и их совокупности на величину проектного риска в интересах дальнейшей корректировки стратегии проектирования.

Формально нечеткую когнитивную карту (далее — НКК) определим как кортеж из трех множеств:

$$K = (E, F, W), \tag{1}$$

где E — конечное множество вершин (концептов); F — конечное множество связей между концептами; W — конечное множество весов этих связей [4; 6; 7]. Эти связи характеризуют степень (силу) влияния концептов друг на друга и задаются с помощью нечетких весов из диапазона [–1; 1]:

$$W = \{w_{ij}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, n}\}. \tag{2}$$

В целях формализованного решения задачи анализа проектных рисков множество концептов $E_i, i = \overline{1, n}$ разделим на четыре непересекающихся подмножества (табл. 1):

1. Множество деструктивных факторов (угроз):

$$A^1 = (A_1^1, ..., A_m^1). \quad (3)$$

2. Множество активов (ресурсов):

$$A^2 = (A_1^2, ..., A_r^2). \quad (4)$$

3. Множество промежуточных факторов (показателей):

$$A^3 = (A_1^3, ..., A_d^3). \quad (5)$$

4. Множество целевых факторов:

$$A^4 = (A_1^4, ..., A_p^4). \quad (6)$$

При этом необходимо выполнение условия:

$$E = E^1 \cup E^2 \cup E^3 \cup E^4. \quad (7)$$

Таблица 1

№ п/п	Расшифровка	Обозначение
	1. Угрозы	E^1
1	Недостаток ресурсной базы	E_1^1
2	Снижение репутации проектной организации	E_2^1
3	Ухудшение финансирования проекта	E_3^1
4	Противоречивость требований технического задания	E_4^1
5	Отсутствие информации о достижениях конкурирующих фирм в области идентификации сетевых атак	E_5^1
6	Потенциальный рост новых видов сетевых атак	E_6^1
	2. Активы ПКО	E^2
7	Научно-технический и технологический задел	E_1^2
8	Активный маркетинг	E_2^2
9	Затраты на автоматизацию производства	E_3^2
10	Интеллектуализация технологий	E_4^2
11	Контроль и ограничение доступа к программному коду	E_5^2
12	Страхование рисков	E_6^2
	3. Целевые факторы	E^3
13	Комплексный показатель «Эффективность — качество — стоимость»	E_1^3
14	Конкурентоспособность программного продукта	E_2^3

На рисунке 1 представлена НКК механизма формирования проектного риска. Связи между однородным концептами выделены пунктирными линиями. Концепты второй группы представляют собой активы проектно-конструкторской организации (далее — ПКО), которые замкнуты на целевые факторы E_1^3 и E_2^3. При оообоснованном использовании ресурсы должны стабилизировать эти показатели.

Исследование с применением нечеткого когнитивного подхода необходимо применять в три этапа. В качестве инструмента для проведения расчетов было использовано программное средство для анализа факторного пространства проектного риска с применением нечетких когнитивных карт, разработанное в визуальной среде программирования Qt 5.8 на языке C++.

1. На первом этапе на основе метода экспертных оценок определяется состав концептов $E_i, i = \overline{1,n}$ и веса связей $W = \{w_{ij}, i = \overline{1,N}, j = \overline{1,n}\}$ между ними (табл. 1, 2, рис. 1). Элементы когнитивной матрицы (табл. 2) определялись как усредненные по числу экспертов оценки интенсивностей влияния концептов друг на друга. В полученной НКК представлены наиболее важные, непосредственные связи между концептами.

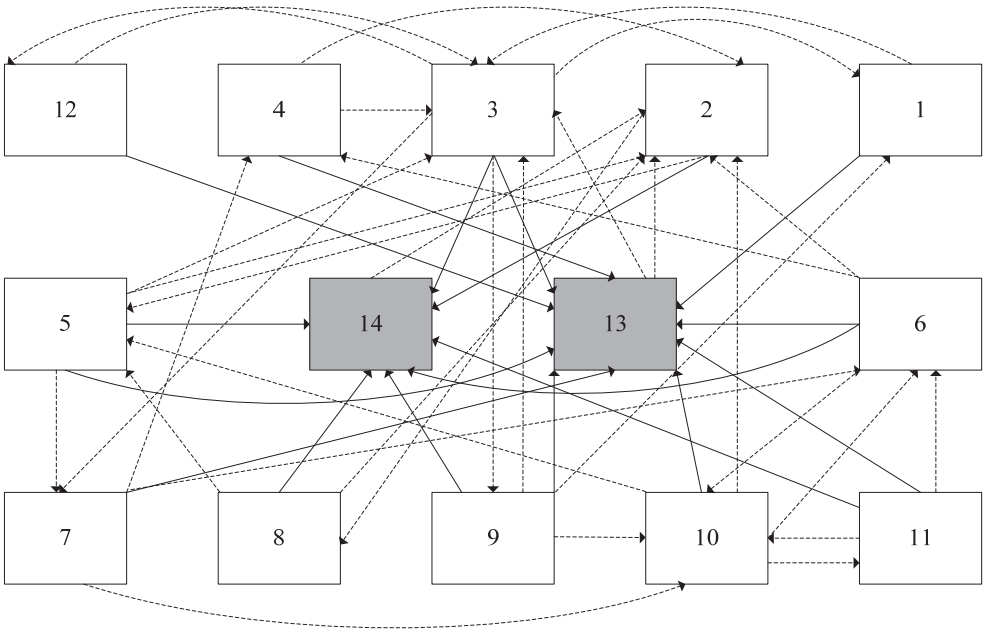


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта

2. На втором этапе проводится количественная оценка опосредованного взаимовлияния концептов. Для этого на первом шаге выполняют операцию

транзитивного замыкания когнитивной матрицы, из множества известных способов в работе был использован алгоритм, представленный в работах [4, с. 99, 7]:

1) от исходной когнитивной матрицы переходят к когнитивной матрице положительных связей R размерностью $(2 \cdot n \times 2 \cdot n)$ на основе процедуры замены:

$$\text{если } w_{i,j} > 0, \ mo \ r_{2i-1,\,2j-1} = w_{i,j}, \quad r_{2i,\,2j} = w_{i,j}; \tag{8}$$

$$\text{если } -w_{i,j} < 0, \ mo \ r_{2i-1,\,2j} = -w_{i,j}, \quad r_{2i,\,2j-1} = -w_{i,j}.$$

Остальные элементы матрицы R принимают нулевое значение.

2) Определяют транзитивное замыкание нечеткого отношения R в соответствии с выражением:

$$\widetilde{R} = \bigcup_{i=1}^{n} R^i = R \cup R^2 \cup \ldots \cup R^n, \ \text{где } R^2 = R \times R. \tag{9}$$

Произведение нечетких отношений вычисляют согласно процедуре:

$$\text{если } D = A \times B, \text{ то } d_{i,j} = \max_{k=1,\ldots n} a_{i,k} \cdot b_{k,j}, \quad i,j = 1,\ldots,n. \tag{10}$$

3) От вспомогательной матрицы $\widetilde{R}$ переходят к транзитивно замкнутой когнитивной матрице V, элементами которой будут пары $(v_{i,j}, \widetilde{v}_{i,j})$, где $v_{i,j}$ и $\widetilde{v}_{i,j}$ характеризуют соответственно силу положительного и отрицательного влияния *i*-го концепта на *j*-й концепт:

$$v_{i,j} = \max\,(r_{2i-1,2j-1}, r_{2i,2j}); \ \ \tilde{v}_{i,j} = -\max\,(r_{2i-1,2j}, r_{2i,2j-1}). \tag{11}$$

Таблица 2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	0,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–0,63	0
2	0	0	0	0	0,25	0	0	–0,55	0	0	0	0	0	–0,64
3	0,7	0	0	0	0	0	–0,77	0	–0,32	0	0	–0,7	–0,85	–0,52
4	0	0,47	0,71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–0,88	0
5	0	0,35	0,27	0	0	0	–0,41	0	0	0	0	0	–0,88	0
6	0	0,42	0	0,55	0	0	0	0	0	0,64	0	0	–0,32	–0,42
7	0	0	0	–0,55	0	–0,45	0	0	0	0,33	0	0	0,85	0
8	0	–0,5	0	0	–0,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6
9	–0,47	0	0,71	0	0	0	0	0	0	0,41	0	0	0,92	0,3
10	0	–0,56	0	0	–0,15	–0,62	0	0	0	0	0,48	0	0,35	0
11	0	0	0	0	0	–0,31	0	0	0	–0,24	0	0	0,34	0,15
12	0	0	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	0
13	0	–0.54	–0,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	–0,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4) Вычисление двух основных показателей НКК:

а) воздействие *i*-го концепта на *j*-й концепт

$$h_{i,j} = \operatorname{sgn}(v_{i,j} + \tilde{v}_{i,j}) \cdot \max(|v_{i,j}|, |\tilde{v}_{i,j}|), \ |v_{i,j}| \neq |\tilde{v}_{i,j}|; \tag{12}$$

б) консонанс влияния *i*-го концепта на *j*-й концепт

$$c_{i,j} = \frac{\left| v_{i,j} + \tilde{v}_{i,j} \right|}{\left| v_{i,j} \right| + \left| \tilde{v}_{i,j} \right|}, \qquad (13)$$

который выражает меру доверия к знаку воздействия.

С использованием полученных данных могут быть определены интегральные показатели консонанса и воздействия [4, с. 102; 5].

3. Анализ результатов расчетов. На основе расчетов программы получены значения системных показателей нечеткой когнитивной модели проектного риска (рис. 2). Анализ полученных значений свидетельствует о доминирующем влиянии $E_4^1, E_6^1, E_1^2, E_3^2$ концептов на систему и значительном влиянии системы на E_1^1, E_3^1, E_1^3. На основе полученных оценок даются рекомендации по выделенным факторам, с целью дальнейшей корректировки стратегии проектирования программных средств идентификации сетевых атак.

Воздействие i-го концепта на систему

	1
1	0,0666412
2	0,0571222
3	0,089757
4	0,113143
5	0,0651004
6	0,116079
7	0,138933
8	0,101756
9	0,127894
10	0,0669311
11	0,0115364
12	0,0326057
13	0,0969556
14	0,0586249

0.11 | Выделить доминирующие

Воздействие системы на j-й концепт

	1
1	0,169166
2	0,0974051
3	0,191714
4	0,124281
5	0,0442568
6	-0,00281618
7	0,0199625
8	0,108226
9	0,00392024
10	0,0460742
11	0,0617996
12	0,00857553
13	0,1887
14	0,0818131

0.16 | Выделить доминирующие

Рис. 2. Расчет воздействий концептов на систему и системы на концепт

К настоящему времени накоплен значительный положительный опыт в решении нетривиальных прикладных задач нечеткого когнитивного анализа

рисков в различных предметных областях: наука (оценка влияния промышленных технологий на загрязнение окружающей среды), педагогика (анализ влияния условий обучения на компетентность выпускника вуза) [6; 7]. В нашем случае следует учитывать специфические особенности предметной области, связанные с постоянным развитием технологии сетевых атак и средств их обнаружения и идентификации.

Заключение

Применение на этапе проектирования инновационных средств сетевой защиты технологии когнитивного моделирования открывает новые возможности для прогностической оценки показателей проектной эффективности. При использовании НКК можно определить действенность мер по уменьшению проектного риска, связанного противоречивостью требований технического задания на создание программного средства идентификации сетевых атак. Результаты когнитивного анализа проектного риска могут служить основанием для обоснования стратегии использования имеющихся в проектно-конструкторской организации активов в целях нейтрализации выявленных одиночных и групповых деструктивных факторов.

Список литературы

1. *An investigation* into the detection and mitigation of denial of service (DoS) attacks: critical information infrastructure protection / ed.: S. V. Raghavan, E. Dawson. Springer Science & Busi-ness Media, 2011. P. 448.

2. *Краснов А.Е.* Детектирование DDoS-атак на основе анализа динамики и взаимосвязи характеристик сетевого трафика / А.Е. Краснов, Е.Н. Надеждин, Д.Н. Никольский [и др.] // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2018. Т. 28, вып. 3. С. 407—418.

3. *Надеждин Е.Н., Шаранов Д.А.* Современные подходы к проблеме анализа проектной эффективности перспективных средств защиты информации // Научное обозрение. Технические науки. 2018. № 4. С. 14—22.

4. *Силов В.Б.* Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке : монография. М. : ИНПРО-РЕС, 1995.

5. *Шаранов Д.А.* Нечеткая когнитивная модель формирования проектного риска при разработке средств защиты от сетевых атак // Труды XXI Международной объединенной научной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2018), Санкт-Петербург, 30 мая — 2 июня 2018 г. СПб. : Университет ИТМО, 2018. С. 110—113. URL: http://ojs.ifmo.ru/index.php/IMS/issue/view/34 (дата обращения: 12.01.2020).

6. *Подвесовский А.Г., Лагерев Д.Г.* Применение нечетких когнитивных карт в задачах моделирования сложных систем // Современные информационные технологии в науке, производстве, образовании : сборник материалов международной научно-технической конференции. Пенза : РИО ПГСХА, 2004. С. 98—100.

7. *Надеждин Е.Н.* Нечеткая когнитивная модель механизма обеспечения конкурентоспособности программного продукта // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2016. № 1—2. P. 13—19.

А. А. Романов[1], И. А. Мошкина[2], Е. Н. Эгов[3]
[1,2,3]Ульяновский государственный технический университет, Россия
e-mail: [1]romanov73@gmail.com, [2]i.timina@ulstu.ru, [3]kotcheshir73@gmail.com

МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ПОИСКА АНОМАЛИЙ И ДИАГНОСТИКИ

Введение

Современные технические системы представляют собой совокупность сложных механизмов и элементов. В процессе эксплуатации эти механизмы подвергаются различным нагрузкам и постепенно выходят из строя. Поэтому актуальна задача своевременного выявления неисправных элементов, узлов технических систем и их оперативная замена. Зачастую изъятие системы из процесса производства для ее диагностики — задача трудоемкая и трудозатратная, если невозможна в принципе. В таком случае диагностику оборудования производят непосредственно на местах их расположения. Также многие дефекты технических систем невозможно выявить, получив лишь статические показания с этих систем (например, давление жидкостей, температуры отдельных элементов и т. п.), а необходимо рассматривать изменения этих параметров в течение времени. С этой целью получаются временные ряды (ВР) данных показателей диагностируемого оборудования с последующим их анализом для выявления дефектов. Помимо выявления уже имеющихся дефектных элементов в системе, актуальна задача прогнозирования будущего состояния узлов системы и возможного скорого выхода их из строя. Прогнозирование временных рядов показателей системы позволяет выполнять эту задачу при условии точности прогноза. В докладе рассмотрен алгоритм прогнозирования для нечетких временных рядов на основе наборов ситуаций пар значений [1].

1. Поиск аномалий временных рядов на основе энтропии

Энтропийный ВР (ЭнВР) можно представить следующей моделью:

$$\{\tilde{x}_i, H_i^{\mu}, H_i^{T}\},$$

где $\widetilde{x}_i$ — значение нечеткой метки в *i*-й точке [2]; H_i^{μ} — значение меры энтропии по функции принадлежности в i-й точке; H_i^{T} — значение меры энтропии по нечеткой тенденции.

Энтропийный ВР позволяет более тонко реагировать на изменения во ВР. Мера энтропии по функции принадлежности получается по формуле [3]:

$$H_i^{\mu} = H(\tilde{A}) + H(\tilde{A}^{C}), \quad (1)$$

© Романов А. А., Мошкина И. А., Эгов Е. Н., 2020

где $H(\widetilde{A}) = -K\sum_{j=1}^{n}\mu_{\widetilde{A}}(x_j)\ln(\mu_{\widetilde{A}}(x_j))$; K — положительная константа; $\widetilde{A}^C$ — дополнение $\widetilde{A}$; $\mu_{\widetilde{A}}(x_j)$ — значение функции принадлежности точки x к j-му кластеру.

Вычисление функции принадлежности зависит от варианта преобразования ВР в нечеткий временной ряд (НВР). Например, при фаззификации функция принадлежности может быть задана треугольной функцией принадлежности, имеющей вид:

$$\mu(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a}, a \le x \le b, \\ \dfrac{c-x}{x-b}, b < x \le c, \\ 0, x < a, x > c, \end{cases}$$

где x — значение точки ряда; [a, c] — диапазон изменения переменной; b — наиболее возможное значение переменной.

Если НВР формируется с помощью методов кластеризации, то в качестве значений функции принадлежности точек к кластерам берутся аппроксимированные значения из матрицы принадлежности.

Если брать в качестве примера FCM-кластеризацию, то матрица принадлежности $\mu(x_k)$ высчитывается по следующей формуле:

$$\mu_{j,k} = \frac{1}{\sum_{I=1}^{C}\left(\dfrac{\| x_k - c_j \|}{\| x_k - c_I \|}\right)^{\frac{2}{m-1}}},$$

где $\mu_{j,k}$ — степень принадлежности объекта k кластеру j; c_j — вектор центра j-го кластера; c_I — вектор центра I-го кластера.

При этом если для некоторого кластера $j \| x - c_j \| = 0$, то $\mu_j = 1$, а для всех остальных кластеров равнялась нулю.

Мера энтропии по функции принадлежности определяется в два шага:

1. Вычисляется значение энтропии по функции принадлежности по формуле (1).

2. На основе полученного значения определяется лингвистическая интерпретация меры энтропии. Значение меры энтропии, близкое к 0, соответствует состоянию «Достоверно». Значение меры энтропии, близкое к максимальному, соответствует состоянию «Неопределенно». В остальных случаях значение меры энтропии соответствует состоянию «Вероятно».

$$\tilde{H}_I^{\mu} = \begin{cases} Достоверно, \left(H_i^{\mu} \to 0\right), \\ Неопределенно, \left(H_i^{\mu} \to \max\right), \\ Вероятно, \left(H_i^{\mu} \in [0,1]\right). \end{cases}$$

Полученная на основе функции принадлежности мера энтропии не способна четко фиксировать смену нечетких меток временного ряда. Мера энтропии показывает, с какой принадлежностью точка будет относиться к метке. При этом если энтропия близка к максимальному значению, то это говорит о том, что точка находится в «пограничном» положении и может относиться с равной долей вероятности к двум разным нечетким меткам.

Метод вычисления меры энтропии по нечеткой тенденции основывается на предположении, что хаос в системе наступает, когда начинаются отклонения в тенденции показателя. То есть наступает ситуация неопределенности, когда становится сложно предугадать дальнейшее поведение системы. Эту ситуацию можно определить отклонением прогнозного значения тенденции. Это значение может быть получено на основе разницы значений тенденции двух предыдущих точек с фактическим значением тенденции в этой точке. Если прогнозное и фактическое совпадают, то можно говорить о стабильности системы, иначе о наличии отклонения, которое может быть незначительным или же приводить систему в состояние хаоса и неопределенности [4].

$$H_i^T = \tilde{t}_i^{факт} - \tilde{t}_i^{прогноз},$$

где $\tilde{t}_i^{прогноз} = GetForecastTrend\left(\tilde{t}_{i-1}^{факт}, \tilde{t}_{i-2}^{факт}\right)$.

Функция $GetForecastTrend\left(\tilde{t}_{i-1}^{факт}, \tilde{t}_{i-2}^{факт}\right)$ на основе значений элементарных тенденций в двух предыдущих точках вычисляет динамику тенденции:

$$\Delta\tau_{i-1}^{факт} = \tau_{i-2}^{факт} - \tau_{i-1}^{факт}. \quad (2)$$

Далее определяется код точки $\left(\tau_{i-1}^{факт}, \Delta\tau_{i-1}^{факт}\right)$ по ее положению на координатной плоскости фазовой плоскости:

$$p = CalcCodePoint\left(\tau_{i-1}^{факт}, \Delta\tau_{i-1}^{факт}\right). \quad (3)$$

Исходя из имеющихся схем поведения тенденции на фазовой плоскости, выбирается наиболее вероятная и вычисляется значение элементарной тенденции в следующей точке, после точки $\tau_{i-1}^{факт}, \Delta\tau_{i-1}^{факт}$. Оно и будет прогнозным значением элементарной тенденции.

Мера энтропии по нечеткой тенденции определяется по следующему алгоритму.

1. Устанавливается динамика тенденции в предыдущей точке на основе формулы (2).

2. На основе веса нечеткой тенденции и значения динамики нечеткой тенденции в предыдущей точке вычисляется ее позиция на фазовой плоскости по формуле (3).

3. Определяются: три набора точек фазовой плоскости: наиболее вероятные — это точки (как правило, одна точка), в которые чаще всего следуют после точки $p_{i-1}: \omega_{mostexpect}=\mathrm{Max}\left(Probability\left(p_{i-1}\right)\right)$; вероятные — это точки, в которые тоже следуют после точки p_{i-1}, но они не вошли в первый набор: $\omega_{probability}=Probability\left(p_{i-1}\right)\notin\omega_{mostexpect}$; аномальные — это все точки, не вошедшие в первые два набора (переход в них не ожидается в нормальных условиях функционирования): $\omega_{anomaly}=AllPoint\notin Probability\left(p_{i-1}\right)$; динамика тенденции в текущей точке $\Delta\tau_i^{факт}=\tau_{i-1}^{факт}-\tau_i^{факт}$.

4. Вычисляется точка фазовой плоскости для нечеткой тенденции и динамики в текущей точке ряда: $p_i=CalcCodePoint\left(\tau_i^{факт},\Delta\tau_i^{факт}\right)$.

5. Устанавливается соответствие полученной точки p_i одному из трех наборов: $\omega_{mostexpect}$, $\omega_{probability}$ или $\omega_{anomaly}$. ЕСЛИ точка относится к набору $\omega_{mostexpect}$, ТО значение меры энтропии приравнивается к 0, так как полученная точка как раз и ожидалась, т.е. новой информации не было получено. ЕСЛИ точка относится к набору $\omega_{probability}$, ТО значение меры энтропии приравнивается к 0,5, так как полученная точка хоть и не ожидалась, но и не обладает новой информацией. ЕСЛИ точка относится к набору $\omega_{anomaly}$, ТО значение меры энтропии приравнивается к 1, так как полученную точку не ожидалось увидеть, т.е. в данный момент анализируемая система находится в неизвестном состоянии:

$$H_i^{\tau}=\begin{cases}0,\left(p_i\in\omega_{mostexpect}\right),\\0{,}5,\left(p_i\in\omega_{probability}\right),\\1,\left(p_i\in\omega_{anomaly}\right).\end{cases}$$

6. Интерпретация полученного числового значения меры энтропии по нечеткой тенденции H_i^{τ} с лингвистической точки зрения:

$$\tilde{H}_i^{\tau}=\begin{cases}Стабильность,\left(H_i^{\tau}>0\right)\cap\left(H_i^{\tau}<0{,}5\right),\\Изменение,\left(H_i^{\tau}>0{,}5\right)\cap\left(H_i^{\tau}<0{,}7\right),\\Аномалия,\left(H_i^{\tau}>0{,}7\right).\end{cases}$$

Полученный ЭнВР данным алгоритмом позволяет выявить и скорректировать наиболее верную гипотезу для прогноза.

2. Алгоритм прогнозирования временных рядов

Алгоритм разбивается на два блока: определение характеристик прогнозной точки; вычисление прогнозного значения на основе характеристик.

Блок 1. *Определение характеристик прогнозной точки*.

1. На основе положения точки на фазовой плоскости нечеткой тенденции [5] устанавливаем возможные направления перемещений и возможные значения нечеткой тенденции для прогнозируемого значения.

2. Вычисляются значения пар «нечеткая метка — нечеткая тенденция» и «мера энтропии по функции принадлежности и мера энтропии по нечеткой тенденции» в последней точке ряда.

3. Из двух наборов ситуации (набор ситуаций по паре «нечеткая метка — нечеткая тенденция» и набор ситуаций по паре «мера энтропии по функции принадлежности и мера энтропии по нечеткой тенденции») отбираются все возможные ситуации, в которых начальное значение характеристик соответствует характеристикам, определенным в последней точке, а в конечном значение тенденции входит в выбранные тенденции на первом шаге.

4. Выбранные ситуации группируются в два списка, в зависимости от типа ситуации и сортируются по частоте встречи в порядке убывания. Через значение нечеткой тенденции и меры энтропии по нечеткой тенденции определяется корреляция между выбранными парами ситуаций (об этом будет сказано ниже). Если они совпадают, то следует переход в блок 2, иначе меняется одна из ситуаций. Смена происходит по следующему правилу: из двух списков выбирается следующая за текущими выбранными ситуациями наибольшая по частоте ситуация. Если были перебраны все ситуации из списков и не удалось получить коррелируемую пару ситуаций, то вычисление прогнозного значения осуществляется по первым парам из списков.

Непосредственно для определения прогнозного необходимы значения нечеткой метки и меры энтропии по функции принадлежности. Однако значения нечеткой тенденции и мера энтропии по нечеткой тенденции тоже важны. Они являются связующим звеном между парами ситуаций.

По мере энтропии по нечеткой тенденции устанавливается приблизительное значение нечеткой тенденции. Это обусловлено тем, что по мере энтропии можно определить значение тенденции относительно нуля.

Возможны три случая: значение равно 0 означает, что нечеткая тенденция имеет значение «Стабильность средняя»; значение больше 0 означает, что нечеткая тенденция имеет одно из следующих значений: «Рост сильный», «Рост средний», «Рост слабый»; значение меньше 0 означает, что нечеткая тенденция имеет одно из следующих значений: «Падение сильное», «Падение среднее», «Падение слабое».

Во втором и третьем случаях определить точное значение нечеткой тенденции не представляется возможным, поэтому и говорится о приблизительном вычисляемом значении нечеткой тенденции. Полученное значение срав-

нивается со значением, полученным из ситуации по нечеткой метке — нечеткой тенденции. Если они совпадают, то выбранные ситуации коррелируют между собой, если не совпадают, то необходимо сменить одну из ситуаций по правилу, описанному выше.

После установления ситуаций следует переход к блоку 2 для вычисления прогнозного значения.

Блок 2. *Вычисление прогнозного значения на основе характеристик*.

1. Сравниваются полученные характеристики прогнозной точки с характеристиками последней точки ряда. Если совпадает с предыдущим, то берется его значение. При этом следует учитывать, что, если у предыдущей точки значение нечеткой тенденции было «Стабильность средняя», то берется значение последней точки. Но если значение нечеткой тенденции относилось к росту или падению, то требуется разница между значениями в последней точке ряда и предпоследней точке, которая прибавляется к значению последней точки ряда.

2. Если характеристики не совпадают, то вычисления проводятся по следующим правилам: а) если значение меры энтропии по функции принадлежности равно «Достоверно», то берется значение центра у нечеткой метки, полученной из пары ситуации «нечеткая метка — нечеткая тенденция» для прогнозной точки; б) если значение меры энтропии по функции принадлежности равно «Вероятно Мин», то вычисляется разность между значением центра нечеткой метки и значением левой границы (значение границы меньше, чем значение в центре) нечеткой метки; в) если значение меры энтропии по функции принадлежности равно «Вероятно Макс», то вычисляется разность между значением центра нечеткой метки и значением правой границы (значение границы большее, чем значение в центре) нечеткой метки; г) если значение меры энтропии по функции принадлежности равно «Неопределенно Мин», то берется значение левой границы (значение границы меньше, чем значение в центре) нечеткой метки; д) если значение меры энтропии по функции принадлежности равно «Неопределенно Макс», то берется значение правой границы (значение границы большее, чем значение в центре) нечеткой метки.

Полученное значение возвращается как прогнозное значение для точки.

2. Применение модели энтропийного временного ряда

Модель энтропийного временного ряда и прогнозный алгоритм был применен для анализа эффективности использования оборудования. При расчете проектной мощности оборудования одним из важных параметров стала загруженность станка в течение года (коэффициент использования). На предприятии ведется учет времени нахождения каждого станка в различных состояниях: станок выключен, станок остановлен, станок работает без нагрузки, станок на ремонте, простой. Зная, сколько времени станок находится в каж-

дом из состояний, можно установить его эффективность при включении в технологический процесс, загруженность и потребность в ремонте (табл.). Также можно предположить аналогичное поведение для станков того же типа.

Эффективность использования нового, модернизированного и старого оборудования с ЧПУ, подключенного к системе мониторинга для станка 1

Месяц	Период с 01.04.2018 по 30.04.2018						
	Работа по программе, %	Показатели потерь, %					
		Станок выключен	Станок остановлен	Работа без нагрузки	Аварийный ремонт	Простои	Всего потерь
Апрель	37,1262	17,6418	10,7662	0	0,2969	34,1687	62,8738
Май	39,8859	9,77031	7,2479	0	1,5624	41,5333	60,1140
Июнь	41,5976	15,5857	9,3409	0	1,0497	32,4259	58,4023
Июль	35,3912	17,9848	7,5832	0	0,0002	39,0403	64,6087
Август	33,4599	26,0672	10,9485	0	0,1309	29,3931	66,5400
Сентябрь	45,4186	14,0590	12,5266	0	0	27,9956	54,5813
Октябрь	41,9892	8,07750	13,0858	0	0,9494	35,8979	58,0107
Ноябрь	40,9332	14,1573	12,1050	0	1,6658	31,1385	59,0667
Декабрь	36,0707	25,3443	12,3985	3,31869	0	22,8676	63,929

На основе данных составляется ВР для каждого из показателей. Для ВР показателей «Станок выключен», «Станок остановлен», «Работа без нагрузки» и «Простои» требуется выполнить диагностику с целью получения сведений о загруженности станка в рабочих программах. Для ВР показателя «Аварийный ремонт» следует выполнить как диагностику (для получения представления о работоспособности оборудования в настоящем), так и прогнозирование (для получения представления о возможных рисках использования станка в будущем).

Полученные данные позволяют сделать вывод, что станок имеет низкую аварийность и может задействоваться в технологических процессах предприятия. Для этого ряда был составлен также прогноз возникновения аварийной ситуации (рис.).

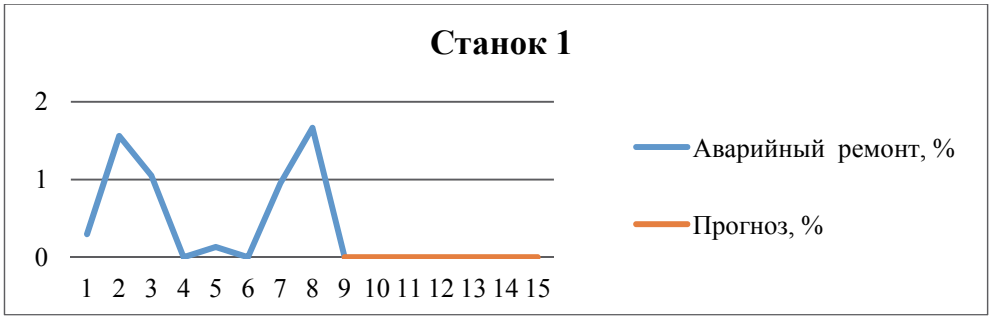


Рис. Прогноз процента аварийных работ для станка 1

Прогноз показал, что станок находится в рабочем состоянии и в ближайшее время не ожидается неполадок.

Эффективность разработанного метода проверена на временных рядах с соревнований IRAFM 2015 [6]. Прогнозировалось последнее значение временного ряда на основе предыдущих значений. Получено среднее значение MAPE по результатам прогнозирования — 4,9 %.

Заключение

В ходе проведенного научного исследования достигнуты следующие результаты: сформирован алгоритм прогнозирования для временного ряда на основе применения ЭнВР; разработан программный комплекс для математического моделирования и прогнозирования временных рядов на основе выше указанного алгоритма.

Эксперименты с моделью показали хорошую точность прогнозирования новых значений временного ряда. Разработанный алгоритм может быть успешно использован при диагностике технических систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научных проектов № 18-47-732016, 18-47-730025. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00999.

Список литературы

1. Rodriguez M.A., Kotagiri R., Buyya R. Detecting performance anomalies in scientific workflows using hierarchical temporal memory // Future Generation Computer Systems. 2018. Vol. 88. P. 624—635.

2. Herbst G., Bocklish S.F. Online Recognition of fuzzy time series patterns // International Fuzzy Systems Association World Congress and European Society for Fuzzy. Logic and Technology Conference. Lisbon, Portugal, 2009.

3. Ярушкина Н.Г., Воронина В.В., Эгов Е.Н. Применение энтропийной меры в диагностике технических временных рядов // Автоматизация процессов управления. 2015. № 2 (40). С. 55—63.

4. Афанасьева Т.В., Заварзин Д.В. Описание подхода к извлечению знаний об аномалиях локальных тенденций временного ряда // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2016. С. 305—308.

5. Rostaghi M., Azami H. Dispersion entropy: A measure for time-series analysis // IEEE Signal Processing Letters. 2016. Vol. 23. No. 5. P. 610—614.

6. Computational Intelligence in Forecasting (CIF). URL: http://irafm.osu.cz/cif/main.php (дата обращения: 10.04.2016).

А. Н. Шабельников, В. С. Ковалев[1], С. М. Ковалев[2]
Ростовский филиал АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: [1]vlad@rfniias.ru, [2]ksm@rfniias.ru

НЕЧЕТКИЕ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИЕ МОДЕЛИ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Введение

Нечеткие системы (НС) находят широкое применение в различных областях системного моделирования, исследования операций и принятия решений. Многочисленные примеры приложений имеют место в управлении [1—3], прогнозировании [4—6], классификации [7—9], диагностировании [10—12] и др. В связи с постоянно расширяющимся кругом приложений и вовлечение в сферу нечеткого моделирования динамических систем и процессов появляются новые классы НС, среди которых особую популярность стали приобретать гибридные системы, основанные на объединении НС, нейронных сетей и эволюционных алгоритмов.

Гибридные эволюционирующие нейронечеткие системы способны адаптироваться и самообучаться в инкрементном режиме в реальном времени одновременно с поступающими в систему новыми данными [13]. Адаптивность эволюционирующих нейронечетких систем означает их способность одновременно изменять структуру и параметры каждый раз при поступлении в систему новой порции данных. Такая эволюционирующая системная парадигма называется инкрементным обучением, а НС — инкрементными эволюционирующими нейронечеткими системами (ИЭННС). С позиций нейросетевого подхода эволюционирующая парадигма предполагает постепенное развитие нейросетевой структуры «с нуля» путем добавления новых связей и значений синаптических весов. Инкрементное обучение предполагает адаптацию параметров и структуры сети каждый раз, когда поступающие на ее вход данные не соответствуют текущей модели системы. В настоящее время онлайновое проектирование ЭНС на основе потоков данных — достаточно активная область исследований [14—17].

В статье разрабатывается новый класс ИЭННС, ориентированный на решение задач мониторинга и технической диагностики. Мониторинг технического состояния устройств и оборудования в течение технологического процесса позволяет контролировать их и обеспечивать заблаговременное обнаружение неисправностей и сбоев. Обнаружение неисправностей на начальной стадии имеет первостепенное значение для своевременной организации ремонтных работ, снижения затрат, сокращения финансовых потерь и увеличения эксплуатационной безопасности.

© Шабельников А. Н., Ковалев В. С., Ковалев С. М., 2020

1. Общая схема мониторинга технического оборудования

Общая схема мониторинговой системы обнаружения неисправностей в техническом оборудовании, заимствована из [18] и показана на рисунке 1.

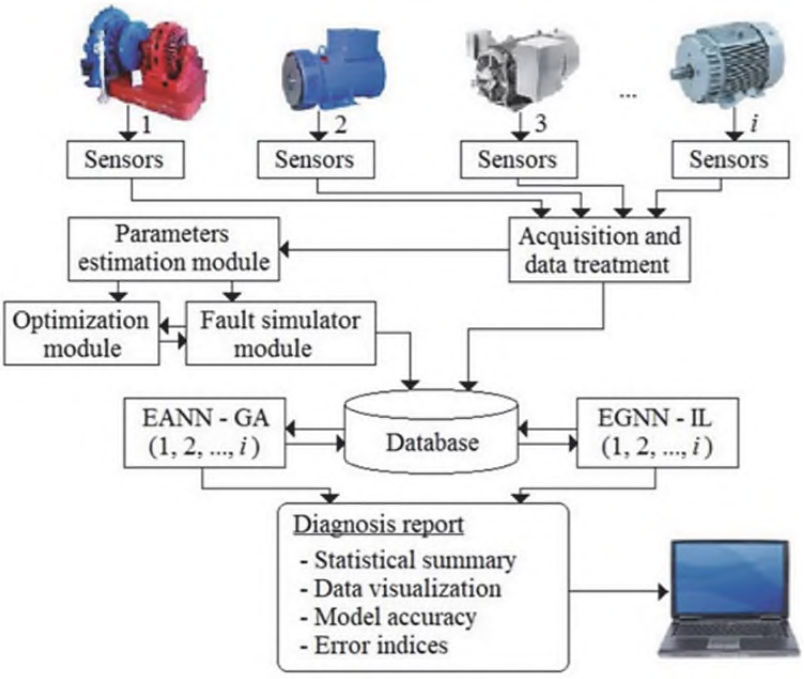


Рис. 1. Общая схема мониторинговой системы обнаружения неисправностей

В мониторинговую систему поступают измеренные значения токов и напряжений от датчиков сбора первичной информации (сенсоров). После препроцессинга обработанные данные в виде векторов атрибутов, значения которых характеризуют текущие состояния (КУ), поступают в базу данных (БД) системы. База данных включает образцы, соответствующие как исправным, так и неисправным данным. Неисправные образцы относятся к различным классам неисправностей в зависимости от степени работоспособности или неработоспособности КУ и ее влияния на техпроцесс. ИЭННС принимает информацию из БД и эволюционирует «с нуля» посредством инкрементного алгоритма обучения. В процессе эволюционирования на выходе сети формируется результат классификации, который вместе с входными данными используется одновременно и для очередного шага обучения. Таким образом, обучение ЭИННС осуществляется в режиме онлайн отдельно для каждого входного образца. Диагностический отчет формируется в модуле *Diagnosis report*.

Описание системных модулей.

Сбор и обработка данных. Этот модуль измеряет сигналы напряжений и токов, получаемых от акустических, электромеханических, лазерных и иных датчиков. Данные предварительно обрабатываются с применением фильтров нижних и верхних частот.

Модуль оценки параметров. Осуществляет предобработку данных с использованием фильтра Каллмана и интеллектуальный препроцессинг для восстановления и исключения недостоверных данных. Данные отображаются в интерфейсе перед сохранением в хранилище файлов.

Модуль оптимизации. Обеспечивает дальнейшее уточнение параметров, используемых моделью имитатора неисправностей. Цель состоит в том, чтобы позволить симулятору неисправностей лучше воспроизводить фактические переменные состояния.

*База данных с*остоит из выборок ввода-вывода, которые полезны для обучения и тестирования нейросетевых моделей. В качестве входных атрибутов для нейронных классификаторов применяются обработанные сенсорные данные, а выходная переменная является классом, характеризующим степень работоспособности контролируемого объекта.

ИЭННС — инкрементная нейронечеткая сеть, обучающаяся на основе потоковых данных в инкрементном режиме для каждого контролируемого устройства. Самостоятельно приспосабливает гранулярную структуру и веса соединений с помощью рекурсивной процедуры. В общем случае ИЭННС может обрабатывать нечеткие, интервальные и числовые данные.

Отчет о диагностике. Отображает информацию о прогнозируемых отказах и неисправностях. В отчет включены также статистические сводки, графики конкретных состояний переменных и параметров, эволюция индексов ошибок и моделей неисправностей, а также характеристики ИЭННС.

2. Архитектура ИЭННС

ИЭННС — нейронечеткая сеть, которая формируется на основе поступающих в систему данных в онлайн-режиме. Процесс построения и обучения ИЭННС осуществляется путем гранулирования входных переменных и адаптации полученных нечетких гранул в процессе эволюционирования НС.

Рассматриваемая ИЭННС ориентирована на обработку числовых данных и предназначена для обнаружения и классификации неисправностей. Основные элементы обработки информации в ИЭННС — нечеткие нейроны. Архитектура сети соответствует базе нечетких правил, а обработка информации осуществляется нейронами сети в соответствии с процедурой нечеткого вывода. ИЭННС — это классификатор, т. е. для каждого входного образца данных она реализует точечный вывод, являющийся номером класса прогнозируемого решения. Обучение в сети обеспечивает рекурсивную интеграцию вновь поступающих данных в локальные нечеткие гранулы, представленные в ИЭННС нечеткими нейронами. Нечеткие нейроны и соединения сети могут добавляться, удаляться, объединяться или изменяться в процессе эволюцио-

нирования ИЭННС. В результате такой адаптации ИЭННС захватывает новую информацию из непрерывного потока данных и подстраивается к новому сценарию развития контролируемого процесса. Архитектура ИЭННС представлена на рисунке 2.

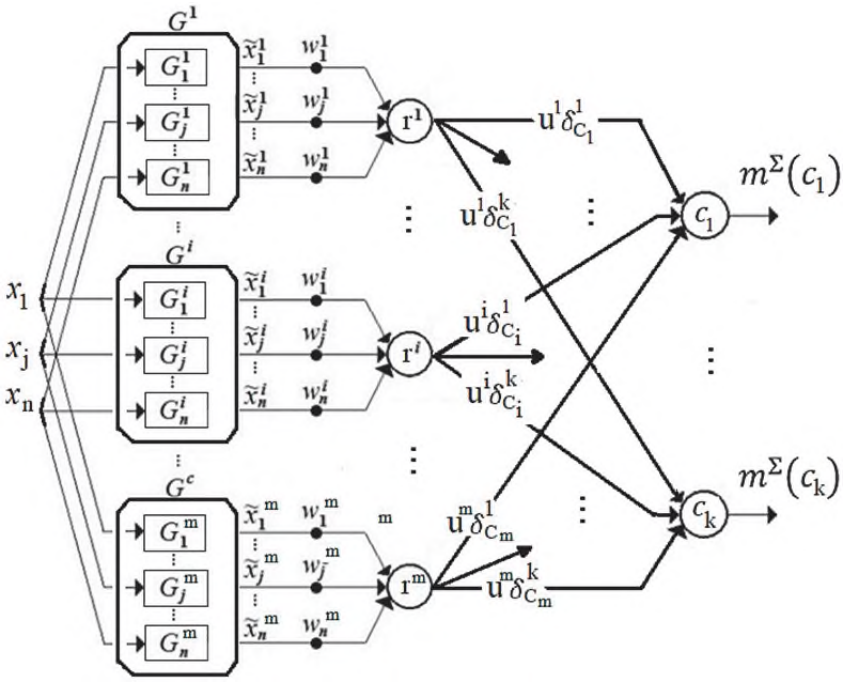


Рис. 2. Архитектура ИЭННС

На вход ИЭННС поступает поток данных $(x,\ y)^l$, $l = 1, 2,\ldots$ $x^l = (x_1^l, x_2^l, ..., x_n^l)$ — вектор входных значений, y^l — выходные значения. В нашем случае входные данные $x_j \in \boldsymbol{x}$ являются числовыми значениями признаков $X_j \in \{X_1,\ldots,\ X_n\}$, характеризующих состояния КУ, а y — выходные данные, характеризующие диагностические решения. Состояния КУ объединены в классы состояний $\mathfrak{R}$ так, что каждому диагностическому решению y соответствует свой класс $C(y) \in \mathfrak{R}$.

Входной слой принимает текущий образец данных $\boldsymbol{x}^l$. Второй слой агрегирует входные данные $x_j \in \boldsymbol{x}$ в нечеткие гранулы $G_j^i\ (i = 1,...,m;\ j = 1,...,n)$, разбивающие области определения входной переменной X_j на подобласти, представленные функцией принадлежности (ФП) $\mu_{G_j^i}(x)$. Значение $\tilde{x} = \mu_{G_j^i}(x)$ характеризует меру сходства значения x с нечеткой гранулой G_j^i. Предвыходной слой ИЭННС агрегирует входные данные $\boldsymbol{x}^l$ в нечеткие гранулы G^i, разбивающие все входное пространство $\boldsymbol{X} = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_n$ на области,

представленные ФП $\mu_{G_j^i}(x) = T(\mu_{G_1^i}(x_1),...,\mu_{G_n^i}(x_n))$, где $T(*)$ — оператор T-нормы. Для каждого входного образца данных $\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{X}$ и нечеткой гранулы G^i значение ФП $\tilde{x} = \mu_{G^i}(x)$ характеризует меру сходства $\boldsymbol{x}$ с нечеткой гранулой G^i. С нечеткими гранулами G^i связана классификационная функция C: $\{G^i\} \to \Re$, ($\Re \subset N$), которая сопоставляет каждой грануле G^i целочисленный выход $C(G^i) \in \Re$. Значение $C(G^i) = c_i$ является номером класса диагностического решения, которое принимается при попадании входного образца $\boldsymbol{x}$ в область G^i. Таким образом, каждая гранула G^i порождает в ИЭННС некое частное нечеткое правило r^i вида:

$$r^i : If\ x_1 \in G_1^i\ and\ ...\ and\ x_n \in G_n\ then\ y = C(r^i). \qquad (1)$$

Нечеткие правила r^i формируются в предвыходном слое агрегации ИЭННС, состоящим из нечетких нейронов r^i, сопоставленных нечетким правилам (1). Нечеткий нейрон r^i объединяет взвешенные степени сходства входных данных $\tilde{x}_1^i w_1^i,...,\tilde{x}_n^n w_n^i$ в одно значение $u^i = T(\tilde{x}_1^i w_1^i,...,\tilde{x}_n^n w_n^i)$ с использованием оператора T-нормы. Значение u^i имеет смысл степени истинности соответствующего нечеткого правила r^i при поступлении на вход ИЭННС семпла $x^l = (x_1^l, x_2^l,...,x_n^l)$ и является частным результатом, выведенным на основе нечеткого правила r^i. Данная оценка u^i транслируется в истинностную оценку $\tilde{C}(r^i) = u^i$ класса диагностического решения, принимаемого для текущего образца данных на основе нечеткого правила r^i.

Выходной слой осуществляет агрегирование нечетких правил r^i с одинаковыми заключениями $y = C(r^i)$, равными c_j, в единый класс c_j, а также частных результатов u^i, выведенных на основе нечетких правил r^i, в итоговую оценку истинности $\tilde{c}_j$. Агрегирование частных решений r^i в соответствующий им класс $c_j = C(r^i)$ выполняется путем создания виртуальных соединений между соответствующими нейронами двух слоев. Виртуальное соединение между нечеткими нейронами r^i и c_j создается путем умножения выходного сигнала u^i на символ Кронекера с соответствующими индексами $\delta_i^{c_j}$. В результате такой «фильтрации» на вход нейрона c_j поступают значения u^i только от нейронов r^i, сопоставленных соответствующему классу c_j. Объединение оценок истинности частных правил в единую оценку реализуется на основе схемы комбинирования свидетельств Демпстера — Шеффера [17].

Пусть на вход нейрона c_j поступает множество значений $u_1^i,...,u_p^i$ от нейронов $r_1^i,...,r_p^i$, сопоставленных классу $c_j \in \Re$. Нейрон c_j объединяет частные оценки истинности $u_1^i,...,u_p^i$ в единое значение истинности $\tilde{c}_j$ следующим образом. Класс c_j рассматривается в качестве гипотезы о том, что c_j — прогнозируемое решение (состояние КУ), полученное на основе совокупно-

сти нечетких правил $r_1^i,...,r_p^i$, а величина $\widetilde{c}_j$ — оценка истинности данной гипотезы. Истинность данной гипотезы $\widetilde{c}_j$ рассматривается как ее вероятность и выводится на основе комбинирования вероятностей частных свидетельств, в качестве которых выступают оценки истинности $u_1^i,...,u_p^i$ соответствующих частных нечетких правил $r_1^i,...,r_p^i$. В терминах теории свидетельств Демпстера класс c_j выступает в качестве основной гипотезы, а значения $u_1^i,...,u_p^i$ — в качестве вероятностных оценок частных свидетельств в пользу данной гипотезы. Введем в рассмотрение гипотезу $\neg c_j$, отрицающую основную гипотезу c_j, т. е. представляющую факт, что класс c_j не является диагностическим решением. Сформируем полное множество гипотез $\Omega = \{c_j, \neg c_j\}$, где c_j — результатом вывода является класс c_j, $\neg c_j$ — результатом вывода не является класс c_j. В терминах теории Демпстера — Шеффера показательное множество — $P(\Omega) = \{\varnothing, c_j, \neg c_j, \Omega\}$. Назначим базовые вероятности гипотезам, входящим в $P(\Omega)$, для i-го частного свидетельства r^i. Естественно предположить, что базовая вероятность $m^i(c_j)$ гипотезы c_j равна оценке истинности u^i соответствующего нечеткого правила r^i, сопоставленного классу c_j, т. е. $m^i(c_j) = u^i$. Оставшуюся часть единичной вероятностной массы $1 - m^i(c_j)$ представляется естественным отнести к гипотезе $\neg c_j$, т. е. $m^i(\neg c_j) = 1 - m^i(c_j)$. Таким образом, базовая вероятность $m^i(\neg c_j) = 1 - m^i(c_j)$ отражает меру неопределенности результата вывода по нечеткому правилу r^i, поскольку отрицание гипотезы c_j не дает никакой дополнительной информации о перераспределении вероятностной массы $m^i(\neg c_j)$ между другими оставшимися классами $c_l \in \Re \backslash c_j$. В результате получаем следующее распределение базовых вероятностей в показательном множестве для i-го свидетельства r_j^i:

$$m^i(\varnothing) = 0,\ m^i(c_j) = u^i,\ m^i(\neg c_j) = 1 - u^i,\ m^i(\Omega) = 0.$$

С учетом специфики распределения базовых вероятностей m^i в показательном множестве $P(\Omega)$ результатом комбинирования вероятностных оценок $u_1^i,...,u_p^i$ на основе правила Демпстера являются следующие итоговые оценки:

$$m^{\Sigma}(c_j) = \left(\prod_{i=1}^{p} u^i\right) : k,\ m^{\Sigma}(\neg c_j) = \left(\prod_{i=1}^{p}(1-u^i)\right) : k,$$

где $k = \prod_{i=1}^{p} u^i + \prod_{i=1}^{p} u^i(1-u^i)$ — нормирующий коэффициент.

Таким образом, результат вывода на основе совокупности нечетких правил состоит из двух оценок: $m^{\Sigma}(c_j)$ — вероятность гипотезы о том, что прогнозируемым решением является класс c_j; $m^{\Sigma}(\neg c_j)$ — мера неопределенности, характеризующая вероятность принятия любого другого, отличающегося от c_j решения. В силу сказанного, на выходе нейрона c_j в выходном слое сети

формируются два значения $m^{\Sigma}(c_j)$ и $m^{\Sigma}(\neg c_j)$, которые при принятии окончательного решения могут быть комбинированы по-разному, в зависимости от приложения. В простейшем случае величина $m^{\Sigma}(\neg c_j)$ может быть проигнорирована и в качестве окончательного решения принимается класс c^* с наибольшим значением истинности:

$$c^* = \arg\max_{c_j \in \Re} \left(m^{\Sigma}\left(c_j\right)\right).$$

Следовательно, представленная выше архитектура ИЭННС имеет принципиальную особенность, отличающую ее от существующих архитектур. Она заключается в реализованном в ней новом методе нечеткого вывода путем включения в сеть дополнительного слоя нечетких нейронов c_j ($j = 1,\ldots,k$). Они осуществляют слияние данных по схеме Демпстера — Шеффера, тем самым обеспечивая возможность более гибкого принятия решений на основе анализа не только вероятностных оценок основных гипотез $m^{\Sigma}(c_j)$, но также и дополнительной информации, полученной в процессе вывода, о степени неопределенности $m^{\Sigma}(\neg c_j)$ принимаемых диагностических решений, отражающей неполноту, неточность и возможную противоречивость в данных.

Адаптация и обучение ИЭННС выполняется путем подстройки ФП нечетких гранул, а также в изменении БЗ путем включения и исключения из нее нечетких правил. Предлагаемый авторами подход к адаптации базируется на предложенной в [18] идеи инкрементной адаптации ФП с четырьмя параметрами.

Заключение

Предлагаемый класс эволюционирующих нейронечетких систем базируется на методах инкрементного обучения, способных адаптировать свои параметры и менять базу знаний в реальном времени одновременно с поступающими в систему новыми данными. Тем самым сокращается время реакции системы на существенные и несущественные изменения в потоке данных, характеризующих начальные стадии проявления неисправностей.

Принципиальная особенность и отличие предлагаемой архитектуры нейронечеткой сети от существующих — это новый метод нечеткого вывода, реализованный в сети на основе включения в нее дополнительного слоя нечетких нейронов. Последние осуществляют слияние данных по схеме Демпстера — Шеффера, обеспечивая возможность более гибкого принятия решений не только на основе анализа вероятностных оценок основных гипотез, но также и анализируя дополнительную информацию, полученную в процессе вывода, о степени неопределенности полученных диагностических решений, отражающую неполноту, неточность и противоречивость в данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-07-00195, 19-07-00263.

Список литературы

1. *Frosini L., Harlissca C., Szabó L.* Induction machine bearing fault detection by means of statistical processing of the stray flux measurement // IEEE Trans. Ind. Electron. 2015. Vol. 62(3). P. 1846—1854.

2. *Chang H.-C., Lin S.-C., Kuo C.-C., Hsieh C.-F.* Induction motor diagnostic system based on electrical detection method and fuzzy algorithm // Int. J. Fuzzy Syst. 2016. Vol. 18(5). P. 732—740.

3. *Leite D., Hell M., Costa Jr. P., Gomide F.* Real-time fault diagnosis of nonlinear systems // Nonlinear Anal. Theory Methods Appl. 2009. Vol. 71(12). P. 2665—2673.

4. *Ghate V., Dudul S.* Cascade neural-network-based fault classifier for three-phase induction motor // IEEE Trans. Ind. Electron. 2011. Vol. 58(5). P. 1555—1563.

5. *Fuente M., Moya E., Alvarez C., Sainz G.* Fault detection and isolation based on hybrid modelling in an AC motor // IEEE Int. Conf. Neural Netw. 2004. Vol. 3. P. 1869—1874.

6. *Gandhi A., Corrigan T., Parsa L.* Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors // IEEE Trans. Ind. Electron. 2011. Vol. 58(5). P. 1564—1575.

7. *Sun W., Shao S., Zhao R. et al.* A sparse auto-encoder-based deep neural network approach for induction motor faults classification // Measurement. 2016. Vol. 89. P. 171—178.

8. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.* Deep Learning. Adaptive Computation and Machine Learning. MIT Press, Cambridge, 2017.

9. *Chen X., Chau K., Busari A.* A comparative study of population-based optimization algorithms for downstream river flow forecasting by a hybrid neural network model // Eng. Appl. Artif. Intell. 2015. Vol. 46. P. 258—268.

10. *Taormina R., Chau K.-W.* Neural network river forecasting with multi-objective fully informed particle swarm optimization // J. Hydroinformatics. 2015. Vol. 17(1). P. 99—113.

11. *Lughofer E., Pratama M.* Online active learning in data stream regression using uncertainty sampling based on evolving generalized fuzzy models // IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2018. Vol. 26(1). P. 292—309.

12. *Rubio J.J.* USNFIS: uniform stable neuro fuzzy inference system // Neurocomputing. 2017. Vol. 262(1). P. 57—66.

13. *Silva A., Caminhas W., Lemos A., Gomide F.* A fast learning algorithm for evolving neofuzzy neuron // Appl. Soft Comput. 2014. Vol. 14(B). P. 194—209.

14. *Mohamad S., Moamar S.-M., Bouchachia A.* Active learning for classifying data streams with unknown number of classes // Neural Netw. 2018. Vol. 98. P. 1—15.

15. *Soares E., Costa P., Costa B., Leite D.* Ensemble of evolving data clouds and fuzzy models for weather time series prediction // Appl. Soft Comput. 2018. Vol. 64. P. 445—453.

16. *Andonovski G., Music G., Blazic S., Skrjanc I.* Evolving model identification for process monitoring and prediction of non-linear systems // Eng. Appl. Artif. Intell. 2018. Vol. 68. P. 214—221.

17. *Leite D.* Comparison of Genetic and Incremental Learning Methods for Neural Network-Based Electrical Machine Fault Detection // Predictive Maintenance in Dynamic Systems. 2019.

18. *Shafer G.* A mathematical theory of evidence. Princeton University Press, 1976.

СОДЕРЖАНИЕ

Колесников А.В., Тарасов В.Б. Дмитрий Александрович Поспелов: От идей ситуационного управления и семиотического моделирования к гибридным и синергетическим интеллектуальным системам ... 5

Предисловие ... 18

Пленарные доклады

Еремеев А.П., Герасимова А.Е. Разработка средств интеллектуальной поддержки принятия решений в рамках «цифровой энергетики» ... 19

Колесников А.В. Модель мира в естественных и искусственных интеллектуальных гетерогенных системах ... 28

Тарасов В.Б. Общение и взаимопонимание когнитивных агентов в коллаборативной робототехнике: на пути к «сознательным» коботам ... 74

Фоминых И.Б., Алексеев Н.П. Управление познавательным процессом когнитивного агента в условиях временных ограничений ... 101

Секция 1. **Методы и модели гибридных и интегрированных интеллектуальных систем**

Анцыферов С.С., Фазилова К.Н. Определение области неравновесной устойчивости когнитивных интеллектуальных систем ... 108

Березкин Д.В., Сергеев И.Е., Сидоров В.Ю. Разработка элементов гибридной интеллектуальной системы определения местоположения объектов по их изображениям ... 116

Бутенков С.А., Кривша В.В., Кривша Н.С. Гибридные системы вычислительного интеллекта на основе методов пространственной грануляции ... 124

Виноградов Г.П., Конюхов И.А., Куприянов К.В. Паттерны в управлении автономными системами ... 132

Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В. Язык предикативного кодирования словесно-вербальных знаний о ресурсах, свойствах, действиях, структурах, состояниях и режимах интеллектуального оперативно-технологического управления системами с высокой динамикой ... 136

Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В. Предметно-изобразительное представление знаний в технической семиотике и искусственном интеллекте: изографы ... 155

Кулик Б.А., Фридман А.Я. Анализ и моделирование НЕ-факторов знаний на основе классического подхода ... 218

Мочалов В.А., Мочалова А.В. Применение экспертных систем для расчета вероятности связности между узлами графа ... 226

Мунтян Е.Р., Литвиненко В.Н. Представление знаний в организационных системах с использованием графов ... 235

Румовская С.Б. Редукция диагностической проблемы с когнитивной визуализацией ее элементов ... 242

Рыбина Г.В., Слиньков А.А., Буянов Д.Р. Особенности реализации и экспериментального исследования автоматизированной технологии построения баз темпоральных знаний в динамических интегрированных экспертных системах ... 251

Чёрненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е. Гибридные интеллектуальные информационные системы — концепция и реализации ... 260

Секция 2. **Интеллектуальные системы в науке, образовании, медицине, экономике и промышленности**

Белова Е.Е., Толстель О.В. Прототип разговорного чат-бота на основе языковой модели данных для банковской системы 267
Бурдо Г.Б., Воронцов Н.В. Онтологии как основа моделей интеллектуальных САПР ТП с элементами обучения 273
Галкин А.В., Пименов В.А., Сараев П.В. Ремоделирование в процессе построения модели формоизменения дефекта при прокатке 279
Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Гибридный алгоритм решения задачи двумерной упаковки 285
Гришин Е.С. Методы предикативной диагностики промышленного оборудования, основанные на продукционной модели представления знаний 293
Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Разработка неоднородных когнитивных моделей для диагностирования оборудования 300
Лукьянова Л.М. Методика анализа проблем и целей систем производственной сферы 304
Неудахина Я.А., Трофимов В.Б. О применении искусственных нейронных сетей в прогнозировании электропотребления центральных тепловых пунктов 310
Никитина М.А. Интеллектуальный анализ микроструктуры мясной системы на основе агентных и нейросетевых технологий 318
Ничепорчук В.В. Ресурсы и технологии построения интеллектуальной системы поддержки управления в чрезвычайных ситуациях 326
Павлов А.В. К вопросу классических механизмов квантово-подобных когнитивных феноменов: дилемма заключенного 334
Палюх Б.В., Ветров А.Н., Мальков А.А., Александрова Д.С. Методы и средства построения гибридных экспертных систем для управления эволюцией непрерывных многостадийных производственных процессов 342
Силев П.В., Толстель О.В., Дупленко А.Г. Распознавание эмоционального состояния человека по его речи с помощью искусственной нейронной сети 350
Сысоев А.С. Гибридная модель региональной интеллектуальной системы управления потоками в высокоскоростных транспортных коридорах 355
Тягунов О.А. Алгоритмическое и программное обеспечение для многокритериального выбора параметров регуляторов систем управления 363
Федоров О.В. Иерархическая модель видовой структуры электроприводов промышленных предприятий для интеллектуальных сетей в электроэнергетике 369
Филиппов А.А. Архитектуризация программных систем на основе опыта предыдущих проектов 375
Хабибуллина Е.Л., Погодаев А.К. Нейро-нечеткие алгоритмы экспертной системы в задаче управления транспортными потоками 384
Юсупбеков Н.Р., Абдурасулов Ф.Р., Адилов Ф.Т., Иваньян А.И. Повышение эффективности управления промышленным предприятием на базе программно-аналитической платформы Forge 392

Секция 3. **Многоагентные системы, синергетический и роевой искусственный интеллект, распознавание образов, интеллектуальная робототехника**

Yusupbekov N.R., Gulyamov Sh.M., Usmanova N.B. Resource Agreement and Coordination Models in Distributed Management Systems 398

Городецкий А.Е., Тарасова И.Л., Курбанов В.Г. Методы принятия решений при групповом управлении роботами 403
Каганов Ю.Т., Ревунков Г.И., Андреев А.М., Гапанюк Ю.Е. Расширение метаграфового подхода для описания синергетических интеллектуальных систем 412
Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Фонова А.Э. Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов 419
Листопад С.В., Румовская С.Б. Лабораторный прототип гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для решения проблемы восстановления региональной распределительной электросети 428
Листопад С.В. Модель сплоченной гибридной интеллектуальной многоагентной системы 437
Марьясин О.Ю. Мультиагентная система управления зданием на основе некооперативного прогнозирующего оптимального управления 445
Матюшкин И.В. Коннекционистские системы с точки зрения формализма классических клеточных автоматов 453
Матюшкин И.В., Рубис П.Д. Клеточно-автоматные алгоритмы псевдослучайных перестановок матриц 460
Мухитов Э.И. Интеграция технологий блокчейна и искусственного интеллекта в мультиагентные системы 468
Румовская С.Б. Сплоченность в малом коллективе экспертов, решающих проблемы: понятие, особенности, модели 473
Тарачков М.В., Каленик А.В. Разработка робота-манипулятора ДР-1 482
Фридман А.Я., Кулик Б.А. Когнитивный подход к оценке ситуационной осведомленности в сетецентрических системах гражданского назначения 489

***Секция 4*. Нечеткие модели, онтологии, мягкие и интеллектуальные вычисления**

Андреев И.А., Мулянова К.П., Синдюкова М.О., Шараборина А.В. Разработка системы анализа эмоциональной окраски текста с использованием расширенного словаря SentiWordNet 3.0 498
Буланова В.И., Фомина М.В., Щербакова В.Н. Алгоритм обобщения для работы с интервальными временными данными 505
Гонтарева А.А., Синюк В.Г. Метод вывода для систем типа Мамдани MISO-структуры при нечетких входах на графическом процессоре 513
Морев К.И. Интуиционистские нечеткие множества в системе мониторинга автомобильного трафика 523
Мошкин В.С., Аверин Д.С., Горлова Е.А., Масленникова М.В., Платов П.В. Использование предметной онтологии при поиске текстовых документов с учетом истории запросов пользователя к архиву 531
Надеждин Е.Н., Шаранов Д.А. Нечеткий когнитивный анализ проектной эффективности программных средств идентификации сетевых атак 538
Романов А.А., Мошкина И.А., Эгов Е.Н. Модели временных рядов в задачах прогнозирования, поиска аномалий и диагностики 545
Шабельников А.Н., Ковалев В.С., Ковалев С.М. Нечеткие эволюционирующие модели в диагностических системах 553