

ISSN 2078-9181

DOI 10.15622/sp.2020.19.4

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

ТРУДЫ СПИИРАН

proceedings.spiiras.nw.ru



ТОМ 19 № 4



Санкт-Петербург
2020

SPIIRAS PROCEEDINGS

Volume 19 № 4, 2020

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

Founder and Publisher

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

R. M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

Editorial Council

A. A. Ashimov ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
N. P. Veselkin ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
I. A. Kalyaev ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Taganrog, Russia
Yu. A. Merkurjev ,	Prof., Dr. Habil., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
A. I. Rudskoi ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
V. Sgurev ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian academy of sciences, Sofia, Bulgaria
B. Ya. Sovetov ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia
V. A. Soyfer ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Samara, Russia

Editorial Board

O. Yu. Gusikhin ,	Ph. D., Dearborn, USA
V. Delic ,	Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
A. Dolgui ,	Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France
M. Zelezny ,	Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic
H. Kaya ,	Assoc. Prof., Ph.D., Utrecht, the Netherlands
A. A. Karpov ,	Assoc. Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
S. V. Kuleshov ,	Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
D. A. Ivanov ,	Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
K. P. Markov ,	Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
R. V. Meshcheryakov ,	Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
N. A. Moldovian ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V. K. Pshikhopov ,	Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia
A. L. Ronzhin ,	(Deputy Editor-in-Chief), Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
H. Samani ,	Assoc. Prof., Ph.D., New Taipei City, Taiwan, Province of China
V. Skormin ,	Prof., Ph.D., Binghamton, USA
A. V. Smirnov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
B. V. Sokolov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. V. Utkin ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. B. Sheremetov ,	Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico, Mexico

Editor: A. I. Motienko

Editor: E. P. Miroshnikova

Technical editor: M. S. Avstriyskaya

Translator: N. V. Kashina

Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,
e-mail: publ@iias.spb.su, web: <http://proceedings.spiiras.nw.ru>

The journal is indexed in Scopus

© St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences, 2020

ТРУДЫ СПИИРАН

Том 19 № 4, 2020

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики
Журнал основан в 2002 году

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)

Главный редактор

Р. М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционный совет

- А. А. Ашимов**, академик национальной академии наук Республики Казахстан, д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан
Н. П. Веселкин, академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ
И. А. Каляев, академик РАН, д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
Ю. А. Меркурьев, академик Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия
А. И. Рудской, академик РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Сгурев, академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария
Б. Я. Советов, академик РАО, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. А. Сойфер, академик РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

Редакционная коллегия

- О. Ю. Гусихин**, Ph.D., Диаборн, США
В. Делич, д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия
А. Б. Долгий, Dr. Habil., проф. Сент-Этьен, Франция
М. Железны, Ph.D., доцент, Пльзень, Чешская республика
Д. А. Иванов, д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия
Х. Кайя, Ph.D., доцент, Утрехт, Нидерланды
А. А. Карпов, д-р техн. наук, доцент, С.-Петербург, РФ
С. В. Кулешов, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
К. П. Марков, Ph.D., доцент, Аизу, Япония
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Н. А. Молдовян, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
А. Л. Ронжин, (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Х. Самани, Ph.D., доцент, Синьбэй, Тайвань, КНР
В. А. Скормин, Ph.D., проф., Бингемптон, США
А. В. Смирнов, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. В. Соколов, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. В. Уткин, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. Б. Шереметов, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

Редактор: А. И. Мотиенко

Литературный редактор: Е. П. Мирошникова

Технический редактор: М. С. Австрийская

Переводчик: Н. В. Кашина

Адрес редакции

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,
e-mail: publ@iias.spb.su, сайт: <http://proceedings.spiiiras.nw.ru>

Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2020
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания–журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания–журнала «Труды СПИИРАН»

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование и прикладная математика

В.Ф. Волков, А.В. Кульвиц, А.Ю. Коваленко, В.И. Салухов
ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНЫХ СТРУКТУР
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ УТОЧНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТАЛЬНОГО
ДВИЖЕНИЯ 719

Робототехника, автоматизация и системы управления

М.П. Кочетков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, О.В. Петров, С.Б. Симонов,
А.И. Терентьев
ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА С ЭЛЕМЕНТАМИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ
ОЦЕНКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ ГРУППЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ 746

Ю.И. Аль Машхадани
ДИЗАЙН И АНАЛИЗ ЧЕЛОВЕКООДОБНОГО МАНИПУЛЯТОРА С СЕМЬЮ
СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
КОНТРОЛЛЕРА 774

Искусственный интеллект, инженерия данных и знаний

И.В. Степанян, А.В. Хомич
СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ РЕПЛИКАТИВНОГО НЕЙРОПОДОБНОГО МОДУЛЯ 803

Ю.А. Шичкина, В.М. Ха
МЕТОД СОЗДАНИЯ КОЛЛЕКЦИЙ СО ВЛОЖЕННЫМИ ДОКУМЕНТАМИ ДЛЯ БАЗ
ДАННЫХ ТИПА КЛЮЧ-ДОКУМЕНТ С УЧЕТОМ ВЫПОЛНЯЕМЫХ ЗАПРОСОВ 829

А.М. Лях
МИНИМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА БАЗЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ О БИОЛОГИЧЕСКОМ
РАЗНООБРАЗИИ ОРГАНИЗМОВ 855

Цифровые информационно-телекоммуникационные технологии

М.В. Иванов, И.В. Калашников, М.М. Нуруллаев
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ СЕТИ ИНТЕРНЕТ НА ОСНОВЕ
МЕТАГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ 880

CONTENTS

Mathematical Modeling, Numerical Methods

- V. Volkov, A. Kulvits, A. Kovalenko, V. Salukhov
APPLIED ASPECTS OF OPTIMIZATION OF ORBITAL STRUCTURES OF SATELLITE SYSTEMS BY SPECIFYING PARAMETERS OF ORBITAL MOTION 719

Robotics, Automation and Control Systems

- M. Kochetkov, D. Korolkov, V. Petrov, O. Petrov, S. Simonov, A. Terentev
APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS WITH FUZZY LOGIC ELEMENTS FOR GROUND ENVIRONMENT ASSESSMENT OF ROBOTIC GROUP 746

- Y.I. Al Mashhadany
DESIGN AND ANALYSIS OF 7-DOF HUMAN-LINK MANIPULATOR BASED ON HYBRID INTELLIGENT CONTROLLER 774

Artificial Intelligence, Knowledge and Data Engineering

- I. Stepanyan, A. Homich
STRUCTURE AND FUNCTIONS OF A REPLICATIVE NEURO-LIKE MODULE 803

- Yu. Shichkina, V.M. Ha
METHOD FOR CREATING COLLECTIONS WITH EMBEDDED DOCUMENTS FOR DOCUMENT-ORIENTED DATABASES TAKING INTO ACCOUNT EXECUTABLE QUERIES 829

- A. Lyakh
MINIMAL STRUCTURE OF THE DATABASE FOR STORING ORGANISMS' BIODIVERSITY DATA 855

Digital Information Telecommunication Technologies

- M. Ivanov, I. Kalashnikov, M. Nurullaev
STUDY OF INTERNET STRUCTURE PROPERTIES BASED ON METAGRAPH MODELS 880

В.Ф. Волков, А.В. Кульвиц, А.Ю. Коваленко, В.И. Салухов
**ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ
ОРБИТАЛЬНЫХ СТРУКТУР СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ЗА
СЧЕТ УТОЧНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТАЛЬНОГО
ДВИЖЕНИЯ**

Волков В.Ф., Кульвиц А.В., Коваленко А.Ю., Салухов В.И. **Прикладные аспекты оптимизации орбитальных структур спутниковых систем за счет уточнения параметров орбитального движения.**

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации баллистической структуры спутниковой системы дистанционного зондирования Земли. Подходы к баллистическому проектированию спутниковой системы, ранее разработанные специалистами различных научных школ, были ориентированы на поддержание структурной устойчивости системы за счет развертывания группировок с одинаковой геометрий и с одинаковыми наклонениями, что обеспечивало одинаковые вековые уходы элементов всех орбит. Вместе с тем существует целый комплекс задач, при котором необходимо сформировать спутниковую систему на орбитах разных высот. Для решения задачи обеспечения требуемого уровня устойчивости нового кластера орбитальных структур предлагается подход, включающий эвристическое формирование множества целевых разновысотных орбит; определение некоторой базовой околокруговой орбиты; направленный перебор возможных итерационных вариантов квазисинхронных орбит; согласование состава вектора характеристик условий движения и окончательный расчет приемлемого варианта, который гарантирует заданную точность цикла замыкания трассы.

Апробация предлагаемого подхода проведена на примере определения параметров орбит, обеспечивающих равенство эффективных суток в заданном диапазоне высот. Приводится методика выбора степени учета различных физических факторов космической среды, которая позволяет достигнуть одинаковых отклонений прогнозной траектории от эталонной. Характеристики математической модели движения квазисинхронной орбиты, используемые при прогнозировании, рассчитываются из условия обеспечения устойчивости на заданном временном интервале. Для получения соответствующих оценок используются поправки к параметрам орбиты, приведенные из гринвичской системы координат.

Описывается детальный алгоритм, позволяющий однозначно определить характеристики устойчивой структуры, при реализации которого осуществляется переход от решения нормальной системы уравнений к решению двух треугольных систем.

Анализ предметной области показал, что предложенный подход является новым, а решаемая научная задача относится к классу обратных задач космической кибернетики.

Ключевые слова: спутниковая система, квазисинхронная орбита, структурная устойчивость, эталонная орбита, цикл замыкания трассы полета спутника.

1. Введение. Современный этап развития науки предполагает новые подходы к исследованию и моделированию процессов функционирования сложных технических систем. Космические системы (комплексы), а также спутниковые системы как их составные части, являются сложными техническими системами. При

этом обоснование новых концепций, положенных в основу исследования, приведение нового понятийного материала, определение и установление новых свойств таких систем и объектов, показателей для оценивания соответствующих свойств, рассмотрение способов достижения требуемых уровней этих показателей – обязательное условие [1, 2].

Классический подход к проектированию спутниковых систем подразумевает их формирование на базе одной орбиты, пространственное построение спутниковых систем достигается разворотом плоскости орбиты в пространстве относительно какого-либо базового направления. При таком подходе баллистическую структуру спутниковой системы можно считать устойчивой [3-5]. При проектировании разнородных спутниковых систем, формируемых на базе разновысотных орбит [6], баллистическая структура может быть неустойчивой. Построение устойчивой во времени баллистической структуры спутниковой системы в данном случае возможно только в классе квазисинхронных орбит, под которыми понимается такие орбиты спутников, трасса которых повторяется через заданный промежуток времени, называемый циклом замыкания трассы [4, 7], причем обеспечение устойчивой баллистической структуры спутниковой системы достигается равенством циклов замыкания трасс всех орбит системы [8-10]. Использование квазисинхронных орбит обеспечивает стабильное положение орбиты относительно земной поверхности и позволяет успешно выполнять спутниковой системой свою целевую задачу [11]. Как показывает анализ практического применения спутников дистанционного зондирования Земли, результативность целевого функционирования таких спутниковых систем будет эффективнее только на околокруговых орбитах с относительно малым эксцентриситетом, близким к нулю [5].

Таким образом, встает задача обоснования околокруговых квазисинхронных орбит спутников, функционирующих на разных высотах для обеспечения устойчивого баллистического построения разнородных спутниковых систем.

2. Постановка задачи. Под устойчивостью в широком смысле (лат. *stabilitas* – устойчивость, прочность, надежность, неизменность) понимается комплексное свойство системы сохранять свои основные характеристики и свое поведение в условиях возмущающих воздействий различного рода. При этом надо понимать, что чем шире понятие, тем меньше возможностей для его формализации. Соответственно, применяя данное понятие к такой сложной технической системе, как спутниковая, введем понятие

структурной устойчивости (устойчивость баллистической структуры спутниковой системы) как способности спутниковой системы сохранять свои геометрические характеристики во времени [8]. С точки зрения классической теории устойчивости будем считать, что баллистическая структура устойчива, если в процессе движения спутников системы их траектории будут находиться в заданных пределах по отношению к точке равновесия, определяемой начальным построением системы [5, 12].

Применив данный подход на практике, можно сформулировать задачу обоснования околокруговых квазисинхронных орбит различного радиуса следующим образом: для заданного цикла замыкания трассы сформировать множество квазисинхронных околокруговых орбит заданных радиусов, имеющих одинаковые отклонения в заданной области пространства.

3. Обоснование начального приближения параметров квазисинхронных орбит. Формирование параметров квазисинхронных орбит спутников осуществляется в расчетных условиях, включающих в себя только нецентральность гравитационного поля с учетом второй зональной гармоники разложения функции Лежандра в так называемом нормальном гравитационном поле Земли [4, 13, 14]. Такой подход позволяет учитывать влияние внешних сил на эволюцию орбит на длительном временном интервале.

Для обеспечения заданного цикла замыкания трассы спутников необходимо, чтобы для орбит выполнялось следующее равенство:

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = \alpha, \quad (1)$$

где T_{Ω} – драконический период обращения КА; $T_{\text{эф}}$ – эффективные сутки, время полного оборота Земли относительно прецессирующего восходящего узла орбиты; m, n – два взаимно простых числа; α – количество оборотов КА за эффективные сутки.

Нецентральность гравитационного поля Земли с учетом второй зональной гармоники разложения функции Лежандра учитывается при расчете как драконического периода обращения спутника на околокруговых орбитах, так и эффективных суток [14].

Эффективные сутки определяются по следующему выражению:

$$T_{\text{эф}} = \frac{2\pi}{\omega_3 - \dot{\Omega}}, \quad (2)$$

где ω_3 – угловая скорость вращения Земли: $\omega_3 = \frac{2\pi}{T_{\text{ЗВ}}} = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$;

$T_{\text{ЗВ}}$ – звездные сутки; $\dot{\Omega}$ – угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты.

Угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты, обусловленная влиянием нецентральной гравитационного поля Земли, может быть определена по выражению:

$$\dot{\Omega} = \frac{3\pi}{T_{\Omega}} \frac{\pi_2}{\mu p^2} \cos i, \quad (3)$$

где μ – гравитационная постоянная $\mu = 398600.44 \text{ км}^3/\text{с}^2$; π_2 – гравитационная постоянная, обусловленная полярным сжатием Земли $\pi_2 = -1.755 \cdot 10^{10} \text{ км}^5/\text{с}^2$; i – наклонение плоскости орбиты к плоскости экватора; p – фокальный параметр.

Драконический период обращения КА для малых эксцентриситетов, пренебрегая членами разложения, которые содержат e^2 , рассчитывается по выражению:

$$T_{\Omega} = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{\mu}} \left\{ 1 + \frac{3}{2} c_{20} \left(\frac{a_3}{a} \right)^2 \left[3 - \frac{5}{2} \sin^2 i - e \cos \omega (1 - 5 \sin^2 i) \right] \right\}, \quad (4)$$

где a – большая полуось орбиты; c_{20} – постоянная интегрирования второй зональной гармоники; ω – аргумент широты перигея; a_3 – экваториальный радиус Земли.

Из выражения (4) следует, что драконический период зависит от аргумента широты перигея. Таким образом, второе слагаемое в выражении (4) будет описывать долгопериодические изменения драконического периода с периодом, равным периоду оборота перигея орбиты. Поэтому для устранения долгопериодических составляющих необходимо, чтобы спутник в составе орбитальной группировки имел аргумент широты перигея, равный:

$$\omega \approx \pm \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

После определения драконического периода и продолжительности эффективных суток рассчитываются варианты

квазисинхронных орбит, обеспечивающих заданный цикл замыкания трассы полета, то есть необходимо определить ближайшую квазисинхронную орбиту в заданном диапазоне высот $H \in [H_{min}, H_{max}]$. Под ближайшей квазисинхронной орбитой будем понимать квазисинхронную орбиту, высота которой находится в заданном по точности диапазоне высот, и трасса полета которой характеризуется наименьшим количеством витков в сутки.

Перед началом итерационного процесса в качестве начального приближения принимают ближайшие по высоте суточные квазисинхронные орбиты. Алгоритм основан на поиске комбинации взаимно простых чисел m и n с одной высотой и последующим определением высоты для каждой комбинации. Как только высота попадает в диапазон высот, комбинации взаимно простых чисел, характеризующих квазисинхронную орбиту, запоминаются. Алгоритм следующий.

На первом шаге рассчитываются: $m' = \left[\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} \right]$, где $[\cdot]$ – целая

часть числа, тогда $m' = m' + 1$, $n' = n'' = 1$, $C' = C'' = 1 = n_1$.

Если $\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} < \frac{m' + m''}{2}$, то $m_1 = m'$.

Если $\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} > \frac{m' + m''}{2}$, то $m_1 = m''$.

По мере возрастания числа суток (n) определяется последующая квазисинхронная орбита. Так, когда $s = 2, 3, \dots$, то $m_s = m' + m''$, $n_s = n' + n''$, $C_s = C' + C''$.

Если $\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} < \frac{m_s}{n_s}$, то $m'' = m_s$, $n'' = n_s$, то $C'' = C_s$.

Если $\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} > \frac{m_s}{n_s}$, то $m' = m_s$, $n' = n_s$, $C' = C_s$.

Когда C_s достигает требуемой точности заданного цикла замыкания трассы полета спутника, итерационный процесс заканчивается.

В качестве иллюстрации приведем пример расчета ближайших квазисинхронных орбит для высот 500 км и 1100 км (рис. 1). Пусть диапазоне высот $H \in [H_{min}, H_{max}]$ составляет ± 4 км от высоты исходной орбиты.

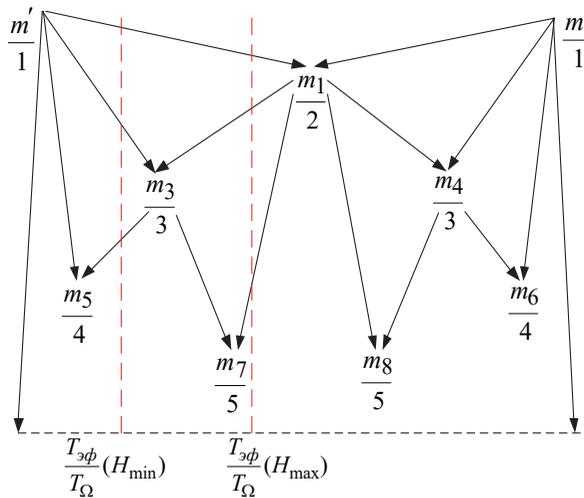


Рис. 1. Индикаторы множества квазисинхронных орбит

Итерационный процесс расчета множества квазисинхронных орбит для высот 500 км и 1100 км приведен в таблице 1. Так для высоты орбиты $H = 500$ км $\alpha = \frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = 15,201$, а для высоты

$H = 1100$ км $\alpha = \frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = 13,407$. Как можно увидеть из таблицы 1,

для высоты $H = 500$ км ближайшей квазисинхронной орбитой будет орбита с высотой $H = 500,42$ км и циклом замыкания трассы

$\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = \frac{76}{5} = 15,2$, а для высоты $H = 1100$ км ближайшей

квазисинхронной орбитой будет орбита $H = 1103,87$ км с циклом

замыкания трассы $\frac{T_{эф}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = \frac{67}{5}$.

Причем отклонение по высоте для первого случая $\Delta H = 0,42$ км, а для второго $\Delta H = 3,87$ км. Дальнейшие итерации приведут к квазисинхронным орбитам, высота которых будет обладать меньшим отклонением по высоте, но они будут обладать более высокой кратностью трассы полета, что негативно сказывается на пространственно-временных характеристиках обзора спутниковой системы, поэтому перебор заканчивается.

Таблица 1. Множество квазисинхронных орбит для высот 500 км и 1100 км

Номер итерации	Высота орбиты			
	$H=500$ км		$H=1100$ км	
s	α	$\frac{m_s}{n_s}$	α	$\frac{m_s}{n_s}$
1	15,667	$\frac{47}{3}$	13,681	$\frac{41}{3}$
2	15,5	$\frac{31}{2}$	13,5	$\frac{27}{2}$
3	15,4	$\frac{77}{5}$	13,4	$\frac{67}{5}$
4	15,333	$\frac{46}{3}$	-	-
5	15,286	$\frac{107}{7}$	-	-
6	15,25	$\frac{61}{4}$	-	-
7	15,222	$\frac{137}{9}$	-	-
8	15,2	$\frac{76}{5}$	-	-

Полученные результаты являются начальным приближением для поиска и уточнения параметров квазисинхронных орбит с учетом всей совокупности возмущающих факторов (более сложной математической модели движения).

В ряде случаев, когда высоты орбит незначительно отличаются друг от друга, этого можно добиться путем равенства эффективных суток [5].

С учетом выражения (3) для наклона орбиты получим:

$$\cos i = \left(\frac{\mu a^2 (1-e)^2 \left(\frac{2\pi}{T_{зв}} - \frac{2\pi}{T_{эф}} \right) T_{эф}}{3\pi \tau_2 s} \right). \quad (6)$$

Использував выражение для числа оборотов спутника за эффективные сутки (1) для драконического периода обращения спутника, можно записать:

$$\frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{\mu}} \left[1 + \frac{3}{2} c_{20} \left(\frac{a_2}{a} \right)^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{5}{2} \cos^2 i \right) \right] = \frac{T_{\text{эф}}}{s}. \quad (7)$$

Используя выражения (6) и (7), после несложных преобразований получим уравнение, которое позволяет рассчитать параметры орбит, для которых будет обеспечиваться равенство эффективных суток:

$$\frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{\mu}} \left\{ 1 + \frac{3}{2} c_{20} \left(\frac{a_2}{a} \right)^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{5}{2} \left(\frac{\mu a^2 (1-e)^2 \left(\frac{2\pi}{T_{\text{зв}}} - \frac{2\pi}{T_{\text{эф}}} \right) T_{\text{эф}}}{3\pi l_2 s} \right) \right] \right\} = \frac{T_{\text{эф}}}{s}. \quad (8)$$

Таким образом, параметры орбит будут незначительно отличаться, но эффективные сутки будут одинаковы и, следовательно, вековые отклонения под действием полярного сжатия Земли будут одинаковы. Уравнение (8) решается численно относительно большой полуоси при заданных значениях эффективных суток и относительного эксцентриситета.

Таким образом, при заданных значениях эффективных суток, количества оборотов спутника за эффективные сутки, эксцентриситетах орбит необходимо определить параметры орбит: большие полуоси орбит и наклоны плоскостей орбит, при которых у всех орбит эффективные сутки будут равны заданному значению [15, 16].

Рассмотрим пример реализации данного подхода к определению параметров квазисинхронных орбит. В качестве примера рассмотрим квазисинхронную орбиту с высотой $H = 1103,87$ км и циклом

замыкания трассы $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = \frac{67}{5}$. Для заданных исходных данных

получены численные зависимости значения большой полуоси (рис. 2) и наклона орбиты (рис. 3) в зависимости от изменений относительного эксцентриситета. Параметры орбит, обеспечивающие равенство эффективных суток в заданном диапазоне высот $H \in [H_{\min}, H_{\max}]$, представлены в таблице 2.

В таблице 2 представлено множество квазисинхронных орбит с одинаковым циклом замыкания трассы полета $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{m}{n} = \frac{67}{5}$.

Полученное множество квазисинхронных орбит позволяет выбрать единственную орбиту, которая обеспечит структурную устойчивость спутниковой системы, то есть менее подвержена воздействию возмущений внешней среды (гравитационных полей и атмосферы). Применительно к рассмотренному примеру такой орбитой является орбита с относительным эксцентриситетом $e = 0,004$ и большой полуосью $a = 7485,366$ км.

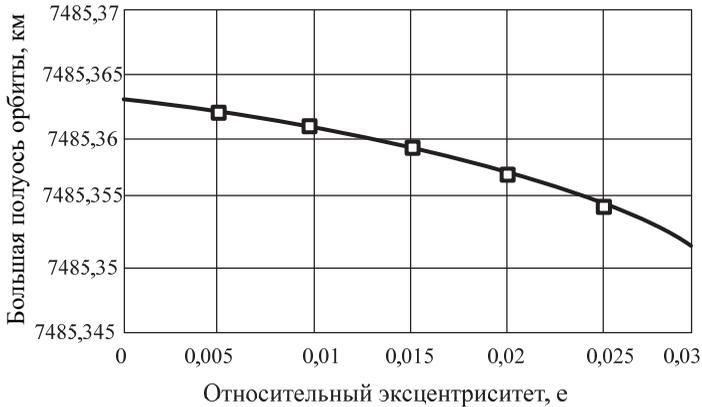


Рис. 2. Зависимость большой полуоси орбиты КА от относительного эксцентриситета

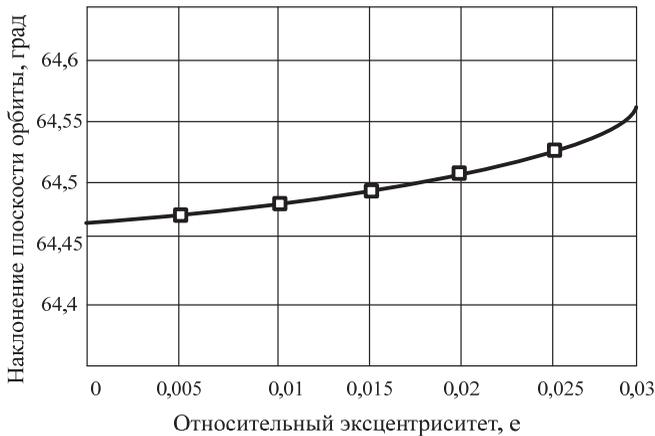


Рис. 3. Зависимость наклона орбиты КА от относительного эксцентриситета

Таблица 2. Параметры орбит, обеспечивающих равенство эффективных суток в заданном диапазоне высот

$e, -$	$a, \text{ км}$	$i, \text{ град}$	$T, \text{ с}$	$r_p, \text{ км}$
0	7485,367	61,502	6436,989	7485,367
0,001	7485,367	61,502	6436,989	7485,359
0,002	7485,366	61,502	6436,989	7485,337
0,003	7485,366	61,503	6436,989	7485,299
0,004	7485,366	61,503	6436,989	7485,246
0,005	7485,366	61,504	6436,989	7485,179
0,006	7485,365	61,504	6436,989	7485,096
0,007	7485,365	61,505	6436,989	7484,998
0,008	7485,364	61,506	6436,989	7484,886
0,009	7485,364	61,507	6436,989	7484,758
0,01	7485,363	61,508	6436,989	7484,615
0,011	7485,363	61,510	6436,989	7484,458

Однако формирование параметров движения только в нормальном гравитационном поле Земли не позволяет сформировать устойчивую баллистическую структуру на орбитах различных радиусов [17, 18]. В то же время прогнозирование движения спутников в единых условиях движения, которые учитывают более сложные математические модели движения, для орбит различного радиуса приводит к различным отклонениям относительно эталонного движения, что влечет за собой нарушение устойчивости баллистической структуры спутниковой системы [8].

4. Анализ условий движения. Под условиями движения понимается физическое состояние среды движения и движущегося в ней спутника:

$$\lambda = \langle S, a \rangle^T, \quad (9)$$

где λ – вектор характеристик условий движения; S – вектор характеристик среды движения; a – вектор характеристик спутника.

Физическое состояние (во времени и пространстве) факторов космической среды, оказывающих влияние на движение спутника, называется средой движения спутника. Согласно классической механике к числу таких факторов относят те, результатом взаимодействия с которыми являются силы и моменты, определяющие траекторию движения спутника. Данные характеристики определяют вектор характеристик среды движения (S) [14].

Под характеристиками спутника, определяющими вектор a , будем понимать совокупность только тех его характеристик, которые влияют на параметры его движения и целевое функционирование.

Таким образом, вектор характеристик условий движения однозначно определяет совокупность возмущающих факторов, которые влияют на движение спутника, и, как следствие, обуславливает математическую модель движения, под которой понимаются математические соотношения, устанавливающие однозначную связь параметров движения спутника с условиями движения и временем. Из всего многообразия видов математических моделей движения, как показывает практика навигационно-баллистического обеспечения, целесообразно выбрать динамическую детерминированную модель вида (10). Динамическими моделями движения называются такие, в которых устанавливается однозначная дифференциальная зависимость от скоростей от координат и скоростей спутника на основе силовых взаимодействий между телами. В случае, если условия движения имеют детерминированное описание, то и соответствующая им математическая модель движения также будет детерминированной.

$$\dot{q}(t) = f(q, \lambda, t), \quad (10)$$

где q – вектор параметров движения КА; f – координатная вектор функция; t – время.

Степень полноты учета возмущающих сил, учитываемых в математической модели движения спутника, целесообразно выбирать исходя из требований по точности прогнозирования параметров движения спутника и возможного диапазона интервалов прогноза [15, 19].

Рассмотрим пример прогнозирования движения спутника по околокруговой орбите высотой $H = 1103,87 \text{ км}$. Как показывают результаты расчетов, состав вектора характеристик условий движения (фактически учет различных возмущающих сил) существенно влияет на точность прогнозирования движения. Сравнительный анализ проведен с использованием высокоточных навигационных параметров движения спутников Jason-3 (проект космической океанографической лаборатории под эгидой NASA, CNES и Eumetsat) и Grace (проект изучения гравитационного поля Земли под эгидой NASA и Германского центра авиации и космонавтики).

Результаты расчетов отклонений прогнозируемого движения от эталонного на околокруговой орбите высотой $H = 1103,87 \text{ км}$ на

месячном интервале времени в следующих условиях движения: модель гравитационного поля Земли – ПЗ 90.11, порядок зональных и тессеральных гармоник гравитационного поля – 8×8 , динамическая атмосфера – ДМА 2000, наличие притяжения Луны и Солнца представлены на рисунке 4. Максимальное отклонение от эталонного движения не превышает 12 км в трансверсальном направлении.

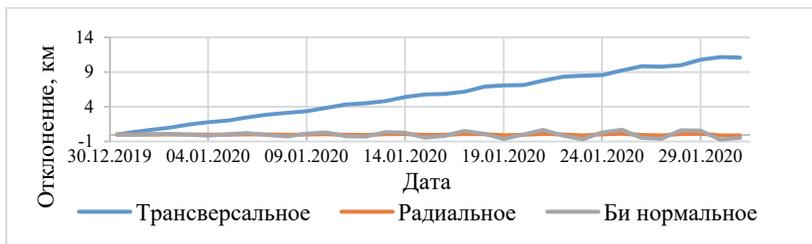


Рис. 4. Отклонение прогнозируемого движения от эталонного с учетом разложения гравитационного поля Земли на гармоники порядка 8×8

Изменение вектора характеристик условий движения приводит к существенному изменению отклонений прогнозного движения от эталонного. Так изменение только степени учета порядка зональных и тессеральных гармоник гравитационного поля (степень учета – 4×4) приводит к увеличению максимального отклонения от эталонного движения до 140 км в трансверсальном направлении (рис. 5).

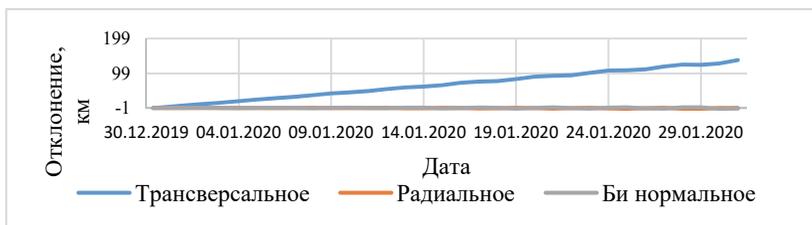


Рис. 5. Отклонение прогнозируемого движения от эталонного с учетом разложения гравитационного поля Земли на гармоники порядка 4×4

Обеспечение устойчивости баллистической структуры разнородной спутниковой системы возможно только в условиях согласования моделей движения спутников, функционирующих на орбитах разного радиуса. Обоснование математической модели движения, позволяющей согласовать степень учета различных физических факторов космической среды, обеспечивает достижение одинаковых отклонений прогнозной траектории от эталонной.

5. Согласованная математическая модель движения. В качестве математической модели движения будем рассматривать детерминированную динамическую модель вида (10) [20].

В общем виде задача согласования модели движения сводится к определению вектора характеристик условий движения (λ) исходя из следующего выражения:

$$\tilde{\lambda} = \arg \min_{\lambda \in \Omega_{\lambda}} \frac{1}{T} \int_0^T \rho [q_s(T), q(\lambda, T)] d\tau, \quad (11)$$

где $\rho [q_s(\tau), q(\lambda, \tau)]$ – функция, имеющая физический смысл расстояния между эталонной q_s и квазисинхронной q орбитами.

Под эталонной орбитой понимается орбита, полученная по результатам обработки высокоточных измерений текущих навигационных параметров. Выражение (11) определяет математическую модель движения, минимизирующую отклонение квазисинхронной орбиты от эталонной на временном интервале $[0, T]$ на множестве допустимых решений Ω_{λ} . Согласование математических моделей движения заключается в поиске таких характеристик условий движения λ_k для каждой квазисинхронной орбиты q_k , которые обеспечивают одинаковые минимальные отклонения от соответствующей эталонной q_{sk} , то есть множество характеристик условий движения $\lambda_k \in \Omega_{\lambda}$.

Рассмотрим определения вектора характеристик условий движения для одной из согласуемых орбит.

Будем считать, что параметры движения спутника однозначно определяются следующим соотношением:

$$q(t) = \Phi(t) \lambda, \quad (12)$$

где $\Phi(t)$ – координатная функция параметров движения.

Исходя из того, что квазисинхронная орбита должна иметь заданные отклонения от эталонной, запишем следующее выражение:

$$q_s(t) = q(t) + \delta q(t). \quad (13)$$

Здесь $\delta q(t)$ – значения отклонений квазисинхронной орбиты от эталонной, принадлежащие множеству допустимых отклонений $\delta q(t) \in \Omega_{\delta q}$.

С учетом выражения (12) уравнение (13) примет следующий вид:

$$q_3(t) = \Phi(t) \cdot \lambda + \delta q(t). \quad (14)$$

Полученное выражение, которое характеризует зависимость параметров движения от характеристик условий движения, носит непрерывный характер. В то же время моделирование движения в соответствии с динамической математической моделью движения происходит в дискретные моменты времени, определяемые шагом численного решения системы дифференциальных уравнений. В соответствии с этим выражение (14) в дискретные моменты времени на интервале согласования математической модели движения (T) примет вид:

$$q_3(t_i) = \Phi(t_i) \cdot \lambda + \delta q(t_i), t_i \in [0, T]. \quad (15)$$

Воспользуемся критерием оптимальности метода наименьших квадратов, так как данный метод требует наличия минимальной априорной информации [20, 21]. В этом случае исходное выражение (11) может быть записано в следующем виде:

$$\tilde{\lambda} = \arg \min_{\lambda \in \Omega_\lambda} \frac{1}{T} \int_0^T (q_3(\tau) - \Phi(\tau) \cdot \lambda)^T (q_3(\tau) - \Phi(\tau) \cdot \lambda) d\tau. \quad (16)$$

Для определения искомой оценки $\tilde{\lambda}$ воспользуемся необходимым условием экстремума подынтегральной функции $F(\lambda) = (q_3(\tau) - \Phi(\tau) \cdot \lambda)^T (q_3(\tau) - \Phi(\tau) \cdot \lambda)$.

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda} = 0. \quad (17)$$

Необходимое условие (17) представляет собой замкнутую систему линейных уравнений (нормальную систему уравнений) и имеет единственное решение. Значение производной определяется следующим выражением:

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda} = \Phi^T \Phi \lambda - \Phi^T q_3 = 0. \quad (18)$$

В этом случае нормальная система уравнений принимает вид:

$$\Phi^T \Phi \lambda = \Phi^T q_3. \quad (19)$$

Данная система имеет единственное решение:

$$\tilde{\lambda} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T q_3. \quad (20)$$

Полученная оценка вектора характеристик условий движения является несмещенной, состоятельной и эффективной [22]. Таким образом, выражение (20) определяет характеристики математической модели движения квазисинхронной орбиты, обеспечивающие отклонение от эталонной на заданном временном интервале не больше заданного.

Согласование математической модели движения для различных квазисинхронных орбит достигается путем решения выражений (12), (20) для каждой орбиты с учетом единой системы отклонений ($\delta q(t) \in \Omega_{\delta q}$).

Результаты согласования моделей движения, обеспечивающих одинаковое отклонение орбит от эталонного движения на месячном интервале времени, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры характеристик условий движения согласованной математической модели движения

Высота орбиты, км	Математическая модель движения	Максимальное отклонение прогнозируемого движения от эталонного, км
500,42	Модель гравитационного поля Земли – ПЗ 90.11, порядок зональных и тессеральных гармоник гравитационного поля – 16x16, динамическая атмосфера – ДМА 2000	20,1
1103,87	Модель гравитационного поля Земли – ПЗ 90.11, порядок зональных и тессеральных гармоник гравитационного поля – 8x8, учет наличия притяжения Луны, Солнца	19,8

С учетом рассчитанных характеристик условий движения необходимо уточнить параметры орбитального движения, полученные в качестве первого приближения.

6. Уточнение орбитальных параметров для обеспечения заданного цикла замыкания трассы в сформированных условиях движения. Наиболее просто данная задача решается, если определение параметров квазисинхронных орбит производится в восходящем узле орбиты. В качестве начальных условий целесообразно взять проекции координат и проекции вектора скорости спутников в относительной гринвичской системе координат [14].

Для обеспечения одинакового цикла замыкания трассы (ЦЗТ) полета спутников в сформированных условиях движения необходимо выполнить следующее условие:

$$q(t_0 + T_{\text{ЦЗТ}}) - q_0(t_0) \leq \varepsilon, \quad (21)$$

где $q_0(t_0)$ – вектор параметров движения на момент прохождения восходящего узла орбиты t_0 ; $q(t_0 + T_{\text{ЦЗТ}})$ – вектор параметров движения на время ЦЗТ; ε – заданная точность.

Фактически условие (21) определяет задачу уточнения начальных условий движения, данная задача носит нелинейный характер. В связи с этим в практике навигационно-баллистического обеспечения данная задача решается итерационно в линейной постановке [23].

Как было показано в [8], системы линейных уравнений и состав определяемых параметров имеют вид:

$$\sum_{j=1}^5 \frac{\partial q_i}{\partial q_{0j}} \Delta q_{0j} - \dot{q}_i T_{\text{ЦЗТ}} = \Delta q_i, \quad i = 1, \dots, 5; \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^5 \frac{\partial t_{\Omega}}{\partial q_{0j}} \Delta q_{0j} - t_{\Omega}(\bar{q}_0) = \Delta t, \quad (23)$$

где $\frac{\partial q_j}{\partial q_{0i}}$ – частная производная от i параметра движения $q = \{x, y, z, V_x, V_y, V_z\}^T$ в гринвичской системе координат по j параметру начальных условий $q_0 = \{x_0, y_0, z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\}^T$ на момент времени $t = t_{\Omega_0} + T_{\text{ЦЗТ}}$; Δq_{0i} – i параметр вектора поправок

$\Delta q_0 = \{\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \Delta V_{x0}, \Delta V_{y0}, \Delta V_{z0}\}^T$ к начальным условиям; Δq_i – i параметр вектора отклонений Δq между i параметром вектора q в момент времени $t = t_{\Omega 0} + T_{ЦЗТ}$ и i параметром вектора q_0 в момент t_0 ,

который определяется $\Delta q_i = q_i(t) - q_{0i}$; $\frac{\partial t_{\Omega}}{\partial q_{0j}}$ – частная производная от

времени выхода в восходящий узел $N+1$ витка по j параметру начальных условий $q_0 = \{x_0, y_0, z_0, V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}\}^T$ на момент времени $t = t_0 + T_{ЦЗТ}$; $T_{ЦЗТ}$ – интервал времени заданной кратности между временами прохождения восходящих узлов первого $t_{\Omega 0}$ и $N+1$ витков t_{Ω} , который рассчитывается следующим образом $T_{ЦЗТ} = [t_{\Omega} + \Delta t - t_{\Omega 0}]$; N – количество витков в цикле замыкания трассы.

Система уравнений (22) решается итерационным способом, условие окончания которого определяются выражениями (23). Для получения продолжительности цикла замыкания трассы $T_{ЦЗТ}$ требуемой кратности интервал Δt необходимо округлять на каждой итерации до заданной кратности.

В качестве примера рассмотрим уточнение параметров квазисинхронной орбиты высотой 1103.47 км (табл. 2) в сформированных условиях движения (табл. 3). В таблице 4 представлены поправки к параметрам орбиты, приведенные из гринвичской системы координат по известным отношениям [14] к виду оскулирующих элементов.

Таблица 4. Результаты уточнения орбитальных параметров

	e , -	a , км	i , град	T , с	r_p , км
Исходная орбита	0,004	7485,366	61,503	6436,989	7485,246
Поправки	-	0,201	-0,0003	8,121	0,184

7. Наблюдаемость системы линейных уравнений. В связи с тем, что определение фактических параметров квазисинхронной орбиты связано с решением системы линейных уравнений, правомочно ставить вопрос о ее наблюдаемости. Согласно [20] наблюдаемость – возможность однозначного определения состояния и характеристик структуры динамической системы по известному сигналу на ее выходе. Это означает, что для того, чтобы система уравнений (22) имела единственное решение, она должна быть наблюдаема.

В практике навигационно-баллистического обеспечения космических полетов имеется класс орбит, у которых система уравнений (22) не наблюдаема. Расчеты показывают, что для орбит с наклоном, равным или близким к 63.4° , система уравнений (22) плохо сходится. Область сходимости данной системы уравнений мала и при неудачно выбранных начальных отклонениях задача расходится – в этом случае получить решение невозможно.

Для получения решения в таких условиях воспользуемся методом, основанным на разложении Холесского [24]. Данный метод применим для решения систем линейных уравнений с матрицей коэффициентов, обладающей свойствами матрицы Грамма [24, 25].

Представим исходную систему линейных уравнений (22) в следующем виде [24]:

$$\delta q = A \Delta q, \quad (24)$$

где δq – вектор невязок параметров движения в моменты времени t_0 и $t_0 + T_{ЦЗТ}$; Δq – вектор неизвестных поправок к уточняемому вектору

q_0 ; $A = \begin{bmatrix} \frac{\partial q}{\partial q_0} \end{bmatrix}$ – матрица частных производных.

Домножим правую и левую части уравнения (24) на транспонированную матрицу частных производных A^T :

$$A^T A \Delta q = A^T \delta q. \quad (25)$$

Введем следующее обозначение:

$$C = A^T A, \quad (26)$$

где C – матрица Грамма.

С учетом принятых обозначений (26) нормальная система уравнений (25) принимает вид:

$$C \Delta q = A^T \delta q. \quad (27)$$

Предлагаемый метод основан на факте существования верхней треугольной матрицы U , такой что:

$$U^T U = C. \quad (28)$$

В этом случае решение системы уравнений (24) сводится к решению двух треугольных систем:

$$U^T Y = A^T \delta q, \quad (29)$$

$$U \Delta q = Y. \quad (30)$$

Элементы матрицы U определяются на основании факторизации Холецкого:

$$\begin{cases} d_v = C_{vv} - \sum_{k=1}^{v-1} U_{kv}^2; \\ U_{vv} = d_v^{1/2}; \\ U_{vj} = \frac{C_{vj} - \sum_{k=1}^{v-1} U_{kv} U_{kj}}{U_{vv}}, \end{cases} \quad (31)$$

где $j = v+1, \dots, n; v = 2(1)n$.

Для случая $v=1$ выражения (31) имеют вид:

$$\begin{cases} d_1 = c_{11} \\ U_{11} = d_1^{1/2}. \end{cases} \quad (32)$$

Необходимо заметить, что предлагаемый подход к решению нормальных систем уравнений имеет преимущество перед классической схемой, основанной на обращении матрицы коэффициентов [26], и заключается в простоте реализации расчетов.

Рассмотрим в качестве примера случай для шести определяемых параметров. Пусть исходные данные для системы уравнений (27) имеют следующие числовые значения: матрица частных производных:

$$A = \begin{bmatrix} 1.1 & 2.1 & 1.8 & 4.2 & 2.5 & 1.6 \\ 0.6 & 1.5 & 1.4 & 0.3 & 1.2 & 0.5 \\ 2.5 & 1.8 & 2.3 & 3.2 & 1 & 1.2 \\ 0.4 & 0.3 & 1.2 & 1.1 & 1.6 & 1.9 \\ 1.3 & 2 & 1.1 & 1.6 & 2.5 & 1.4 \\ 0.2 & 0.1 & 1.6 & 0.9 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix},$$

вектор невязок параметров движения:

$$\delta q = \begin{bmatrix} 0.8 \\ 2.3 \\ 3.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.5 \end{bmatrix}.$$

Исходя из соотношения (22) матрица Грамма будет иметь вид:

$$C = \begin{bmatrix} 9.71 & 10.45 & 10.8 & 15.5 & 9.94 & 7.7 \\ 10.45 & 14 & 12.74 & 18.65 & 14.37 & 9.67 \\ 10.8 & 12.74 & 15.7 & 19.86 & 13.79 & 10.64 \\ 15.5 & 18.65 & 19.86 & 32.55 & 20.18 & 15.31 \\ 9.94 & 14.37 & 13.79 & 20.18 & 17.66 & 12.46 \\ 7.7 & 9.67 & 10.64 & 15.31 & 12.46 & 9.91 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с выражением (31) элементы треугольной матрицы U будут иметь следующие значения:

$$U = \begin{bmatrix} 3.116 & 3.354 & 3.466 & 4.974 & 3.19 & 2.471 \\ 0 & 1.659 & 0.673 & 1.186 & 2.213 & 0.834 \\ 0 & 0 & 1.798 & 1.013 & 0.692 & 0.842 \\ 0 & 0 & 0 & 2.318 & 0.425 & 0.508 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.388 & 1.393 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.448 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

С учетом полученных численных значений матрицы U решается треугольная система (29):

$$Y = \begin{bmatrix} 3.395 \\ 0.02 \\ 0.767 \\ -1.108 \\ -1.3 \\ 0.941 \end{bmatrix}. \quad (34)$$

На заключительном этапе с учетом значений (33, 34) решается треугольная система (30):

$$\Delta q = \begin{bmatrix} -0.953 \\ 2.954 \\ 0.828 \\ -0.379 \\ -3.046 \\ 2.101 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Для анализа предлагаемого подхода к решению систем линейных уравнений сравним полученное решение (35) с решением, получаемым путем обращения матрицы C . Обращение матрицы осуществлялось методом Гаусса [24]:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 2.759 & -3.319 & -0.087 & -0.052 & 3.366 & -2.964 \\ -3.319 & 4.991 & -0.191 & -0.14 & -5.001 & 4.419 \\ -0.087 & -0.191 & 0.429 & -0.067 & 0.166 & -0.311 \\ -0.052 & -0.14 & -0.067 & 0.21 & 0.078 & -0.173 \\ 3.366 & -5.001 & 0.166 & 0.078 & 5.541 & -5.003 \\ -2.964 & 4.419 & -0.311 & -0.173 & -5.003 & 4.983 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Решение системы (27) получается путем домножения системы линейных уравнений слева на C^{-1} :

$$\Delta q = C^{-1} A^T \delta q. \quad (37)$$

Выражение (37) позволяет получить численное значение Δq , которое совпадает с решением (35).

8. Заключение. Рассмотрены вопросы формирования и уточнения квазисинхронных орбит, которые являются частью одного из наиболее важных этапов баллистического проектирования спутниковых систем, а именно этапа уточнения орбитальной структуры спутниковой системы. Традиционные подходы к проектированию спутниковых систем предполагают их формирование на одновысотной орбите, пространственное построение заданной баллистической структуры достигается разворотом плоскости орбиты

в пространстве относительно какого-либо базового положения. Вместе с тем существует целый комплекс задач, при котором необходимо сформировать спутниковую систему на различных высотах, обладающую заданной структурной устойчивостью. Для решения данного класса задач предложен подход, направленный и на обеспечение устойчивости структуры во времени, и на обеспечение требуемого цикла замыкания трассы полета одиночного космического аппарата. Математический подход к решению поставленной задачи основывается на трех этапах. На первом этапе формируется множество квазисинхронных орбит и в первом приближении ищется ближайшая орбита для простой модели движения спутника.

На втором этапе согласовываются математические модели движения спутников на квазисинхронных орбитах, полученных на первом этапе, с целью обеспечения одинаковых отклонений орбит от эталонного движения в различных физических условиях движения спутников. Согласование математических моделей происходит на основе методов статистического анализа.

На заключительном этапе уточняются параметры движения спутников с учетом сформированной согласованной математической модели движения для обеспечения заданной длительности цикла замыкания трассы и исследуется наблюдаемость сформированной системы уравнений.

Полученные результаты позволяют оптимизировать структуру орбитального построения спутниковых систем, реализуемых на орбитах различных радиусов, обоснованных в работах [6, 8, 9, 11].

Литература

1. *Карсаев О.В.* Обзор традиционных инновационных систем планирования миссий космических аппаратов // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 5(48). С. 151–181.
2. *Юсупов Р.М., Мусаев А.А.* Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 1(51). С. 5–34.
3. *Артюшенко В.М., Виноградов Д.Ю.* Задача баллистического проектирования космической системы дистанционного зондирования земли на устойчивых околокруговых солнечно-синхронных орбитах при длительных сроках существования космических аппаратов // Информационно-технологический вестник: Технологический университет (Королев). 2018. № 3(17). С. 3–9.
4. *Аверкиев Н.Ф и др.* Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем // ВКА им. А.Ф. Можайского. 2017. 302 с.
5. *Власов С.А., Коваленко А.Ю., Кульвиц А.В.* Обоснование взаимно устойчивых орбит КА // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 5. С. 16–23.
6. *Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Н.* О задаче оптимизации орбитальной структуры многоярусных спутниковых систем непрерывного обзора околоземного пространства // Известия высших учебных заведений: Машиностроение. 2018. № 4(697). С. 68–79.

7. *Аверкиев Н.Ф., Богачёв С. А., Власов С.А., Ключников В.Ю.* Квазисинхронные резервные орбиты КА // Двойные технологии. 2017. № 4(81). С. 18–20.
8. *Коваленко А.Ю.* Баллистическое проектирование разнородной системы КА с заданным циклом замыкания трассы // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 3(40). С. 200–204.
9. *Улыбышев С.Ю., Лысенко А.А.* Проектирование спутниковых систем оперативного глобального мониторинга с суточной кратностью повторения трассы полета // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 3.С. 229–238.
10. *Лысенко А.А., Улыбышев С.Ю.* Построение спутниковых систем оперативного глобального мониторинга поверхности Земли с перерывом в наблюдении, не превышающим периода одного витка // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3(102). С. 65–73.
11. *Разумный Ю.Н. и др.* Способ поддержания функционирования спутниковой системы непрерывного глобального обзора околоземного космического пространства // Патент на изобретение, рег. № 2017146650 от 28.12.2017. М.: Роспатент. 2019.
12. *Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения // М.: Гостехиздат. 1950. 472 с.
13. *Разумный Ю.Н., Козлов П.Г., Разумный В.Ю.* Анализ параметрических зависимостей для круговых и эллиптических орбит, обладающих свойством нодальной синхронности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 3. С. 200–204.
14. *Эльясберг П.Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли / изд. 2-е. // М.: Либроком. 2011. 544 с.
15. *Улыбышев С.Ю.* Анализ взаимной эволюции параметров двух синхронно прецессирующих орбит // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 3(51). С. 5–12.
16. *Streetman B., Peck M.A.* New synchronous orbits using the geomagnetic lorentz force // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2007. vol. 30. no. 6. pp. 1677–1690.
17. *Mostaza-Prieto D., Roberts P.C.E.* Methodology to analyze attitude stability of satellites subjected to aerodynamic torques // Journal of guidance, control, and dynamics. 2016. vol. 39. no. 3. pp. 437–449.
18. *Rao Y., Han C., Yin J.* Hovering formation design and control based on relative orbit elements // Journal of guidance, control, and dynamics. 2016. vol. 2. no. 39. pp. 360–371.
19. *Jewison C., Miller D.W.* Probabilistic trajectory optimization under uncertain path constraints for close proximity operations // Journal of guidance, control, and dynamics. 2018. vol. 9. no. 41. pp. 1843–1858.
20. *Брандин В.Н., Васильев А.А.* Экспериментальная баллистика космических аппаратов // М.: Машиностроение. 1984. 258с.
21. *Погодина Н.С., Носовец А.А.* Применение метода наименьших квадратов // Приложение к журналу известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2015. № 8. С. 84–85.
22. *Матвеев М.Г., Сирота Е.А., Подвальный С.Л.* Анализ свойств мнк-оценок при идентификации параметров распределенных динамических процессов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: Сб. научн. тр. Международной научной конференции. Воронежский государственный университет. 2020. С. 961–967.
23. *Саврасов Ю.С.* Методы определения орбит космических объектов // М.: Машиностроение. 1981. 174 с.
24. *Ломако Г.И.* Экспериментальная баллистика КА // СПб.: ВИКА имени А.Ф. Можайского. 1997.454 с.

25. *Прохорова Е.Ф.* Применение последовательных схем МНК для вычисления решения СЛАУ // Сборник научных статей IV научно-практической международной конференции (школы-семинара) молодых ученых: в двух частях. 2018. С. 449–453.
26. *Измайлов А.Ф. Солодов М.В.* Численные методы оптимизации // М.: Физматлит. 2003. 276 с.

Волков Валерий Федорович – д-р воен. наук, профессор, профессор, кафедра системного анализа и математического обеспечения автоматизированных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория полета космических аппаратов, оптимальное управление, математическое моделирование. Число научных публикаций – 162. vka@mil.ru; ул. Ждановская, 13, 197082, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812) 230-28-15; факс: +7(812) 23712-49.

Кульвиц Алексей Владимирович – заместитель начальника кафедры, кафедра баллистико-навигационного обеспечения летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория полета космических аппаратов, оптимальное управление, математическое моделирование. Число научных публикаций – 102. vka@mil.ru; ул. Ждановская, 13, 197082, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812) 230-28-15; факс: баллистико-навигационного обеспечения летательных аппаратов.

Коваленко Алексей Юрьевич – канд. техн. наук, докторант, кафедра баллистико-навигационного обеспечения летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: экспериментальная баллистика, теория полета космических аппаратов, математическое моделирование. Число научных публикаций – 82. vka@mil.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812) 230-2815; факс: +7(812) 23712-49.

Салухов Владимир Иванович — канд. техн. наук, доцент, начальник отдела, отдел аспирантуры, информационно-образовательных технологий и услуг, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: информационные технологии в образовании, управление жизненным циклом инфотелекоммуникационных систем, анализ и разработка систем поддержки и принятия решений на базе современных информационных технологий. Число научных публикаций — 100. vsigito@litsam.su; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-01-03; факс: +7(812) 328-4450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00886), а также госбюджетной темы № 0073-2019-0004.

V. VOLKOV, A. KULVITS, A. KOVALENKO, V. SALUKHOV
**APPLIED ASPECTS OF OPTIMIZATION OF ORBITAL
STRUCTURES OF SATELLITE SYSTEMS BY SPECIFYING
PARAMETERS OF ORBITAL MOTION**

Volkov V., Kulvits A., Kovalenko A., Salukhov V. Applied Aspects of Optimization of Orbital Structures of Satellite Systems by Specifying Parameters of Orbital Motion.

Abstract. The paper deals with issues related to optimizing the ballistic structure of a satellite system for remote sensing of the Earth. Approaches to the ballistic design of the satellite system, previously developed by specialists from various scientific schools, were focused on maintaining the structural stability of the system by deploying groupings with the same geometry and with the same inclinations, which ensured the same age-old departures of elements from all the orbits. At the same time, there is a whole range of tasks that require the formation of a satellite system in different orbits. To achieve the required level of stability of a new cluster of orbital structures we provide an approach, including: heuristic formation of many target different height orbits; identifying some basic near-circular orbit; selection of possible variants of iterative quasi-synchronous orbits; coordination of the composition of the vector of characteristics of traffic conditions and final calculation of an acceptable option that provides the specified accuracy of the route closure cycle.

Testing of the proposed approach is carried out on the example of determining the parameters of orbits that ensures equality of effective days in a given range of heights. The method of selecting the degree of consideration of various physical factors of the space environment, which ensures the achievement of identical deviations of the forecast trajectory from the reference one, is presented. The characteristics of the mathematical model of quasi-synchronous orbit motion used in forecasting are calculated from the condition of stability at a given time interval. To get the appropriate estimates, we use corrections to the orbit parameters given from the Greenwich coordinate system.

A detailed algorithm is described that provides the possibility of unambiguously determining the characteristics of a stable structure, in the implementation of which the transition from the solution of a normal system of equations to the solution of two triangular systems is performed.

The analysis of the subject area has shown that the proposed approach is new, and the solved scientific problem belongs to the class of inverse problems of space cybernetics.

Keywords: Satellite System, Quasi-synchronous Orbit, Structural Stability, Reference Orbit, Satellite Flight Path Closure Cycle.

Volkov Valery – Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor, Department of System Analysis and Mathematical Automated Control Systems, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: ballistics, theory of flight spacecraft, optimal control, mathematical modeling. The number of publications – 162. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197082, Russia; office phone: +7(812) 230-28-15; fax: +7(812) 23712-49.

Kulvits Aleksey – Deputy Head of Department, Department of Ballistic and Navigation Support of the Aircraft, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: theory of flight spacecraft, optimal control, mathematical modeling. The number of publications – 102. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197082, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812) 230-28-15; fax: +7(812) 23712-49.

Kovalenko Aleksey – Ph.D., Doctoral Student, Department of Ballistic and Navigation Support of the Aircraft, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: experimental

ballistics, theory of flight spacecraft, mathematical modeling. The number of publications – 82. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812) 230-2815; fax: +7(812) 23712-49.

Salukhov Vladimir – Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Department of Post Graduate Studies, Information and Education Technologies and Services, St.-Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPb FRC RAS). Research interests: research and information technologies in education, lifecycle management infocommunication systems, analysis and development of support systems and decision-making on the basis of modern information technologies. The number of publications – 100. vsigito@litsam.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St.-Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-01-03; fax: +7(812) 328-4450.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 19-07-00886), as well budgetary grant 0073-2019-0004.

References

1. Karsaev O.V. [Overview of Traditional Innovative Spacecraft Mission Planning Systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 5(48). pp. 151–181. (In Russ.).
2. Yusupov R.M., Musaev A.A. [Features of evaluating the effectiveness of information systems and technologies]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 1(51). pp. 5–34. (In Russ.).
3. Artyushenko V.M., Vinogradov D.Yu. [The Problem of ballistic design of the Space system of remote sensing of the earth on stable near-circular solar synchronous orbits for long periods of existence of space vehicles]. *Informacionno-tehnologicheskij vestnik: Tekhnologicheskij universitet (Korolev) – Information and technological Bulletin: Technological University (Korolev)*. 2018. vol. 3(17). pp. 3–9. (In Russ.).
4. Averkiev N.F. *Ballisticheskie osnovy proektirovaniya raket-nositel'ev i sputnikovyh sistem* [Ballistic bases of design of launch vehicles and satellite systems]. VKA im. A.F. Mozhajskogo. 302 p. (In Russ.).
5. Vlasov S.A., Kovalenko A.Yu., Kul'vic A.V. [Rationale mutually stable orbits KA]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace instrumentation*. 2018. vol. 5. pp. 16–23. (In Russ.).
6. Razumnyj Yu.N., Samusenko O.E., Nguen Nam. [On the problem of optimization of the orbital structure of multi-tiered satellite systems for continuous observation of near-earth space]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij: Mashinostroenie – Proceedings of higher educational institutions: mechanical engineering*. 2018. vol. 4(697). pp. 68–79. (In Russ.).
7. Averkiev N.F., Bogachyov S.A., Vlasov S.A., Klyushnikov V.Yu. [Quasi-Synchronous reserve orbits of the Spacecraft]. *Dvojnye tekhnologii – Double technologies*. 2017. vol. 4(81). pp. 18–20. (In Russ.).
8. Kovalenko A.Yu. [Ballistic design of a heterogeneous spacecraft system with a given route closure cycle]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 3(40). pp. 45–54. (In Russ.).
9. Ulybyshev S.Yu., Lysenko A.A. [Design of satellite systems for operational global monitoring with a daily repetition rate of the flight path]. *Kosmicheskie issledovaniya – Space research*. 2019. Issue 57. vol. 3. pp. 229–238. (In Russ.).
10. Lysenko A.A., Ulybyshev S.Yu. [Construction of satellite systems for operational global monitoring of the Earth's surface with a break in observation that does not exceed the period of one revolution]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Cosmonautics and rocket science*. 2018. vol. 3(102). pp. 65–73. (In Russ.).

11. Razumnyj Yu.N. et al. [Method for maintaining the functioning of a satellite system for continuous global survey of near-earth space]. Patent for invention, reg. no. 2017146650 from 28.12.2017. Moscow: Rospatent. 2019. (In Russ.).
12. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustojchivosti dvizheniya* [The general problem of traffic stability]. M.:Gostekhizdat. 1950. 472 p. (In Russ.).
13. Razumnyj Yu.N., Kozlov P.G., Razumnyj V.Yu. [Analysis of parametric dependencies for circular and elliptic orbits that have the property of nodal synchronicity]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya – Scientific and technical Bulletin of the Volga region*. 2015. vol. 3 pp. 200–204. (In Russ.).
14. El'yasberg P.E. *Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennyh sputnikov Zemli* [Introduction to the theory of flight of artificial Earth satellites]. M.: Librokom. 2011. 544 p. (In Russ.).
15. Ulybyshev S.Yu. [Analysis of the mutual evolution of two synchronous orbits precancerous]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii – Engineering journal: science and innovation*. 2016. vol. 3(51). pp. 5–12. (In Russ.).
16. Streetman B., Peck M.A. New synchronous orbits using the geomagnetic lorentz force. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2007. vol. 30. no 6. pp. 1677–1690.
17. Mostaza-Prieto D., Roberts P.C.E. Methodology to analyze attitude stability of satellites subjected to aerodynamic torques. *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2016. vol. 39. no 3. pp. 437–449.
18. Rao Y., Han C., Yin J. Hovering formation design and control based on relative orbit elements. *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2016. vol. 2. no. 39. pp. 360–371.
19. Jewison C., Miller D.W. Probabilistic trajectory optimization under uncertain path constraints for close proximity operations. *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2018. vol. 9. no. 41. pp. 1843–1858.
20. Brandin V.N., Vasil'ev A.A. *Ekspperimental'naya ballistika kosmicheskikh apparatov* [Experimental ballistics of space vehicles]. M.: Mashinostroenie. 1984. 258 p. (In Russ.).
21. Pogodina N.S., Nosovec A.A. [Application of the least squares method] *Prilozhenie k zhurnalu izvestiya vuzov: geodeziya i aerofotos"emka. Sbornik statej po itogam nauchno-tehnicheskoy konferencii*. [Appendix to the journal Izvestiya vuzov: geodesy and aerial photography. Collection of articles on the results of the scientific and technical conference]. 2015. vol. 8. pp. 84–85. (In Russ.).
22. Matveev M.G., Sirota E.A., Podval'nyj S.L. [Analysis of the properties of OLS-estimators in parameter identification of distributed dynamic processes]. *Aktual'nye problemy prikladnoj matematiki, informatiki i mekhaniki: Sb. nauchn. tr. Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Voronezhskij gosudarstvennyj universitet*. [Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics: Sat. nauchn. Tr. International scientific conference. Voronezh state University]. 2020. pp. 961–967. (In Russ.).
23. Savrasov Yu.S. *Metody opredeleniya orbit kosmicheskikh obektov* [Methods for determining the orbits of space objects]. M.: Mashinostroenie. 1981. 174 p. (In Russ.).
24. Lomako G.I. *Ekspperimental'naya ballistika KA* [Experimental ballistics of Satellite]. VIKА imeni A.F. Mozhajskogo. 1997. 454 p. (In Russ.).
25. Prohorova E.F. [Application of sequential MNC schemes for calculating the slau solution] *Sbornik nauchnyh statej IV nauchno-prakticheskoy mezhdunarodnoj konferencii (shkoly-seminara) molodyh uchenyh: v dviuh chastyah*. [Collection of scientific articles of the IV scientific and practical international conference (school-seminar) of young scientists: in two parts]. 2018. pp. 449–453. (In Russ.).
26. Izmajlov A.F., Solodov M.V. *Chislennyye metody optimizacii* [Numerical optimization methods] M.: Fizmatlit. 2003. 276 p. (In Russ.).

М.П. Кочетков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, О.В. Петров,
С.Б. Симонов, А.И. Терентьев

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА С ЭЛЕМЕНТАМИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ ГРУППЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Кочетков М.П., Корольков Д.Н., Петров В.Ф., Петров О.В., Симонов С.Б., Терентьев А.И. Применение кластерного анализа с элементами нечеткой логики для оценки окружающей обстановки группы робототехнических средств.

Аннотация. Возникновение чрезвычайных ситуаций, которые угрожают жизни и здоровью людей, резко повышает требования к полноте и точности представления информации о текущей ситуации. Современные робототехнические средства оснащены датчиками, работающими на различных физических принципах. Это приводит к росту входной информации, поступающей в управляющую систему. С учетом ограниченной производительности бортовой вычислительной системы, а также высокой априорной неопределенности наземной обстановки робототехнические средства не могут быть эффективно использованы без объединения получаемой информации от группы робототехнических средств и создания единой картины наземной обстановки.

Решить задачу отождествления вектор-признаков, относящихся к одному объекту, а также оценить эффективность полученных решений можно по известным формулам теории проверки статистических гипотез и теории вероятностей только при нормальном законе распределения с известными математическим ожиданием вектор-признака и корреляционной матрицей. Однако перечисленные условия на практике, как правило, не выполняются.

Предложен новый метод решения задачи отождествления вектор-признаков, не опирающийся на статистический подход, и, следовательно, не требующий знания вида закона распределения и значений его параметров. Предлагаемый метод основан на идее сочетания кластерного анализа и нечеткой логики и отличается сравнительно простой по отношению к базовым методам многомерной непараметрической статистики.

Обсуждаются математические аспекты метода нечеткой кластеризации и возможное упрощение алгоритма нечеткого отождествления при временных ограничениях. Установлено, что применение нечеткой кластеризации объектов в сложной наземной обстановке позволяет уменьшить количество ложных распознаваний объектов по сравнению с существующим статистическим подходом, ориентированным на использование нормального закона распределения.

Показано преимущество предлагаемого метода отождествления вектор-признаков объектов, даны сравнительные значения по количеству ложных распознаваний. Даны рекомендации построения правил нечеткого вывода при создании базы знаний экспертной системы.

Ключевые слова: нечеткая логика, признак, отождествление целей, робототехническое средство.

1. Введение. Наличие множества источников информации, которые работают на различных физических принципах, обладают разными техническими характеристиками и ведут мониторинг обстановки в зонах экологических и техногенных катастроф и в районах проведения контртеррористических операций, позволяет поставить задачу со-

здания обобщенной картины наземной обстановки в области, контролируемой несколькими робототехническими средствами (РТС) [1-3].

Каждый РТС функционирует в автономном режиме, самостоятельно собирает информацию в доступном окружающем пространстве, осуществляет ее первичную обработку и выделяет признаки обнаруженных объектов. При этом распознаванию могут подлежать различные подвижные объекты, например легковые и грузовые автомобили, автобусы, военная техника, а также другие средства, состав которых определяется на этапе формирования задач для группы РТС. Для увеличения дальности обнаружения таких объектов, обеспечения всепогодности, круглосуточности и высокой помехоустойчивости отдельные источники информации должны объединяться в единую информационную систему, построенную на базе группы РТС [4, 5].

Информационные потоки в группе РТС, объединенных в группу с пунктом управления (ПУ), который также взаимодействует с другими источниками информации, например беспилотным летательным аппаратом (БЛА) и, возможно, с соседним пунктом управления (ПУ), показаны на рисунке 1.

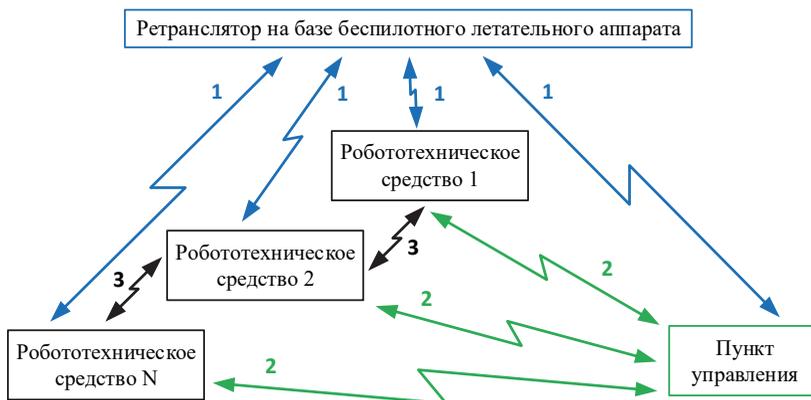


Рис. 1. Информационные потоки в группе РТС:

1) поток ПУ-БЛА-РТС; 2) поток ПУ-РТС; 3) поток РТС-РТС

Нужно учитывать тот факт, что сведения об одном и том же объекте наблюдения (ОН) – время обнаружения, координаты и параметры движения, признаки объекта, – формируются в сообщение и могут поступать на пункт дистанционного управления (ПДУ) одновременно от разных источников, зоны наблюдений которых пересекаются. В идеальном случае такие сообщения после обработки должны

совпадать, однако на практике этого не происходит из-за погрешностей определения координат ОН бортовыми средствами РТС; временных задержек при передаче данных по каналам связи «РТС-ПДУ», погрешностей экстраполяции траекторий движения на ПДУ и ряда других факторов. В этих условиях решение задачи минимизации возможного ущерба и повышения эффективности определения окружающей обстановки невозможно без объединения (отождествления) информации, поступающей на ПДУ от различных источников. Предполагается, что отождествлению сообщений предшествует их приведение к единому времени и в единую систему координат [6].

2. Решение задачи отождествления. Решение задачи отождествления сообщений включает следующие этапы, показанные на рисунке 2.

На этапе 1 производится предварительное отождествление сообщений, поступивших от разных РТС, путем сравнения содержащихся в них координат объектов. Например, координаты объектов в сообщениях от первого РТС сравниваются с соответствующими координатами объектов от других РТС.

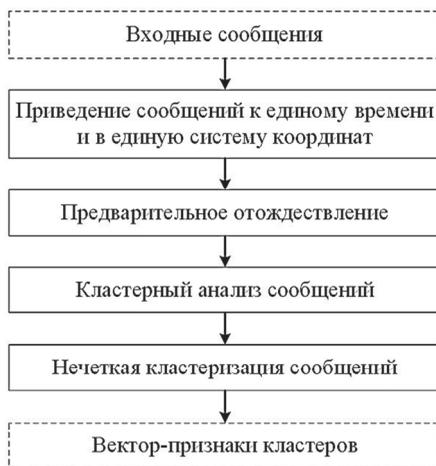


Рис. 2. Обработка сообщений при «мягком» отождествлении

Очевидно, если сообщения получены по одному и тому же ОН, то разность координат с большой вероятностью не будет превышать допустимое отклонение, определяемое ошибками обработки информации. Проведя попарное сравнение координат объектов для всех возможных вариантов, получим множество пар предварительно отождествленных сообщений.

Далее следует по степени близости координат объединять пары в группы, ассоциированные с различными объектами. Допустимые отклонения выбираются так, чтобы вероятность попадания в конкретную группу всех без исключения сообщений, относящихся к одному ОН, была близка к единице. Однако такие отклонения получаются достаточно большими, учитывая ошибки первичной обработки, а также преобразования и экстраполяции координат объектов. Поэтому некоторые группы могут включать сообщения, относящиеся к различным объектам. Следовательно, количество сформированных групп из-за ошибок отождествления может отличаться от количества реальных объектов.

На втором этапе отождествления осуществляется дополнительная обработка сообщений в группах для установления соответствий между сообщениями от разных источников. Допустим, что в некоторую группу входят три сообщения: s_1 от первого РТС, s_2 и s_3 от второго РТС. Тогда возникают две гипотезы отождествления сообщений: первая гипотеза – отождествляются s_1 с s_2 , вторая – s_1 с s_3 .

Исследуем более подробно вопрос отождествления объектов с учетом дополнительной информации об их признаках, содержащихся в принятых сообщениях, для повышения достоверности принимаемого решения. В частности, предположим, что на ПДУ от двух РТС поступают сообщения о признаках, представляемые в виде векторов-признаков $s_1 = \{x_{11}, x_{21}\}$, $s_2 = \{x_{12}, x_{22}\}$, $s_3 = \{x_{12}^*, x_{22}^*\}$, где первый индекс соответствует номеру признака, а второй – номеру РТС. Оценим степень близости указанных векторов-признаков в признаковом пространстве, для чего используем многомерный статистический анализ. Выбор предпочтительного варианта можно реализовать путем проверки статистических гипотез. Плотность вероятности евклидова расстояния между векторами-признаками s_1 с s_2 для первой гипотезы вычислим по формуле:

$$w(s_1, s_2) = \frac{1}{2\pi \left[(\sigma_{11}^2 + \sigma_{12}^2)(\sigma_{21}^2 + \sigma_{22}^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x_{11} - x_{12})^2}{\sigma_{11}^2 + \sigma_{12}^2} + \frac{(x_{21} - x_{22})^2}{\sigma_{21}^2 + \sigma_{22}^2} \right) \right],$$

где $\sigma_{k1}^2, \sigma_{k2}^2$ ($k = 1, 2$) – дисперсии k -го признака объекта от первого и второго РТС соответственно. Аналогично вычисляется $w(s_1, s_3)$ для вто-

рой гипотезы. Проверая выполнение неравенства $w(s_1, s_2) \geq w(s_1, s_3)$, можно либо принять, либо опровергнуть первую гипотезу.

Недостатком указанного подхода является допущение о том, что признаки, входящие в состав сообщений, имеют нормальное распределение, которое не всегда реализуется на практике. Это обусловлено рядом нестохастических факторов, а именно: неоднородным фоном; априорной неопределенностью появления ОН под определенным ракурсом относительно средств наблюдения; разнообразием помех как искусственного, так и естественного происхождения. Задача усложняется, если на ПДУ выявлено не два, а множество сообщений, содержащих вектор-признаки, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, поступивших от n РТС (источников информации). Рассмотрим более подробно содержание третьего и четвертого этапов.

3. Применение кластерного анализа и нечеткой логики. При помощи методов кластерного анализа данные могут быть разделены на группы «схожих» данных, которые именуют кластерами, а также разнесены в различные сегменты или группы на основе близости их свойств [7, 8].

Возможна ситуация, когда входные сообщения могут быть сгруппированы в кластеры, внутри которых будут находиться «похожие» сообщения, сильно отличающиеся от сообщений других кластеров. В этом случае кластеризация сравнительно просто выполняется четким алгоритмом s -средних. Однако указанная ситуация является исключением и, как правило, не встречается на практике.

В процессе применения методов кластерного анализа требуется сократить объем информации и область поиска рациональных вариантов для решения задачи отождествления сообщений, тем самым уменьшив требуемое время оценки окружающей обстановки.

В большем числе алгоритмов кластеризации не используются стандартные допущения, поэтому разумно применять их в случаях, когда законы распределения данных неизвестны или известны лишь частично [9-11]. Кластеризация проводится для следующих типов объектов: с качественными, количественными или смешанными признаками.

С целью устранения отмеченного недостатка и оценки качества принимаемых решений предлагается метод «мягкого» отождествления сообщений, основанный на сочетании кластерного анализа и нечеткой логики. Пусть каждое принятое сообщение s_i , кроме координат и параметров движения, содержит m признаков объекта $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}$, которые могут интерпретироваться точкой в m -мерном признаковом пространстве $E^m(x)$.

Проведение кластерного анализа включает подготовительный этап и этап кластеризации. На подготовительном этапе совокупность признаков, принадлежащих разным объектам в принятых сообщениях, упорядочивается и записывается в виде следующей матрицы «объект-признак»:

$$X_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}.$$

Вектор-признак, содержащийся в сообщении s_i , представлен i -м столбцом этой матрицы, то есть $x_i = \{x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}\}^T$, где T – знак транспонирования; x_{ki} – значение k -го признака объекта в сообщении s_i .

Полагаем, что признаки, относящиеся к одному объекту в разных сообщениях, находятся достаточно близко в пространстве $E^m(x)$ и поэтому должны отождествляться. Для оценки степени близости вектор-признаков необходимо ввести меру расстояния (сходства) между ними. Поскольку признаки измеряются в различных шкалах, то для их однообразного описания требуется провести нормализацию. В частности, элементы матрицы «объект-признак» нормализуем следующим образом:

$$x_{ki}^* = \frac{x_{ki}}{\max_{1 \leq l \leq n} x_{kl}}, k = \overline{1, m}.$$

Расстояния между вектор-признаками x_p и x_q в пространстве признаков $E^m(x)$ можно определить несколькими способами. Наиболее часто выбирают относительное евклидово расстояние:

$$d(x_p, x_q) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (x_{kp}^* - x_{kq}^*)^2},$$

для которого справедливо соотношение $0 \leq d(x_p, x_q) \leq 1$. Как альтернативный вариант может использоваться следующее соотношение:

$$d(x_p, x_q) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (x_{kp}^* - x_{kq}^*)^2.$$

Другим возможным вариантом является обобщенное относительное расстояние Хемминга:

$$d(x_p, x_q) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |x_{kp}^* - x_{kq}^*|,$$

однако его целесообразно использовать, когда алгоритм оптимального отождествления вектор-признаков не использует операцию дифференцирования.

Далее сформируем на основе матрицы «объект-признак» $X_{m \times n}$ другую матрицу «объект-объект» $D_{m \times n} = [d_{kl}]$, элементами которой являются расстояния d_{kl} между векторами-признаками x_k и x_l , где $k, l = 1, \dots, n$. Введем сокращенную запись $d(x_p, x_q) = d_{qp}$, $p = \overline{1, n}$, $q = \overline{1, n}$, после чего матрицу «объект-объект» запишем в виде:

$$D_{n \times n} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{pmatrix},$$

причем $d_{gg} = 0$ и $d_{pg} = d_{gp}$.

В том случае, если от одного источника приходят несколько сообщений, то матрица $D_{n \times n}$ модифицируется путем добавления соответствующего количества столбцов и строк, а также указанием запрета на отождествление сообщений от этого источника.

Применительно к вышерассмотренному примеру, когда сообщение s_1 поступает от первого РТС, а сообщения s_2 и s_3 от второго РТС, матрица $D_{n \times n}$ может иметь вид:

$$D_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} 0 & 0,3 & 0,4 \\ 0,3 & 0 & Z \\ 0,4 & Z & 0 \end{pmatrix},$$

где $d_{12} = d_{21} = 0,3$; $d_{13} = d_{31} = 0,4$; $d_{23} = d_{32} = Z$. Здесь символ «Z» означает запрет на отождествление сообщений s_2 и s_3 , которые поступают от одного источника.

Рассмотрим этап кластеризации сообщений. Отождествление сообщений, представленных матрицей $D_{n \times n}$, можно свести к задаче распределения вектор-признаков по группам (кластерам). Для решения этой задачи будем использовать методы кластерного анализа. Цель кластеризации – объединить полученные вектор-признаки в кластеры, каждый из которых формируется по принципу схожих признаков в пределах одного класса. Необходимо заметить, что в большем числе алгоритмов кластеризации не используются стандартные допущения, поэтому разумно применять их в случаях, когда законы распределения данных не известны или известны лишь частично [12].

Отличие между кластеризацией и классификацией состоит в следующем. Классификация относит вектор-признак к одной из нескольких предварительно установленных групп, называемых классами. Кластеризация, напротив, разделяет вектор-признаки на группы, количество которых определяется в процессе обработки данных. Редко, но это допустимо в ряде приложений кластерного анализа, когда точно известно, сколько кластеров следует выделить. Но чаще всего этот вопрос остается открытым перед процедурой кластеризации.

Существуют общие эмпирические рекомендации для выбора количества кластеров. Например, двух или трех кластеров, как правило, недостаточно, так как кластеризация будет слишком грубой, приводящей к потере полезной информации. Напротив, если кластеров больше 10, то эксперту трудно умозрительно обосновать их количество. Таким образом, недостатком традиционных методов кластеризации при решении задачи отождествления сообщений, одновременно поступающих от разных РТС, является требование задания количества кластеров. В общем случае число таких кластеров неизвестно.

Методы кластерного анализа можно условно разделить на иерархические и итерационные. Применение иерархических методов предполагает четкое указание количества кластеров. Среди итеративных методов существуют методы, которые не требуют первоначально задания числа кластеров, однако нужно анализировать алгоритмы, меняя значение двух переменных – порог близости для объединения вектор-признаков в кластеры или число образуемых кластеров. После чего появляется возможность выбрать наилучшее разбиение по выбранному критерию качества.

Сравнительный анализ различных методов кластер-анализа свидетельствует, что для группирования сообщений, поступающих от не-

скольких РТС, преимуществом обладает модифицированный метод горной кластеризации [13]. Выбор указанного метода обусловлен отсутствием необходимости иметь информацию о количестве классов. Для этого алгоритма требуется, чтобы число потенциальных центров кластеров было конечным. В рассматриваемом случае это условие выполняется, так как число центров кластеров не может превышать общего количества сообщений, поступивших на ПДУ от группы РТС. Следовательно, данный алгоритм отличается тем, что количество кластеров определяется самим алгоритмом, центры кластеров здесь выбираются из множества экспериментальных данных.

Рассмотрим кратко суть выбранного метода [14]. *На первом шаге* определяются точки в пространстве признаков (центры кластеров). Если же определить их нельзя, то потенциальными центрами могут быть точки, определяемые всеми вектор-признаками входных сообщений s_i , $i = \overline{1, n}$.

Второй шаг предназначен для вычисления потенциала всех точек. При этом преследуется цель оценить целесообразность создания новых кластеров с центрами, обладающими высоким значением потенциала. Считается, что потенциал точки зависит от количества соседних точек и их удаления. По мере удаления соседних точек потенциал центральной точки ослабляется. Вычисление потенциала в точке z_i производится по формуле:

$$P(z_i) = \sum_{k=1}^n \exp[-ad(z_i, x_k)],$$

где $d(z_i, x_k)$ – расстояние между точками z_i и x_k в пространстве признаков; a – положительная константа, которая равна единице, деленной на среднее расстояние между точками.

Название метода обусловлено ассоциациями с горным рельефом местности, возникающим при рассмотрении графика потенциала для точек, кластеризация которых производится по двум признакам.

На третьем шаге из множества точек с высоким потенциалом путем нескольких итераций определяются центры кластеров. Процедура последовательного уточнения потенциалов и селекции центров кластеров прекращается, когда уровень потенциалов оставшихся точек становится ниже предварительно заданного порога. В нашем случае он выбирался на уровне 0.55 от потенциала первой максимальной вершины.

Стоит отметить, что 0.55 – это рекомендуемое значение порога для конкретных условий рассматриваемой задачи. Здесь есть некото-

рая аналогия с выбором порога при распознавании зашумленного сигнала, когда приходится искать компромисс между ошибками первого и второго родов. В нашем случае малый заданный уровень – много ложных кластеров, большой порог – потеря реальных кластеров. Подробное описание горного алгоритма приведено в работах [15-17].

Таким образом, результатом проведенного кластерного анализа является выделение вектор-признаков, являющихся центрами кластеров, после чего появляется возможность распределения остальных вектор-признаков по образованным кластерам (рис. 3).

Будем полагать, что вектор-признак x_i считается принадлежащим кластеру V_k , который образован вектор-признаком x_k , если расстояние $d(x_i, x_k)$ меньше, чем расстояние от x_i до других кластеров. В этом случае все входные вектор-признаки будут принадлежать каким-либо кластерам.

Если же допустить, что x_i считается принадлежащим кластеру V_k , когда расстояние до него $d(x_i, x_k)$ меньше, чем некоторое пороговое значение, то могут появиться вектор-признаки, не принадлежащие ни одному из найденных кластеров.

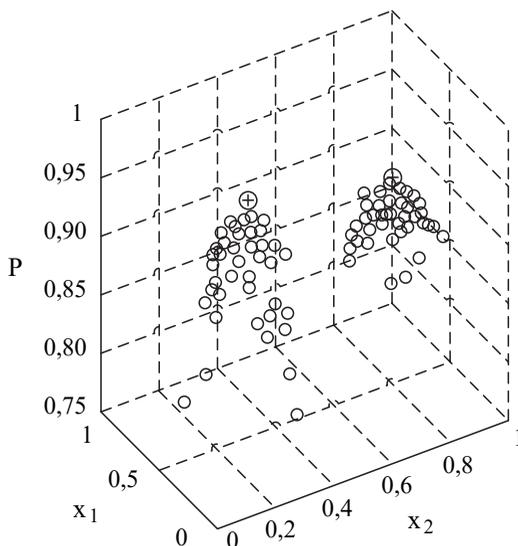


Рис. 3. Результат кластерного анализа – выделение центров кластеров

К достоинствам алгоритма горной кластеризации можно отнести его простоту, которая, однако, компенсируется недостатками –

невысокой наглядностью представления и низкой точностью [18, 19]. Кластеризация по горному алгоритму является четкой, при которой вектор-признак попадает только в один кластер. Такое ограничение не всегда приемлемо в системах специального назначения. Для частично видимых объектов, чьи признаки расположены на границе кластеров, более «естественной» будет именно нечеткая кластеризация.

4. Использование методов нечеткой логики. Сформулируем задачу нечеткой кластеризации. Известно множество вектор-признаков $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Необходимо произвести разбиение X на нечеткие кластеры, которыми являются нечеткие подмножества $A_i, \left(i = \overline{1, c} \right)$.

Введем обозначение $\mu_{ik} = \mu_{A_i}(x_k)$ – степень принадлежности вектор-признака $x_k \in X$ к подмножеству A_i . Матрицу степеней принадлежности представим в виде $M = [\mu_{ik}]$, при этом будем полагать:

$$\mu_{ik} \in [0, 1], \quad i = \overline{1, c}, \quad k = \overline{1, n},$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \quad k = \overline{1, n}.$$

Последнее условие в нечеткой кластеризации обусловлено тем обстоятельством, что вектор-признак может относиться к разным кластерам с определенными значениями функции принадлежности. В силу чего возникает необходимость нормализации суммы степеней принадлежности.

В настоящее время широкое распространение в различных приложениях получил FCM-алгоритм нечеткой кластеризации [20-22]. Применение этого алгоритма предполагает определение матрицы степеней принадлежности M и центров кластеров $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$, которые удовлетворяют определенному критерию. Наиболее часто требуется минимизировать критерий:

$$\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m d^2(x_k, v_i) \rightarrow \min,$$

где $d(x_k, v_i)$ – евклидово расстояние между двумя векторами-признаками x_k и v_i или соответствующими точками в многомерном

пространстве признаков; m – весовой коэффициент фаззификации. Коэффициент m усиливает влияние вектор-признаков с высокими значениями степеней принадлежности и ослабляет иные. FCM-алгоритм является итерационным алгоритмом. При его выполнении требуется многократно повторить определенную последовательность действий с изменяющимся количеством кластеров для различных исходных нечетких разбиений множества вектор-признаков на нечеткие подмножества. FCM-алгоритм подразумевает выполнение ряда шагов [23]:

Шаг 1. Активация исходного нечеткого разделения вектор-признаков.

Шаг 2. Определение центров всех кластеров. Для вычисления центра i -го кластера используется формула:

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n \left((\mu_{ik})^m x_k \right)}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m},$$

где μ_{ik} , по сути, является весовым коэффициентом, который определяет вес вектор-признаков x_k , $k = \overline{1, n}$, зависящий от величины параметра m , при вычислении значений v_i , $i = \overline{1, c}$.

Шаг 3. Вычисление новых функций принадлежности:

$$\mu_{ik} = \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1},$$

где $d_{ik} = d(x_k, v_i)$; $d_{jk} = d(x_k, v_j)$.

Следует учитывать тот факт, что с ростом коэффициента m , конечная матрица, сформированная FCM-алгоритмом, «размывается», а при $m \rightarrow \infty$ все вектор-признаки уже принадлежат всем кластерам с одинаковой степенью принадлежности.

Шаги 2 и 3 будут циклически повторяться. Завершение цикла возможно при выполнении одного из двух условий: либо исполнится количество циклов, определенное заранее, либо будет достигнута требуемая точность вычислений.

Для сокращения вычислительных затрат предлагается число кластеров и значения их центров, полученные алгоритмом горной кластеризации, использовать как приближительные начальные значения в FCM-алгоритме.

Распредив входные вектор-признаки по группам FCM-алгоритмом, получим несколько кластеров. Кластеры описываются своими центрами, то есть вектор-признаками того же пространства признаков, которому принадлежит исходное множество вектор-признаков. После чего можно воспользоваться построенной базой знаний, позволяющей путем логического вывода оценить степень принадлежности вектор-признаков центров кластеров к каждому классу распознаваемых объектов.

5. Построение и использование нечеткой базы знаний. Проблема отождествления вектор-признаков в условиях высокой априорной неопределенности окружающей обстановки не может быть решена на основе аппарата математической статистики. Однако ее решение возможно в рамках теории нечеткого логического вывода, которая оперирует качественными понятиями, учитывает характер мышления опытного специалиста и ход его рассуждений при выработке решений.

Большой сложностью при создании базы знаний экспертной системы на нечеткой логике является необходимость явно сформулировать правила принятия решений в форме продукций.

Важным понятием нечеткой логики является лингвистическая переменная (ЛП), которая в общем случае определяется несколькими термами. Например, признак «длина контура» ОН может быть представлен термами: «маленькая», «средняя», «большая». При построении нечеткой базы знаний требуется по обучающей выборке определить нечеткие множества, соответствующие различным термам ЛП [24-26]. Формализуем поставленную задачу.

Пусть определены наименования термов для всех признаков, кроме того указаны области их определения. Имеется обучающая выборка (ОВ) «множество значений признаков – номер класса». Обозначим вектор обучающей выборки: $z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$. Необходимо определить нечеткие множества, представляющие термы каждого признака $z_j \cdot (1 \leq j \leq m)$ для распознавания ОН h классов q_1, q_2, \dots, q_h .

Разобьем множество векторов ОВ на M групп по количеству классов. В каждую группу включим векторы, относящиеся к одному классу. Таким образом, будут образованы группы: L_1, L_2, \dots, L_M .

Допустим, что признак z_1 включает V термов $T_1 = \{T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1V}\}$, определенные на множестве $U = \{u\}$, и необходимо построить нечеткое множество:

$$\tilde{T}_1 = \left(\frac{\mu_{T_{11}}(u)}{u}, \frac{\mu_{T_{12}}(u)}{u}, \dots, \frac{\mu_{T_{1V}}(u)}{u} \right),$$

где $\mu_{T_{1j}}(u)$, $j = \overline{1, V}$ – функция принадлежности (ФП) значения u признака z_1 к терму T_{1j} , $\left(j = \overline{1, V} \right)$ при распознавании объектов класса q_1 .

Рассмотрим последовательность действий для вычисления функций принадлежности термов лингвистической переменной.

1) Определим диапазон Δz изменения признака z_1 при распознавании ОН классов q_1, q_2, \dots, q_h .

2) Разделим Δz на непересекающиеся интервалы. Учитывая фактор неравномерного распределения значений признака z_1 , получим N интервалов.

3) Строим таблицу, имеющую N столбцов и V строк для термов признака z_1 .

4) Эксперт анализирует значение признака z_1 из примера и определяет, к какому из V термов необходимо его отнести.

5) Выбирается строка, соответствующая этому терму, и добавляется единица в ячейку, принадлежащую одному из N столбцов. Номер столбца зависит от номера интервала, в который попало значение этого признака. Для определенности полагаем, что номер столбца равен k .

6) Нормируем числа в каждом столбце таблицы относительно суммы чисел, стоящих в этом столбце. В результате получим оценку ФП элементов нечеткого множества \tilde{T}_1 . Например, степень принадлежности к терму T_{1j} значения u , попавшего в k -ый интервал, вычисляется следующим образом:

$$\tilde{\mu}_{T_{1j}}(u) = \frac{n_{jk}}{n_k}, \quad j = \overline{1, V},$$

где n_{jk} – количество примеров ОВ для распознавания класса q_1 , подсчитанное в ячейке на пересечении j -ой строки и столбца с номером k ; n_k – сумма чисел в столбце таблицы с номером k .

Указанная последовательность действий повторяется для построения ФП термов признака z_2 по множеству L_2 , ФП термов признака z_3 по L_3 и так далее.

После того как термы различных признаков для распознавания объектов будут представлены в виде нечетких множеств, переходим к проектированию базы знаний [27, 28]. Введем обозначения: β – лингвистическая переменная, α – ее значение. Для классификации применим логические высказывания вида: « β ЕСТЬ α », полагая, что α определено на базовом терм-множестве указанной лингвистической переменной.

Используем нечеткий логический вывод для упрощения модели композиционного правила вывода Заде. Упрощение основывается на предположении, что установленные входные лингвистические переменные имеют известные числовые значения, а также наличие только одной выходной лингвистической переменной, а именно: «класс объекта».

Классификация ОН h классов q_1, q_2, \dots, q_h по m признакам z_1, z_2, \dots, z_m соответствует отображению вида:

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_m) \rightarrow q \in \{q_1, q_2, \dots, q_h\}$$

и может производиться на основании следующих правил логического вывода:

ЕСЛИ (z_1 ЕСТЬ T_{11}) И (z_2 ЕСТЬ T_{21}) И ...И (z_m ЕСТЬ T_{m1})

ТО (q ЕСТЬ q_1)

ЕСЛИ (z_1 ЕСТЬ T_{12}) И (z_2 ЕСТЬ T_{22}) И ...И (z_m ЕСТЬ T_{m2})

ТО (q ЕСТЬ q_2)

...

ЕСЛИ (z_1 ЕСТЬ T_{1V}) И (z_2 ЕСТЬ T_{2V}) И ...И (z_m ЕСТЬ T_{mV})

ТО (q ЕСТЬ q_V),

где T_{ij} – лингвистический терм (нечеткая переменная, представленная нечетким множеством) для оценки признака z_i при распознавании объектов класса q_j .

Условие ($z_i \in T_{ij}$) реализуется функцией фаззификации, которая представляется обобщенной гауссовой функцией отдельно для каждой переменной z_i и соответствующего термина T_{ij} , где $j = \overline{1, V}$.

Пусть требуется классифицировать объект по совокупности m конкретных значений признаков u_1, u_2, \dots, u_m . Тогда для каждого $u_i, i = \overline{1, m}$ следует определить значение функции принадлежности к нечетким множествам, представленными терминами $T_{ik}, \left(k = \overline{1, h} \right)$. Степень истинности нечеткого высказывания « u_i ЕСТЬ T_{ik} » определяется значением функции принадлежности $\mu_{T_{ik}}(u_i)$ для конкретного значения u_i , как показано на рисунке 4.

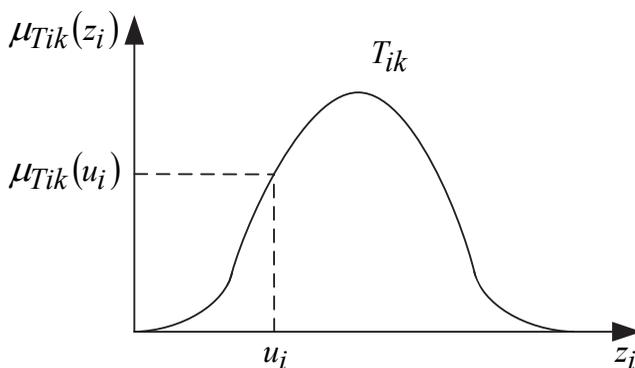


Рис. 4. Пример введения нечеткости с использованием четкого значения u_i признака

После определения степени принадлежности конкретных значений признаков к терминам, указанным в j -ом правиле, вводим для краткости обозначение $t_{ij} = \mu_{T_{ij}}(u_i), i = \overline{1, m}$. Логическую связку «И» будем интерпретировать как Т-норму нечетких множеств или операцию их пересечения. Тогда степень истинности предпосылок j -го правила можно вычислить следующим образом:

$$t_j = t_{1j} \cap t_{2j} \cap \dots \cap t_{mj}.$$

Полученное значение t_j применяется для оценки $u_j(q)$ – истинности заключения этого правила или того, что входной вектор (z_1, z_2, \dots, z_m) соответствует классу q_j . Считается, что $u_j(q) = t_j$. Аналогичным образом определяются степени истинности для всех других правил, представленных в базе знаний. После чего предпочтение отдается тому классу, которому соответствует правило с максимальным значением истинности заключения. Номер искомого класса определяется по формуле:

$$k = \arg \max_{1 \leq p \leq h} [t_p].$$

В условиях априорной неопределенности для построения правил нечеткого логического вывода может непосредственно использоваться обучающая выборка прецедентов [29-31]. Рассмотрим подход к решению задачи распознавания ОН, заданного вектором информативных признаков $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$, к одному из h классов $\{q_1, q_2, \dots, q_h\}$ на основании информации, содержащейся в обучающей выборке.

Для классификации требуется создать нечеткую базу знаний, содержащую h правил, каждое из которых включает информацию о прецедентах в обучающей выборке по соответствующему классу объектов. Пусть классификация объектов класса q_j производится по экспертной информации из k_j примеров. Тогда правило распознавания будет состоять из системы нечетких логических высказываний, представленных k_j следующими строками логических связей «И»:

ЕСЛИ $(z_1$ ЕСТЬ $T_{1j,1}$) И $(z_2$ ЕСТЬ $T_{2j,1}$) И ... И $(z_{mj,1}$ ЕСТЬ $T_{nj,1}$)
с весом $w_{j,1}$ ИЛИ

ЕСЛИ $(z_1$ ЕСТЬ $T_{1j,2}$) И $(z_2$ ЕСТЬ $T_{2j,2}$) И ... И $(z_{mj,2}$ ЕСТЬ $T_{nj,2}$)
с весом $w_{j,2}$ ИЛИ

...

ЕСЛИ $(z_1$ ЕСТЬ T_{1j,k_j}) И $(z_2$ ЕСТЬ T_{2j,k_j}) И ... И $(z_{mj,k_j}$ ЕСТЬ $T_{nj,j}$)
с весом w_{j,k_j}

ТО $q = q_j, j = 1, 2, \dots, h,$

где $T_{ij,p}$ – лингвистический терм, которым оценивает признак z_i при распознавании объектов класса q_j в p -ой строке правила; $p = \overline{1, k_j}$; k_j – количество правил (прецедентов), использованных для описания класса q_j , $w_{j,p}$ – весовой коэффициент, ($0 < w_{j,p} \leq 1$) означающий экспертную оценку достоверности или уверенность в степени истинности логического условия в p -ой строке правила. Другими словами, коэффициент $w_{j,p}$ определяет значимость условия, по умолчанию $w_{j,p} = 1$.

Выбирая в качестве T -нормы пересечение по Заде и учитывая весовой коэффициент, получим взвешенную степень истинности условия о принадлежности входного вектора признаков классу q_j по условиям p -ой строки:

$$\mu_{j,p}(Z^*) = w_{j,p} \times \min_{i=1,m} [\mu_{jp}(Z_i^*)].$$

Взвешенная степень истинности принадлежности вектора $Z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*)$ классу q_j по условиям всех k_i строк:

$$\mu_{qi}(Z^*) = \max_{p=\overline{1,k_i}} \left\{ w_{jp} \times \min_{i=1,n} [\mu_{jp}(Z_i^*)] \right\},$$

где $\mu_{jp}(Z_i^*)$ – функция принадлежности Z_i^* нечеткому терму $T_{i,jp}$.

В качестве решения задачи распознавания выбираем класс объектов с максимальной взвешенной степенью принадлежности:

$$d = \arg \max_{q_j \in \{q_1, q_2, \dots, q_h\}} [\mu_{qj}(Z^*)].$$

Представленный подход предполагает использование набора четких значений информативных признаков и может применяться в системах автоматического распознавания при наличии соответствующих датчиков и средств обработки первичной информации.

Рассмотренный подход к созданию единой картины наземной обстановки в зоне действия группы РТС и последующей клас-

сификации ОН позволяет путем автоматического сбора и объединения информации [32], поступающей от различных источников, повысить дальность обнаружения, а также достоверность отождествления и, следовательно, распознавания ОН в недетерминированных условиях.

6. Моделирование предложенных методов. Для оценки эффективности нового метода решения задачи отождествления проводился компьютерный эксперимент с двумя системами идентификации. В ходе эксперимента предлагаемый метод сравнивался с классическим методом статистической теории распознавания образов на основе гипотезы нормального закона распределения. Эффективность оценивалась количеством ложных распознаваний. При моделировании использовались различные законы распределения поступающих вектор-признаков, причем предполагалось, что вид закона распределения системе идентификации неизвестен.

Численные оценки эффективности зависят не только от метода решения задачи идентификации, а также от многих других факторов (количества РТС в группе, взаимного расположения их на местности, секторов обзора систем технического зрения, дальности обнаружения объектов, их общего количества и т.д.). Поэтому было принято решение проводить сравнение методов при одних и тех же условиях функционирования системы идентификации.

Как и ожидалось, метод статистической теории распознавания оказался эффективнее предлагаемого, когда вектор-признаки имели нормальное распределение. Наиболее близким по виду функциональной зависимости к нормальному закону среди других рассматриваемых законов является релейский закон. Экспериментальным путем получено, что эффективность предлагаемого метода при релейском законе относительно классического метода приблизительно на 18% выше. При других видах формульных зависимостей законов распределения эффективность обоих исследуемых методов снижалась, однако предлагаемый метод имел эффективность на 18% выше классического подхода.

Предложенные методы промоделированы в среде Matlab, имеющей два способа для работы с кластеризацией: при помощи командной строки или же графического интерфейса [33, 34].

Центры кластеров определяются при помощи функции «fcm». Для работы в функцию необходимо передать аргументы:

1) data – данные, которые должны быть кластеризованы; точка в многомерном пространстве признаков задается одной строкой;

2) NC — количество кластеров;

3) options — дополнительные опции кластеризации.

Результаты работы функции отражаются в следующих переменных:

1) centers – матрица центров кластеров, каждая строка которой содержит координаты центра отдельного кластера;

2) U – результирующая матрица функциональных признаков;

3) obj_Func – значение целевой функции на каждой итерации.

В работе использовался следующий программный код для нечеткой кластеризации:

```
// загрузка данных
load fd.dat;
// определение центра кластеризации
[centers, U, objFunc] = fcm(fd, 2);
// определение максимальной степени принадлежности
max_U = max(U);
// распределение строк матрицы данных между кластерами
ind1 = find(U(1, :) == max_U);
ind2 = find(U(2, :) = max_U);
// построение данных
plot(fcmdata(ind1, 1), fcmdata(ind1, 2), 'ko', 'markersize', 5, 'LineWidth', 1);
hold on
// построение данных
plot(fcmdata(ind2, 1), fcmdata(ind2, 2), 'kx', 'markersize', 5, 'LineWidth', 1);
// построение кластерных центров
plot(center(1, 1), center(1, 2), 'ko', 'markersize', 15, 'LineWidth', 2)
plot(center(2, 1), center(2, 2), 'kx', 'markersize', 15, 'LineWidth', 2)
```

Можно отметить, что для расширения возможностей анализа получаемых результатов функцию кластеризации можно вызывать с дополнительными параметрами. Эти параметры управляют процессом кластеризации:

– opt_1 – показатель степени для матрицы U (по умолчанию – 2.0);

– opt_2 – максимальное количество итераций (по умолчанию – 100);

– opt_3 – предельное изменение значений целевой функции (по умолчанию – $1e^{-5}$);

– opt_4 – отображение информации на каждом шаге (по умолчанию – 1).

Для визуализации получаемых результатов можно использовать встроенный в Matlab инструмент «findcluster». Графический

интерфейс пользователя позволяет загрузить исходные данные для кластеризации в следующем формате: одна строка – одна точка в многомерном пространстве характеристик. Количество строк равно количеству элементов данных. Оператор также определяет тип алгоритма кластеризации.

Для запуска алгоритма кластеризации необходимо указать параметры:

- количество кластеров (Cluster Num);
- максимальное количество итераций (Max Iteration);
- минимальное значение целевой функции (Min. Improvement);
- показатель степени при матрице ФП (Exponent).

Для координат найденных центров матрицы доступна функция сохранения в виде матрицы, что позволяет пользоваться ими в дальнейшем. Строка матрицы в файле – это набор координат кластера. Количество строк соответствует количеству кластеров.

7. Заключение. Исследован вопрос отождествления наземных объектов, с повышением достоверности принимаемого решения, с учетом дополнительной информации об их признаках, содержащихся в принятых сообщениях. Показано, что недостатком статистического подхода является допущение о том, что признаки, входящие в состав сообщений, имеют нормальное распределение, которое не всегда реализуется на практике.

Предложен новый метод «мягкого» отождествления вектор-признаков, поступающих от группы РТС на пункт управления, который основан на сочетании кластерного анализа и нечеткой логики и который может эффективно использоваться в условиях высокой априорной неопределенности относительно законов распределения входных данных для оценки окружающей обстановки в зоне действия группы РТС.

Рассмотрено создание базы знаний экспертной системы на основе нечёткой логики в форме продукции. Для построения правил нечеткого вывода рекомендуется воспользоваться обучающей выборкой прецедентов, заданных векторами информативных признаков.

Проведенное в среде Matlab моделирование информационных процессов, протекающих в системе «группа РТС-ПДУ» показало, что предлагаемый метод отождествления вектор-признаков объектов на базе нечеткой логики и кластерного анализа уменьшает количество ложных распознаваний на 18% по сравнению с существующим статистическим подходом, основанным на предположении, что вектор-признак подчиняется нормальному закону распределения.

Литература

1. Zhou J., Bai X., Caelli T. Computer Vision and Pattern Recognition in Environmental Informatics // IGI Global. 2016. 437 p.
2. Kim J. et al. Robot Intelligence Technology and Applications // Springer. 2018. 579 p.
3. Shih F.Y. Image processing and pattern recognition Fundamentals and Techniques // Wiley & Sons. 2010. 552 p.
4. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П., Хрипунов С.С. Проблемы группового применения робототехнических комплексов военного назначения и пути их решения // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). 2019. С. 136–138.
5. Абросимов Э.А., Куличенко А.Д., Можжев А.Н., Смирнова Е.Ю. Перспективные технологии организации группового взаимодействия и группового управления для гибридных групп мобильных роботов // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). 2019. С. 116–118.
6. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах // ФГБОУ ВПО «ГТТУ». 2016. 84 с.
7. Härdle W.K., Simar L. Applied Multivariate Statistical Analysis. 5th edition // New York: Springer. 2019. 550 p.
8. Morlini I., Minerva T., Vichi M. Advances in Statistical Models for Data Analysis // Springer. 2015. 268 p.
9. Wierchoń S.T., Kłopotek M.A. Modern Algorithms of Cluster Analysis // Springer. 2018. 433 p.
10. Bouveyron C. et al. Model-Based Clustering and Classification for Data Science: With Applications in R // Cambridge University Press. 2019. 447 p.
11. Seetha H., Murty M.N., Tripathy B.K. Modern Technologies for Big Data Classification and Clustering // IGI Global. 2018. 382 p.
12. Егоров А.И., Курпьянова Н.И. Особенности методов кластеризации данных // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №11. С. 174–177.
13. Yager R., Filev D. Essentials of Fuzzy Modeling and Control // John Wiley & Sons. 1984. 387 p.
14. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: http://matlab.exponenta.ru/fuzzy_logic/book1/index.php (дата обращения: 20.08.2019).
15. Пташко Е.А., Ухоботов В.И. Автоматическая генерация нечетких правил для управления мобильным роботом с гусеничным шасси на основе числовых данных // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6. № 3. С. 60–72.
16. Прудковский Н.С., Беспечная Д.Э. Кластеризация данных лувенским методом и методом к-средних // Молодой исследователь: вызовы и перспективы сб. ст. по материалам LXXV междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 159–166.
17. Аль-Раммахи А.А.Х.Х., Сари Ф.А.А., Минин Ю.В. Модификация метода нечеткой кластеризации с-средних с использованием метода роя частиц для обработки больших данных // Материалы 1-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современная наука: теория, методология, практика». 2019. С. 231–233.
18. Янчуковский В.Н. Использование параллельных вычислений в кластерном анализе для формирования комплексных деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 6(65). С. 25–30.
19. Подколзина Л.А. Системный анализ данных с применением иерархического алгоритма кластеризации в совокупности с методами аппарата нечеткой логи-

- ки // Системный анализ, управление и обработка информации материалы VI международного семинара. 2015. С. 110–113.
20. *Ярушикина Н.Г.* Нечеткие нейронные сети в когнитивном моделировании и традиционных задачах искусственного интеллекта // М.: МИФИ. 2005. 214 с.
 21. *Полковникова Н.А., Курейчик В.М.* Нейросетевые технологии, нечеткая кластеризация и генетические алгоритмы в экспертной системе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 7(156). С. 7–15.
 22. *Петров В.Ф. и др.* Сетевая структура обработки информации в распределенных системах управления наземными робототехническими комплексами // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23, № 4. С. 389–398.
 23. *Демидова Л.А., Кираковский В.В., Пылькин А.Н.* Принятие решений в условиях неопределенности // Горячая линия – Телеком. 2015. 283 с.
 24. *Mendel J.M.* Uncertain Rule-based Fuzzy Systems // Springer. 2017. 696 p.
 25. *Fidanova S.* Recent Advances in Computational Optimization // Springer. 2019. 239 p.
 26. *Hooda D.S., Raich V.* Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control: An Introduction // Alpha Science International Ltd. 2017. 409 p.
 27. *Melin P., Castillo O., Kacprzyk J., Reformat M., Melek W.* Fuzzy Logic in Intelligent System Design // Springer. 2018. 415 p.
 28. *Nguyen H.T., Walker C.L., Walker E.A.* A First Course in Fuzzy Logic. 4th ed. // CRC Press. 2018. 458 p.
 29. *Tanveer M. et al.* Machine Intelligence and Signal Analysis // Springer. 2018. 757 p.
 30. *Woyczyński W.A.* A First Course in Statistics for Signal Analysis. 3rd ed. // Birkhäuser. 2019. 337 p.
 31. *Ley C., Verdebout T.* Applied Directional Statistics Modern Methods and Case Studies // CRC Press. 2019. 317 p.
 32. *Серегин М.Ю.* Интеллектуальные информационные системы : учебное пособие // ФГБОУ ВПО «ГГТУ». 2012. 205 с.
 33. *Kochetkov M., Terentev A., Chernovolenko A.* A hybrid model of the 3D-objects recognition system // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2018. pp. 1521–1524.
 34. *Kochetkov M., Terentev A., Chernovolenko A.* Fuzzy Model of Recognition of Environmental Objects for a Mobile Robotic Complex // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2019.

Кочетков Михаил Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент, Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (НИУ МИЭТ). Область научных интересов: нечеткая логика, кластерный анализ, методы идентификации. Число научных публикаций — 110. kmp@miec.ru; пл. Шокина, 1, 124498, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)720-8751.

Корольков Дмитрий Николаевич — ведущий инженер-электроник, Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (НИУ МИЭТ). Область научных интересов: электронные вычислительные устройства. Число научных публикаций — 29. jimmy@olvs.miec.ru; пл. Шокина, 1, 124498, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)720-8751.

Петров Владимир Федорович — канд. техн. наук, заместитель директора, Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследова-

тельский университет «МИЭТ» (НИУ МИЭТ). Область научных интересов: вооружение и военная техника, системы управления, робототехнические комплексы. Число научных публикаций — 83. pvf@olvs.miee.ru; пл. Шокина, 1, 124498, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)720-8751.

Петров Олег Владимирович — канд. техн. наук, начальник отдела, Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (НИУ МИЭТ). Область научных интересов: схемотехника устройств вычислительной техники и систем управления; моделирование; измерительные устройства. Число научных публикаций — 21. rovmiel@yandex.ru; пл. Шокина, 1, 124498, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)720-8751.

Терентьев Алексей Игоревич — канд. техн. наук, доцент, Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (НИУ МИЭТ). Область научных интересов: моделирование; информационно-управляющие системы, нечеткая логика, элементы искусственного интеллекта. Число научных публикаций — 43. terentev@olvs.miee.ru; пл. Шокина, 1, 124498, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)720-8751.

Симонов Сергей Борисович — канд. техн. наук, начальник отдела, Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (НИУ МИЭТ). Область научных интересов: программное обеспечение систем управления, робототехнические системы. Число научных публикаций — 12. sb.simonov@gmail.com; пл. Шокина, 1, 124498, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)720-8751.

M. KOCHETKOV, D. KOROLKOV, V. PETROV, O. PETROV, S. SIMONOV,
A. TERENCEV

**APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS WITH FUZZY
LOGIC ELEMENTS FOR GROUND ENVIRONMENT
ASSESSMENT OF ROBOTIC GROUP**

Kochetkov M., Korolkov D., Petrov V., Petrov O., Simonov S., Terentev A. **Application of Cluster Analysis with Fuzzy Logic Elements for Ground Environment Assessment of Robotic Group.**

Abstract. Emergency situations, that cause risks for human life and health, dictate elevated requirements to completeness and accuracy of the presentation of information about current ground environment. Modern robotic systems include sensors, that operate on different physical principles. This causes incrementation of information entering control system. Computing resources and technical capabilities of robotic systems are limited in range and detection probabilities of appearing objects. In case of insufficient performance of the on-board computer system and high uncertainties of ground environment, robotic systems are not able to perform without combining information from robotic group and producing a single view of ground environment. Complex information from a group of robotic systems occurs in real time and a non-deterministic environment.

To solve the problem of identifying attribute vectors related to a single object, as well as to evaluate the effectiveness of obtained solutions, is possible using known formulas of the theory of statistical hypothesis testing and probability theory only under the normal distribution law with the known mathematical expectation of an attribute vector and a correlation matrix. However, these conditions are usually not met in practice. Problems also arise when methods of nonparametric statistics are used with an unknown law of probability distribution.

The new method of identifying attribute vectors is proposed, that does not rely on a statistical approach and, therefore, does not require knowledge of the type of distribution law and the values of its parameters. Proposed method is based on the idea of combining cluster analysis and fuzzy logic, and is relatively simple to the basic methods of multidimensional nonparametric statistics.

The results of modeling information processes are presented. The advantages of proposed method are shown. The comparative values for the number of false recognitions are given. The recommendations are given for constructing fuzzy inference rules when creating an expert system knowledge base.

Key words: Fuzzy Logic, Attribute, Target Authentication, Robotic System.

Kochetkov Mihail — Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: fuzzy logic, cluster analysis, identification methods. The number of publications — 110. kmp@miec.ru; 1, Shokin sq., 124498, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)720-8751.

Korolkov Dmitry — Leading Electronics Engineer, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: electronic computing devices. The number of publications — 29. jimmy@olvs.miec.ru; 1, Shokin sq., 124498, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)720-8751.

Petrov Vladimir — Ph.D., Deputy Director, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: military technical equipment, control system, robotic systems. The number of publications — 83. pvf@olvs.micee.ru; 1, Shokin sq., 124498, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)720-8751.

Petrov Oleg — Ph.D., Head of Department, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: circuit design of computer equipment and control systems; modeling; measuring devices. The number of publications — 21. povmiet@yandex.ru; 1, Shokin sq., 124498, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)720-8751.

Terentev Alexey — Ph.D., Associate Professor, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: modeling; information and control systems, fuzzy logic, elements of artificial intelligence. The number of publications — 43. terentev@olvs.micee.ru; 1, Shokin sq., 124498, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)720-8751.

Simonov Sergey — Ph.D., Head of Department, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (MIET). Research interests: control system's software; robotic systems. The number of publications — 12. sb.simonov@gmail.com; 1, Shokin sq., 124498, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)720-8751.

References

1. Zhou J., Bai X., Caelli T. Computer Vision and Pattern Recognition in Environmental Informatics. IGI Global. 2016. 437 p.
2. Kim J. et al. Robot Intelligence Technology and Applications. Springer. 2018. 579 p.
3. Shih F.Y. Image processing and pattern recognition Fundamentals and Techniques. Wiley & Sons. 2010. 552 p.
4. Ermolov I.L., Xripunov S.P., Xripunov S.S. [Problems of group application of military-purpose robotic systems and ways to solve them]. *Materialy` XII mul'tikonferencii po problemam upravleniya (MKPU-2019)* [XII Multiconference on Management Problems (MKPU-2019)]. 2019. pp. 136–138. (In Russ.).
5. Abrosimov E.A., Kulichenko A.D., Mozhaev A.N., Smirnova E.Yu. [Advanced technologies for organizing group interaction and group control for hybrid groups of mobile robots]. *Materialy` XII mul'tikonferencii po problemam upravleniya (MKPU-2019)* [XII Multiconference on Management Problems (MKPU-2019)]. 2019. pp. 116–118. (In Russ.).
6. Panasyuk Yu. N., Pudovkin A.P. *Obrabotka radiolokacionnoj informacii v radio-texnicheskix sistemax* [Processing of radar information in radio engineering systems]. FGBOU VPO "TGTU". 2016. 84 p. (In Russ.).
7. Härdle W.K., Simar L. Applied Multivariate Statistical Analysis. 5th edition. New York: Springer. 2019. 550 p.
8. Morlini L., Minerva T., Vichi M. Advances in Statistical Models for Data Analysis. Springer. 2015. 268 p.
9. Wierzchoń S.T., Kłopotek M.A. Modern Algorithms of Cluster Analysis. Springer. 2018. 433 p.
10. Bouveyron C. et al. Model-Based Clustering and Classification for Data Science: With Applications in R. Cambridge University Press. 2019. 447 p.
11. Seetha H., Murty M.N., Tripathy B.K. Modern Technologies for Big Data Classification and Clustering. IGI Global. 2018. 382 p.

12. Egorov A.I., Kupriyanova N.I. [Features of data clustering methods]. *Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki – Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences*. 2011. vol. 11. pp. 174–177.
13. Yager R., Filev D. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. John Wiley & Sons. 1984. 387 p.
14. Shtovba S.D. *Vvedenie v teoriyu nechetkix mnozhestv i nechetkuyu logiku*. [An introduction to fuzzy set theory and fuzzy logic.]. Available at: http://matlab.exponenta.ru/fuzzy_logic/book1/index.php (accessed: 20.08.2019). (In Russ.)
15. Ptashko E.A. Uxobotov V.I. [Automatic generation of fuzzy rules for the control of a mobile crawler robot based on numerical data]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vy chislitel'naya matematika i informatika – Bulletin of the South Ural State University. Series "Computational Mathematics and Software Engineering"*. 2017. Issue 6. vol. 3. pp. 60–72. (In Russ.)
16. Prudkovskij N.S., Bespechnaya D.E. [Data clustering by Louvain and k-means]. *Molodoj issledovatel': vy'zovy' i perspektivy` sb. st. po materialam LXXV mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Young Researcher: Challenges and Prospects Sat. Art. based on materials from LXXV int. scientific-practical conf.]. 2018. pp. 159–166. (In Russ.)
17. Al-Rammaxi A.A.X.X., Sari F.A.A., Minin Yu.V. [Modification of the c-means fuzzy clustering method using the particle swarm method for processing big data]. *Materialy 1-oy Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoy konferencii "Sovremennaya nauka: teoriya, metodologiya, praktika"* [Materials of the 1st All-Russian (national) scientific-practical conference "Modern science: theory, methodology, practice"]. 2019. pp. 231–233. (In Russ.)
18. Yanchukovskij V.N. [Using parallel computing in cluster analysis to generate complex parts]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012. vol. 6(65). pp. 25–30. (In Russ.)
19. Podkolzina L.A. [System analysis of data using a hierarchical clustering algorithm in conjunction with the methods of the apparatus of fuzzy logic]. *Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii materialy VI mezhdunarodnogo seminara* [System analysis, management and information processing materials of the VI international seminar]. 2015. pp. 110–113. (In Russ.)
20. Yarushkina N.G. *Nechetkie neyronnye seti v kognitivnom modelirovanii i tradicionnyx zadachax iskusstvennogo intellekta* [Fuzzy neural networks in cognitive modeling and traditional tasks of artificial intelligence]. M.: MIFI. 2005. 214 p. (In Russ.)
21. Polkovnikova N.A., Kurejchik V.M. [Neural network technologies, fuzzy clustering and genetic algorithms in the expert system]. *Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki – Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences*. 2014. vol. 7(156). pp. 7–15. (In Russ.)
22. Petrov V.F. et al. [Network structure of information processing in distributed control systems of ground-based robotic complexes]. *Izv. vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*. 2018. Issue 23. no. 4. pp. 389–398. (In Russ.)
23. Demidova L.A., Kirakovskij V.V., Pylkin A.N. *Prinyatie reshenij v usloviyax neopredelennosti* [Decision making under uncertainty]. Goryachaya liniya – Telekom. 2015. 283 p. (In Russ.)
24. Mendel J.M. *Uncertain Rule-based Fuzzy Systems*. Springer. 2017. 696 p.
25. Fidanova S. *Recent Advances in Computational Optimization*. Springer. 2019. 239 p.
26. Hooda D.S., Raich V. *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control: An Introduction*. Alpha Science International Ltd. 2017. 409 p.
27. Melin P., Castillo O., Kacprzyk J., Reformat M., Melek W. *Fuzzy Logic in Intelligent System Design*. Springer. 2018. 415 p.
28. Nguyen H.T., Walker C.L., Walker E.A. *A First Course in Fuzzy Logic*. 4th ed. CRC Press. 2018. 458 p.

29. Tanveer M. et al. Machine Intelligence and Signal Analysis. Springer. 2018. 757 p.
30. Woyczyński W.A. A First Course in Statistics for Signal Analysis. 3rd ed. Birkhäuser. 2019. 337 p.
31. Ley C., Verdebout T. Applied Directional Statistics Modern Methods and Case Studies. CRC Press. 2019. 317 p.
32. Seregin, M.Yu. *Intellektualnye informacionnye sistemy: uchebnoe posobie* [Intelligent information systems: a tutorial]. FGBOU VPO “TGTU”. 2012. 205 p. (In Russ.)
33. Kochetkov M., Terentev A., Chernovolenko A. A hybrid model of the 3D-objects recognition system. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. pp. 1521–1524.
34. Kochetkov M., Terentev A., Chernovolenko A. Fuzzy Model of Recognition of Environmental Objects for a Mobile Robotic Complex. Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2019.

Y.I. AL MASHHADANY
**DESIGN AND ANALYSIS OF 7-DOF HUMAN-LINK
MANIPULATOR BASED ON HYBRID INTELLIGENT
CONTROLLER**

Al Mashhadany Y.I. Design and Analysis of 7-DOF Human-Link Manipulator Based on Hybrid Intelligent Controller.

Abstract. A manipulator is an alternative to progress profitability in mechanical computerization. The robotic controller executes forms' assembly operations in hazardous conditions. Since computerized controllers are highly vulnerable nonlinear powerful frameworks, it is hard to provide precise unique conditions at controlling laws' configuration. Virtual Reality (VR) is a fundamental advance at use in modern biomedical, medical procedures and different fields where a 3D object helps to comprehend complex behavior. This work proposes the interaction with 3D models in VR environment achieved by accurate sensing from feedback, and then reconstructs the instruction according to practical limitation of a real human arm movement.

In this work ANFIS played a key role in finding results with optimal values because the combination of Neural Networks (NN) benefits and obscure logic systems research examined the individual defects in both of them. Use of Artificial Neural Networks (ANN) in dynamic systems has quite extensive and accurate results, when adding a training signal system to the mixed learning base implemented at combining the slope proportions technique, a Least Square Error (LSE) preparing the ANFIS organization for any framework to take care of the issue any way. This work presents a keen controller actualization with 7-DOF controller for a model designed with a VR situation that reproduces the system design by associating Matlab/Simulink to connect the VR model with some instruction to execute orders delivered by the hybrid intelligent controller based on ANFIS technique. Palatable outcomes are implemented in reproductions that improve the procedure as an essential utilization of this controller design.

Keywords: Human-Link Manipulator, Hybrid Intelligent Controller, Virtual Reality, Artificial Neural Networks.

1. Introduction. Since the beginning of this century, working with neural networks (NNs) has become effective in numerous troublesome mechanical applications. However, handy encounters have demonstrated that each of these two astute innovations has its constraints in working with their own application deserts that point to restriction of their valuable usage in certain frameworks, particularly the intricate ones [1, 2]. So, to find an answer to this logical issue, a few tests were run to incorporate FL and ANN into a bound together framework that prompted the rise of a fast and precise improvement in the craft by puzzling synapses. Today ANFIS has become one of the most generally utilized neural frameworks and has been proposed by numerous classifiers [3, 4].

Fuzzy system has form information achieved by means of fractional set participation instead of a fresh one. Like neural system FL can create

unmistakable results from obscure vague uncertain and missing input data. An appropriate FIS is basic to rectify fuzzy enrollment capacities and fuzzy standards. Yet building it requires some investment and necessities, as well as special skills. Another problem is to change space information from a poor out-of-business opportunity, even for industry professionals [5-7].

In the mid-1990s an intelligent system called ANFIS was created. Adhering to ideas that the rationale is fuzzy and nervous; it is a framework across a granular strain that improves learning and programmed adaptation. Specialists have used such a framework to anticipate and display different construction frameworks. One of the basics in versatile neural learning strategies is a thin display technique that learns the informational index and natural registers /registration work parameters/ that allow to get the best possible degree for FIS by following information / yield information [8-10].

The recording work parameters are set by a mixture of least square estimation and back reproductive calculation in order to estimate the sharing work parameter. Parameters change through an educational procedure as it is in the nervous system. Their changing is encouraged by an angle vector, which determines what information the FIS models have for specific arrangements of parameters. When the angle vector is received, any of a few advancement schedules can change the parameters to lessen the mistake between the genuine and the ideal yields. The fluffy framework at that point gains from the information demonstrating. The change of the participated work limits does not have to deal with a human administrator, so, this is a preferred position over unadulterated fluffy worldview [11-13].

Nonstop and boring assignments of lines creation are tiring, and weakness can cause some damage in medical issues. A robot controller arm can more than once convey immense and substantial parts starting with one generated line onto the next one, so, these days it is widely utilized at processing plants to build effectiveness and handle rehashed/risky/sensitive undertakings (e.g., semiconductor wafer creation) [14-16].

Opposite kinematics is one of the fundamental issues in mechanical autonomy, and it is frequently handled at differential level since joint space speed maps straight to Cartesian space speed. Subsequently registering the joint space speed from a given Cartesian end-effector speed can be viewed as a straight relapse issue. Thus, it is notable that the Jacobian lattice of the controller, speaking about this direct mapping, can be ranked insufficient (should there be an occurrence of kinematic singularities) and regardless of whether its full-position has a larger number of segments than columns (in the event of repetitive controllers), hence the straight relapse is not a well presented issue [17, 18].

The plan of contrasting the most common arrangements with the kinematic singularities issue depends on regularization drawing near for the most part known as damped least squares arrangements, which are used in the regularization technique by Tikhonov (1963) working with poorly presented direct relapse issues. The thought is to explain a poorly presented direct reversal issue by presenting it in the cost work, together with the remaining of the relapse, a punishing term for the standard of the arrangement. The most basic issue in such methodologies is the determination of the weight, the alleged damping factor, of such an extra term [19]. An extraordinary ANFIS learning methodology, called invert (TBP), was used to control non-direct MIMO systems by trading between units suitable to each time sample [20]. In any case, this strategy is portrayed by serious estimation and advancement in execution [21].

Another preparation model with ANFIS as intelligent controller with nonlinear and complex MIMO design is a reverse training; the ANFIS arrangements are prepared to get familiar with the opposite elements of the system it controls. Its prosperity, nonetheless, is significant with three components like: exact displaying of the first framework (an issue when the framework is perplexing), accessibility of the framework backward elements (generally they do not exist), and fitting dissemination of the prepared information (could be inconceivable, given imperatives of the framework elements) [22, 23]. There exists another preparation approach different from the previously referenced ones.

Present robot route frameworks request controllers that can consider certain complex issues in dubious and dynamic situations. ANFIS gathers intrigue since this provides the advantages of combining NN and FL, and evacuates their separate burdens by consolidating them with their basic highlights. ANN is the other inspiration to be examined into FL. It may be successfully utilized as a widespread learning worldview by including fluffy derivation frameworks [24, 25].

Conventional robot control techniques depend on solid scientific displaying, examination and amalgamation. Existing methodologies are suitable to the controllers of portable robots operating under obscure conditions and running errands that require development in unique situations. Operational assignments under the unstructured conditions, for instance, on distant planets or at dangerous waste locales, that are progressively intricate, the explanatory demonstrating is deficient yet. Numerous scientists and architects have attempted to somehow resolve the navigational issues of versatile robot frameworks [26, 27].

Despite the fact that fuzzy frameworks can utilize information based on semantic principles (and hence could actualize master human

information and experience), fuzzy controller has no efficient structure strategy. Tuning of participated work parameters requires some investment. NN training procedures can robotize the procedure with advancement and execution improved [28, 29].

The actualization of ANN with FL system has conveyed neuro-fuzzy as dynamic smart control and made their current unmistakable quality. Continuing free interstate any robot should have a choice to perceive its condition, between recognized data and information received on its circumstance and condition, plan a course which brings it to the objective circumstance from a concealed position, with square staying away and controlling its heading and speed. Ng et al. [30] present a neural-joined warm controller that heads FL delineation of human information with NN understanding how to deal with nonlinear wonderful control issues. Pham et al. concentrate on making sharp multi-head robot bunches fit for both independent movement and dynamic-condition joint exertion at achieving bunch objectives [31, 32].

The additional propose of the neuro-fuzzy adaptable development chooses a structure that empowers robot experts get-together to accomplish versatile wonderful control of steady assignment [33]. Portraying self-managing course in versatile robots as an intrigue methodology inside a course situation, that contains squares and targets, proposes a padded NN controller, that contemplates course heading and course speed as controllable. Rutkowski et al. [34] understood an adaptable neuro-fuzzy social event of a framework; their method gathers basic and plan adaptability in neuro-fuzzy structures. Hui et al. also, Rusu et al. took a gander at neuro-comfortable controllers of sensor-based versatile robot course. Garbi et al. executed an adaptable neuro-padded acknowledgment structure in a mechanical vehicle course [35, 36].

Manipulators are one approach to manage progress in mechanical mechanization gainfulness. Automated controllers have been utilized in making operations under standard and hazardous conditions. They are altogether nonlinear unfathomable frameworks which tend to vulnerabilities. Attaining the exact unfathomable conditions for their control laws is dangerous. Vulnerabilities with the dynamic models combine cloud payloads and obscure frictional coefficients. Universal control or no model vigilant control was strongly recommended as being able to compensate for these vulnerabilities [37].

The enhanced simulation framework is a visual case of the PC interface, which can be linked to a dynamic frame model to clearly reflect the direction and condition of the framework [38]. Virtual model was developed to utilize genuine robot design. Simulink 3D Animation is sort of a

characteristic program giving Simulink Models an inconceivable association, the language of the above program is Virtual Reality Modeling Language (VRML). Brief delineation of making the virtual structure: the mechanical arm is tied as an individual component, the article contains a change hub, a design hub and a shape pivot, in the building hub; the robot arm geometry is set while in the shape hub; the appearance and concealing are picked. The change center contains the article organization, focus point, interpretation, and pivot field rules; these characteristics are related to the body sensor in Sim-Mechanics model connections in which the element arrangement is made by facilitating the activation of the robot arm wrapping, and it is activated by the dynamic frame movement verified in a constant. The state of the connections and the revolution of the robot joints are given in the designed Simulink form [39].

The usage of physical frameworks in a pragmatic manner is viewed as intricate, so working with VR innovation was an essential answer to some issues in building frameworks, therapeutic applications and different fields, that rely upon working in 3D, since it helps to understand complex frameworks. In numerous applications the connections with virtual frameworks can be augmented by a tactile sense, and fast notes can be utilized to apply agent forces of VR condition to a human client [40]. Stem responses are additionally helpful in tele-medical procedure, where the fundamental specialist carefully guides specialized sensitive instruments and in a result receives sensible responses. While numerous frameworks that give compensatory criticism have been created, many issues came under the class of cutting edge explore models, which have turned out to be based on vitality input as they gave third outcomes to these intricate frameworks [41].

Direction in position, velocity and an increased velocity in focus were compared over time. The above was developed for the centers that allow the robot to move in multidimensional Cartesian space. The life of Cartesian pattern is accomplished for three conditions of the street. Cases are given as the immediate development technique and a bended strategy with a different point strategy. Case 1 and 2 are the techniques for straight movement by doing synchronous interpretation. Case 3 is a bended technique with a polynomial capacitance that is highly isolated by focus points. The joint's direction (point, speed, and increasing speed) in a common area is determined by applying retrograde kinematics to the robot [42].

The developing control of human controllers is the primary component in dynamic examination, and the most significant hindrance to be defeated is the issue of the front and back motor on the grounds that the

7-DOF invert kinematic movements have numerous arrangements which prompt stereoscopic arrangements. In this field there is no complete clarification and exact answer about such structures, control [43] and dodging obstructions for human controllers. For sequential processors, the switch drive is substantially more troublesome than the front drive. By and large, the dynamic development can be switched in a few different ways to arrive at a numerical, investigative and geometric technique. The numerical strategy is utilized [43], yet investigative strategies can arrive at all potential arrangements extensively and precisely. There is an incredible trouble in extricating potential arrangements yet utilizing techniques are straightforward building, however it is reasonable for several sorts of controllers [44]. This work introduces the structure of the ANFIS support to the processor model, that was worked out based on the computer-generated experience and condition, and reproduces the model with associating Matlab 2019b/Simulink and VR for executing directions created by its framework based on the ANFIS comfort. A contextual analysis, which recreated 7-DOF human controller, fulfilled outcomes received at reproductions, and improved the structure as a fundamental use of this control framework; prologue to the methodology in the primary area. The subsequent area displays the active model of 7-DOF human controller, then shows the ANFIS controller design and training strategies for intelligent control. Area V delineates the genuine model for human manipulator arm taking care of Segment IV that shows a mimicked contextual analysis of framework structure up to the end.

2. Kinematics Solution for 7-DOF Human Manipulator. The situation of controller joints is determined based on the estimations of the joint points utilized by the front engines [37, 38]. This technique is viewed as one of the most exact strategies in the field of work inspecting and delivering frameworks of converse elements. At the point, when the arm scope of activity is to be determined by considering a shoulder width denoted as D parameter, with its upper safe distance L_1 , and a length of the lower end L_2 considered, the shoulder area ($PP_1(0, -D_T, 0)$), and a situation for elbow is ($PP_2(x_{pp2}, y_{pp2}, z_{pp2})$). The joint is named ($qq_1 \dots qq_7$) and in the event that the expected situation of the essential joint is I in connection to $I-1$ with a homogeneous network $4 \times 4 {}^{i-1}T_i$ as derived from equation (1).

Assuming that the situation of the seventh joint in the fixed arrange ($PP_3(x_{pp3}, y_{pp3}, z_{pp3})$), given that its points are spoken to by (R-P-Y (Roll-Pitch-Yaw) is ψ . Under these directions, the seventh position can be depicted by a homogeneous lattice 0T_7 :

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} cqq_1 & 0 & sqq_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -D_T \\ -sqq_1 & 0 & cqq_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cqq_2 & -sqq_2 & 0 \\ 0 & sqq_2 & cqq_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} cqq_3 & -sqq_3 & 0 & 0 \\ sqq_3 & cqq_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cqq_4 & -sqq_4 & 0 \\ 0 & sqq_4 & cqq_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} cqq_5 & -sqq_5 & 0 & 0 \\ sqq_5 & cqq_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^5T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cqq_6 & -sqq_6 & 0 \\ 0 & sqq_6 & cqq_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^6T_7 &= \begin{bmatrix} cqq_7 & 0 & sqq_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -D_T \\ -sqq_7 & 0 & cqq_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

the symbols: $sqq_i = \sin(qq_i)$; $cqq_i = \cos(qq_i)$

$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi & c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi & x_{pp3} \\ s\varphi c\theta & s\varphi s\theta s\psi + c\varphi c\psi & s\varphi s\theta c\psi - c\varphi s\psi & y_{pp3} \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & z_{pp3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

The final posture of the racket can be calculated by matrix 0T_7 as follows:

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & pp_x \\ n_y & o_y & a_y & pp_y \\ n_z & o_z & a_z & pp_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

From the final angles (θ , ψ , ϕ) can be calculated the final posture of the racket by equations (1) and (2) as follows:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= a \tan 2(n_y, n_x) \\ \theta &= a \tan 2(-n_z, c\varphi n_x + s\varphi n_y) \\ \psi &= a \tan 2(s\varphi a_x - c\varphi a_y, -s\varphi o_x + c\varphi o_y) \\ x_{pp3} &= pp_x \\ y_{pp3} &= pp_y \\ z_{pp3} &= pp_z \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Where $a \tan 2(\theta, \psi, \phi)$ is a quadratic invert shadow capacity, (3) a forward engine for the processor [18]. The Jacobian framework used to ascertain the speed from the hub region as per the speed of the working. The task connection for all system can be expressed mathematically as:

$$V_r = J_r(q) \dot{q}. \quad (5)$$

The parameter V_r represents the racket speed, while \dot{q} represents the joint of space speed. The calculation of matrix (Jacobian matrix) J with dimension (6×7) , through differential transformation method with i^{th} parameters of J_r can be received:

$$J_i = \begin{bmatrix} (pp_i \times n_i)_k \\ (pp_i \times o_i)_k \\ (pp_i \times o_i)_k \\ n_{ik} \\ o_{ik} \\ a_{ik} \end{bmatrix} \quad (6)$$

The parameters $\mathbf{a}_i(a_{ix}, a_{iy}, a_{iz})$, $\mathbf{pp}_i(pp_{ix}, pp_{iy}, pp_{iz})$, $\mathbf{o}_i(o_{ix}, o_{iy}, o_{iz})$, and $\mathbf{n}_i(n_{ix}, n_{iy}, n_{iz})$ represent the elements of matrix ${}^{i-1}T_i$:

$${}^{i-1}T_7 = {}^{i-1}T_i \dots {}^6T_7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & pp_x \\ n_y & o_y & a_y & pp_y \\ n_z & o_z & a_z & pp_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

The rotation of joint I is represented by symbol kk . For example, when the joint moved around x-axis by kk , the speed V_r with Jacobin J_r can be described by the Moore-Penrose (M. P) formula as follows:

$$\dot{q} = J_r^+ V_r \quad (8)$$

Where $J_r^+ = (J_r^T J_r)^{-1} J_r^T$ is the M.P pseudo reverse grid of J_r . The position of an elbow PP_2 is within circle at the axis and is $PP_1 PP_3$. The position of the inside point and the areas of PP_1 and PP_3 decide the sweep (r) and the parameters for the length of arms L_1 and L_2 , demonstrating the level developed with focuses PP_1 , PP_2 and PP_3 as Ω_1 , and the level built by focuses O , PP_1 and PP_2 is as Ω_2 , showing the detachment edge somewhere in the range of Ω_1 , And Ω_2 , as α . When the position of P_3 is known, the position of the PP_2 elbow can be interestingly controlled by α . On the off chance that focuses O , PP_1 , and PP_3 have a direct relationship while PP_1 , PP_2 , and PP_3 do not exist, the Ω_2 , level does not exist. The point can be characterized as the detachment edge among Ω_1 , and the even plane. Additionally, if the PP_1 , PP_2 , and PP_3 focuses are settled, the "1" level not available and the PP_2 will be determined by the PP_1 and PP_3 positions and the L_1 and L_2 are safe distance variables. Given the general arrangement of a processor, as shown by Figure 1, the reversible of inverse components can be settled, if point α with the spots of its racket is given. As shown by the specifications of the improvement of human weapons, a mapping association between α and the position which can be worked and overcome of all an internal affiliation. The unit vector showing PP_3 is insinuated as PP_1 in the structure I (i_1, i_2, i_3) and acknowledges that point α is enlisted by the decidedly ready ANN structure, by then the network can be modulated as follows:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1(xx - x_o) + i_2(yy - y_o) + i_3(zz - z_o) = 0 \\ (xx - x_o)^2 + (yy - y_o)^2 + (zz - z_o)^2 = r^2 \end{array} \right. \quad (9)$$

The available structure Ω_2 and its hover meet at two focuses. One of the focuses close to the neck by $PP_w (xx_w, yy_w, zz_w)$ and point $\angle PP_2 O$; PP_w is only a partition edge α somewhere in the range of Ω_1 and Ω_2 . Indicate the standard vector of Ω_2 as n and the situation of P_w ought to fulfill the condition [39]:

$$\overline{OPP_w} \cdot n = 0. \quad (10)$$

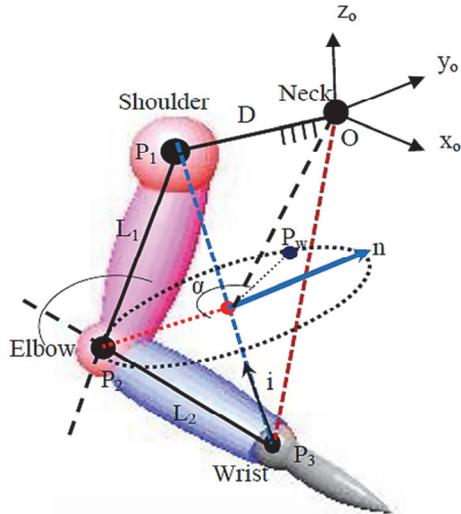


Fig. 1. 7-DOF human manipulator configuration

The position for P_w can be determined by (8) and (10). Additionally, the position for P_2 ($x_{pp2}, y_{pp2}, z_{pp2}$) meets the condition:

$$\sqrt{(x_{pp2} - x_m)^2 + (y_{pp2} - y_m)^2 + (z_{pp2} - z_m)^2} = 2r \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (11)$$

Position of P_2 can be determined by (8) and (11). As indicated by the places of P_1, P_2, P_3 and a cosine hypothesis, the point of joint 4 can be determined as:

$$q_4 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - \|\overline{PP_1PP_3}\|^2}{2L_1L_2} \right). \quad (12)$$

By using the position of P_2 , can be calculated the:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{pp2} & y_{pp2} & z_{pp2} & 1 \end{bmatrix}^T &= \\ &= 0 \quad T_1^{-1} T_2^{-2} T_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_1 & 1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (13)$$

At that point the edges of joint 1 and joint 2 can be determined as:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= a \tan 2\left(\frac{-x_{p2}}{cq_2L_1}, \frac{-z_{p2}}{cq_2L_1}\right) + k\pi; (k \in N) \\ q_2 &= a \sin((y_{p2} + D) / L_1) \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Also, by using the target position of P₃, can be calculated the:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{pp3} & y_{pp3} & z_{pp3} & 1 \end{bmatrix}^T &= \\ = {}^0 T_1^1 T_2^2 T_3^3 T_4^4 \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_2 & 1 \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \quad (15)$$

At that point the edge of joint 3 will be determined by:

$$\left. \begin{aligned} q_3 &= a \tan 2\left(\frac{y_3 + D_T - sq_2L_1 - sq_2cq_4L_2}{cq_1cq_2sq_4L_2} \right) \\ &\quad \left. \begin{aligned} &sq_1sq_2 \\ &\frac{x_3 + sq_1cq_2(1 + cq_4)L_1}{sq_2cq_1L_1} + \\ &\frac{y_3 + D_T - sq_2L_1}{cq_2sq_4L_2} - \frac{sq_2cq_4}{cq_2sq_4} \end{aligned} \right\} \quad (16) \end{aligned}$$

According to (2), at that point the edges of joints 5, 6, and 7 will be determined as:

$$T_5^4 T_6^5 T_7^6 = \left[T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 \right]^{-1} T_7^6 = T^*. \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} q_5 &= a \tan 2(-T_{13}^*, T_{23}^*) + k\pi \quad (k \in N) \\ q_6 &= a \tan 2(sq_5T_{13}^* - sq_5T_{23}^*, T_{33}^*) \\ q_7 &= a \tan 2(-cq_5T_{12}^* - sq_5T_{22}^*, cq_5T_{11}^* + sq_5T_{21}^*) \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Where: T_{ij}^* is th i^{th} and j^{th} are matrix dimension of T .

3. ANFIS Controller Model. ANFIS is a system composed of ANN and FIS. At the first implement Takagi Sugeno (T.S.) assessed it as an intelligent system [40]. In the present investigation, four information sources are used: the front check separation (x_1), the correct impediment separation (x_2), the left snag separation (x_3) and the objective edge (x_4) and the yield is the guiding edge. On the off chance the rules for implementing the ANFIS structure, shown in Figure 2, are determined as follows:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Rule: IF } xx_1 \text{ is } A_j; \\ xx_2 \text{ is } B_k; \text{ } xx_3 \text{ is } C_m \text{ and } xx_4 \text{ is } D_n \\ \text{THEN } F_i = pp_i xx_1 + r_i xx_2 + s_i xx_3 + t_i xx_4 \end{array} \right\} \quad (19)$$

where

$$\left. \begin{array}{l} F_i = pp_i xx_1 + r_i xx_2 + s_i xx_3 + t_i xx_4 + u_i \\ \text{steering angle:} \\ JJ = 1 \text{ to } q_1; \text{ } kk = 1 \text{ to } q_2; \\ mm = 1 \text{ to } q_3; \text{ } nn = 1 \text{ to } q_4; \\ \text{and } i = 1 \text{ to } q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \end{array} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} LL_{2g} = U_{ag}(x) \text{ for } gg = 1, \dots, q_1 \\ LL_{2g} = U_{Bg}(x) \text{ for } gg = q_1 + 1, \dots, q_1 + q_2 \\ LL_{2g} = U_{Cg}(x) \text{ for } gg = q_1 + q_2 + 1, \dots, q_1 + q_2 + q_3 \\ LL_{2g} = U_{Dg}(x) \text{ for } gg = q_1 + q_2 + q_3 + 1, \dots, q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \end{array} \right\} \quad (21)$$

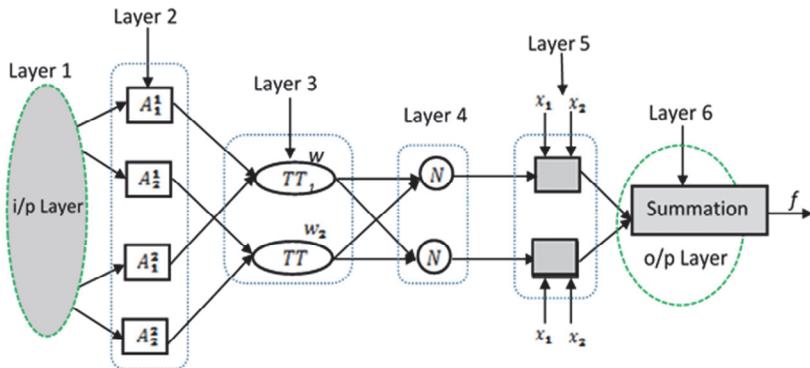


Fig. 2. ANFIS diagram with six layers

$$\left. \begin{array}{l} LL_{3i} = W_i = U_{ag}(x_i), U_{Bg}(x_i), U_{Cg}(x_i), U_{Dg}(x_i); \\ \text{For } i = 1, \dots, (q_1 + q_2 + q_3 + q_4); \\ gg = 1, \dots, \sum_{i=1}^4 q_i \text{ and } r_f = q_1 * q_2 * q_3 * q_4 \end{array} \right\} \quad (22)$$

$$LL_{4i} = \overline{W}_i f_i = \frac{W_i}{\sum_{r=1}^{r_f} W_r}, \quad (23)$$

$$LL_{5i} = \overline{W}_i f_i = \overline{W}_i (p_i x_1 + r_i x_1 + s_i x_3 + t_i x_4 + u_i), \quad (24)$$

$$LL_{6i} = \sum_{r=1}^{r_f} \overline{W}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^{r_f} \overline{W}_i f_i}{\sum_{i=1}^{r_f} W_i}. \quad (25)$$

Figure 2 illustrates the overall structure of the ANFIS control for any plant management. This hybrid ANFIS controller works with an old style controller. It uses the control law that pushes the ultimate responder of the console to an ideal position and takes the proposed estimation procedure. The console has six common control components; each conventional ANFIS controller must be used across a strain. All ANFIS controllers have a similar structure and get comparative change and aptitude for standards. The ANFIS console chassis contains unclear fragments of FIS after the least NN squared. The frame structure constitutes a large number of units (and affiliations) coordinated in five related configuration layers (L1 to L5) as follows:

L1: Contains input factors (investment limits), for example, inputs 1 and 2. The triple or costly MF can be used. This layer provides data related to xi for the accompanying layer. There exist two data sources (botch signal and bungle eer (k)) that are determined via equation (12). The point joint aid and its change are used as an analysis of the components inventory and their subsequent use in the control law by equation (11):

The enrollment capacities expressed here as A, B, C, and D are ring-er molded capacities and characterized through equation (27).

All the changes given in various types of the ring formed limit, differing and according to the educational assortment for the issue considered caused by the fuzzy interesting parameters work for the different values of the parameters a_g , b_g , and c_g .

L2 (Attention Layer): Checks the weight of each recruiting action. Inputs with respect to xi are received from the initial layer, where the investment work of each cushy game plan is done for individual data factors, and recruitment indicates that it decides the degree to which the ninth entry has a spot with the set of feathers that contribute to the accompanying layer.

L3 (Standard Layer): Every neuron currently regulates feathered bases; each action is a starting level for each criterion. Each central point of the classes is marked by institutional burdens.

L4 (Defragmentation Layer): Gives upcoming yield greetings in the light of the rules conclusion. The relationship between the layers is weighted by the lined mono sole that addresses another plan for the parameters of the soft nervous frame.

L5 (Production Layer): All information sources beginning with Layer 4 are abbreviated and change the results of direct aggregation into slides. The ANFIS structure is usually adjusted by estimating the least squares and calculating the posterior propagation to estimate the coefficient of interest. The estimate above is used with six ANFIS controllers that control various parameters of the controller.

$$\left. \begin{aligned}
 \mu_{Ag}(x) &= \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{x - c_g}{a_g} \right)^2 \right\}^{b_g}}; \quad g = 1 \quad \text{to} \quad q_1 \\
 \mu_{Bg}(x) &= \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{x - c_g}{a_g} \right)^2 \right\}^{b_g}}; \quad g = q_1 + 1 \quad \text{to} \quad q_1 + q_2 \\
 \mu_{Bg}(x) &= \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{x - c_g}{a_g} \right)^2 \right\}^{b_g}}; \\
 g &= q_1 + q_2 + 1 \quad \text{to} \quad q_1 + q_2 + q_3 \\
 \mu_{Bg}(x) &= \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{x - c_g}{a_g} \right)^2 \right\}^{b_g}}; \\
 g &= q_1 + q_2 + q_3 + 1 \quad \text{to} \quad q_1 + q_2 + q_3 + q_4
 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

The ANFIS controller and the customary controller yields are included. Post-starting, the planning of the parameters is acclimated to the ANFIS controller parameters as demonstrated by fleecy alteration getting ready standards (explained straightaway).

4. Design of 7-DOF Human Manipulator Based on Virtual Reality. The structure prerequisites with VRML are clarified by restricted handling assumptions, freedom, steady self-enlistment, responsibility; every fashioner ought to think about these focuses. A clarification of the structure methods will be given in VRML. The VRML configuration relies upon the fashioner's data and the picture of the article. There are two alternatives for planning in a computer generated reality: the first one is a standard arrangement, for instance, ball, table, roller etc, and the subsequent choice is a free structure by choosing the recorded face set one is to form numerous setups by free reorder focuses. Any structure is in this manner a genuine structure as in the subsequent choice. The subsequent choice begins with building these parts in a steady progression and confirms the state of the applicable genuine moving part.

These processor' pieces cannot be imitated in a computer generated reality, and the standard arrangement is utilized in the augmented simulation library. The organization is not the same along these lines; the structure is accomplished utilizing the recorded face target set in a computer generated real model. The subsequent choice in the plan is significant, as the association between all pieces of the structure will be accomplished for the last item, and the beginning of the article must be resolved. Speaking about the beginning stage of the plan, ITS undertaking is finished by choosing the principal shape (e.g., the standard), and afterward interfacing of the following shape (the subsequent joint) to the Kids catch and utilizing a similar methodology with different elements. Figure 3 shows the overall 7-DOF human manipulator as a human arm form.

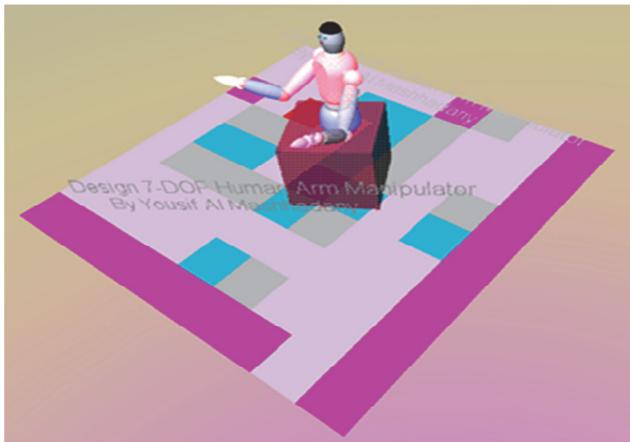


Fig. 3. Design and implementation of 7-DOF human manipulator by VR technique

5. Design of Hybrid Intelligent Controller. The structure of an intelligent controller of the human manipulator as 7-DOF model depends on the ANFIS design. In this work it is actually identified with a genuine estimations of framework parameters, considering the real restriction of the human arm joints as indicated by the subtleties. The joint motor is a genuine motor viewed as a vehicle working as in condition (1).

$$T.F_m(s) = \frac{k}{s^2 + 16s + 24}; \quad k > 0. \quad (27)$$

Presentation of the square chart of the control framework which describes in detail (see Fig. 4) commitments for system structure that has two-way bearing that present (TT_1, TT_2, TT_3) and the final target position limited by (T_x, T_y, T_z). In this method, every joint in manipulator structure will be controlled separately; as the network for seven controllers is used, all the system design will prepare the controlling signal with vectors (δ). The execution of the order will be done according to practical assumptions for a human arm.

The prepared calculation contains contributions for wanted estimations of the point separator and the real estimations of these edges. The ideal qualities are determined utilizing the investigative arrangement of the IKP calculation shown up in the previous components. The real estimations of all joint edges receive remarks from initial structure operated with VR innovation.

The ANFIS controller was simulated by Matlab Ver. 2019b programming Ver.2019b, with two sources of infomation, a mistake sign, and a change in the blunder. The fluffy derivation technique was developed by Mamdani and utilized on the grounds, that it is instinctive, broadly acknowledged, and appropriate to real system info, and, for this system design, it gives preferable outcomes versus Sugeno deduction strategy (see Fig. 5).

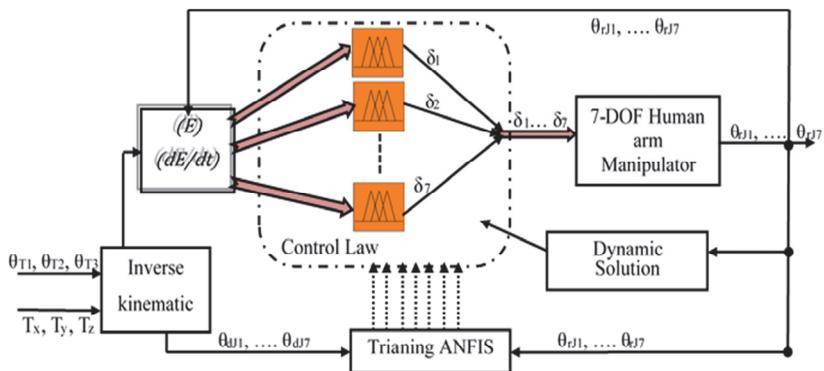


Fig. 4. Structure of intelligent controller with system design

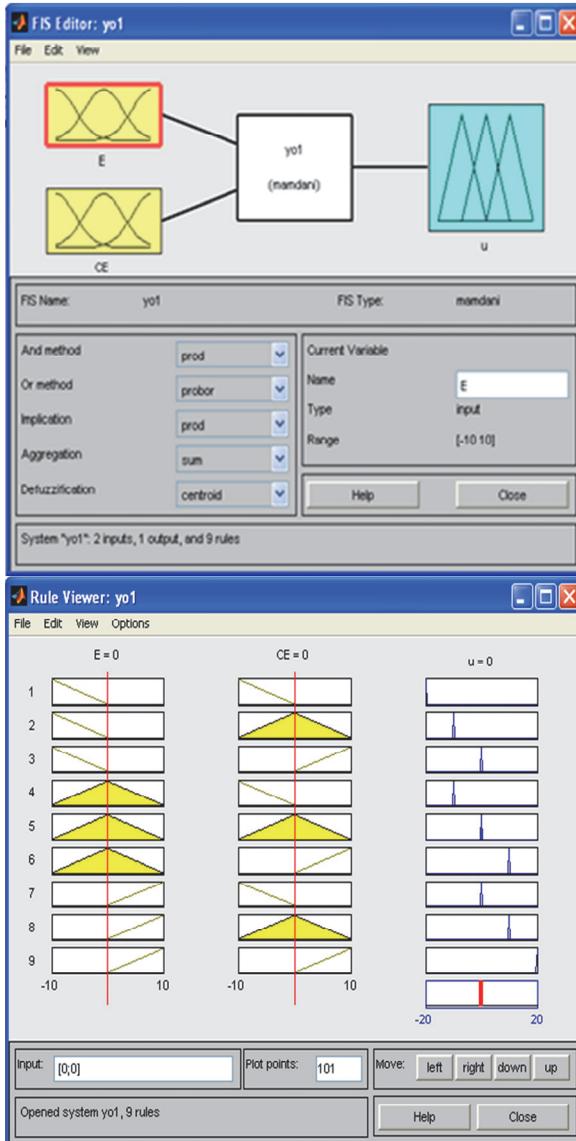


Fig. 5. Training rules of the ANFIS controller based on Mamdani's fuzzy inference

In planning the controller, kinds of participation capacities were attempted before choosing the best: triangular inherent enrollment work (trimf).

The experimental configuration of the ANFIS controller, i.e., choosing an impedance category, the participation work style, and the quantity of the enrollment work at a shrouded stage, gave ideal outcomes: least number of rules and straightforward reproduction. A plan utilizes seven equal associated ANFIS to process an ideal avoidance for joints and give the ideal edge. Figure 6 shows the method of the Matlab-fuzzy tool based on compartment structure.

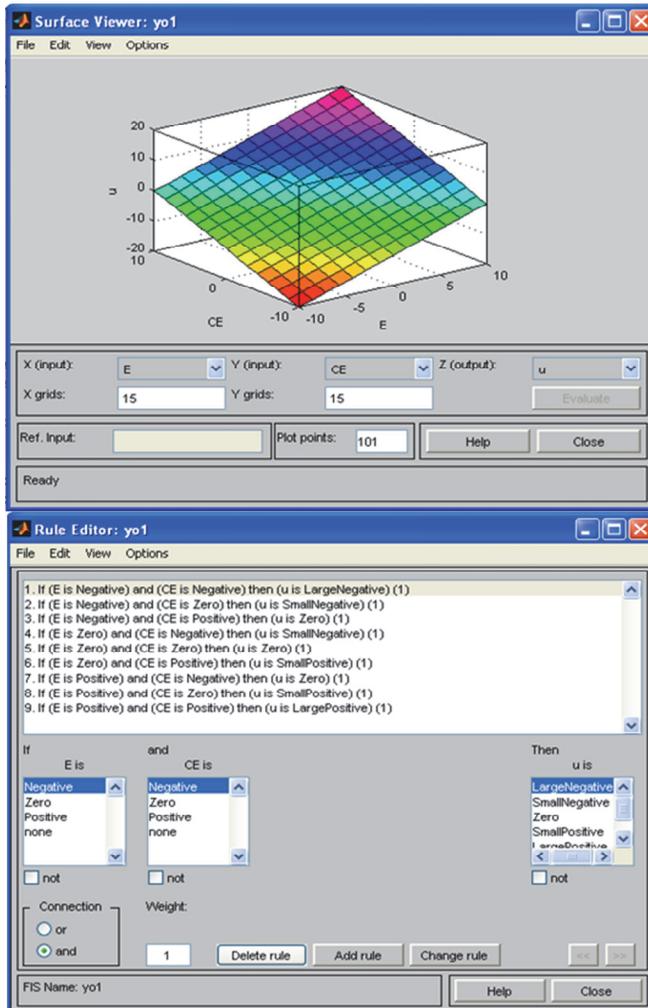


Fig. 6. Testing for ANFIS (off-line form) controller with surface error

6. Simulation and Testing of System Design. A simulation of this design is shown in Figure 7, a virtual reality design control diagram. The human arm is a complex and nonlinear system and has multiple interactions in the movements for which each joint is responsible. So, to control this movement and implement it accurately is needed the use of seven networks of ANFIS controllers to execute all the movements of the human arm accurately. Training for these networks was built on the basis of the practical data of these movements, accounting for all practical limitations in implementing the movements.

The controlling rules were produced using nine principles by setting standards for them using the ANN system. The exact value of the joint sites is returned by the back signal, and then the new command is calculated based on the error signal that is calculated by comparing the calculated site with the actual site. Moving to the second location in the path, except for obtaining the required accuracy, the delay achieved through high speed was overcome at calculating the final value that characterizes the ANFIS system. Conventional controller data (PID) were used as starting points for smart rulers. Results and construction of these controllers can be seen in Figure 7.

By examining this design for several different tracks of the arm and for implementing different tasks such as rotation and complex three-dimensional movements, it can be concluded that the performance of double units between the traditional control system PID and smart controls ANFIS has accurate, rapid and reliable results in building complex systems intended for industrial applications. Figure 8 presents detailed steps used to produce orders in controllers and the final results obtained.

The commands in the controls are produced via Simulink / Matlab by applying the algorithm built for these controls. The link between the human arm models was built using VR. This model is operated with the program instructions prepared by the designer. The design was tested by performing different movements like twisting/elbow expansion, elbow rotation; shoulder snatching, flexion/shoulder augmentation, ulnar/spiral drift, ebb and flow/flat augmentation of the shoulder, all above postures shown in Figure 9.

Control and reenactment of the human control arm have been implemented currently. The joystick is collected first; at this point it is replaced by an additional correspondence and control interface card. Reproduction manipulator and similarly generated computer experience model. The convergence between the reproductive robot and the original robot is confirmed by the use of distinct bookmarks. The results gave worthy feedback with the ANFIS controller. The projects were executed by graphical user interface (GUI).

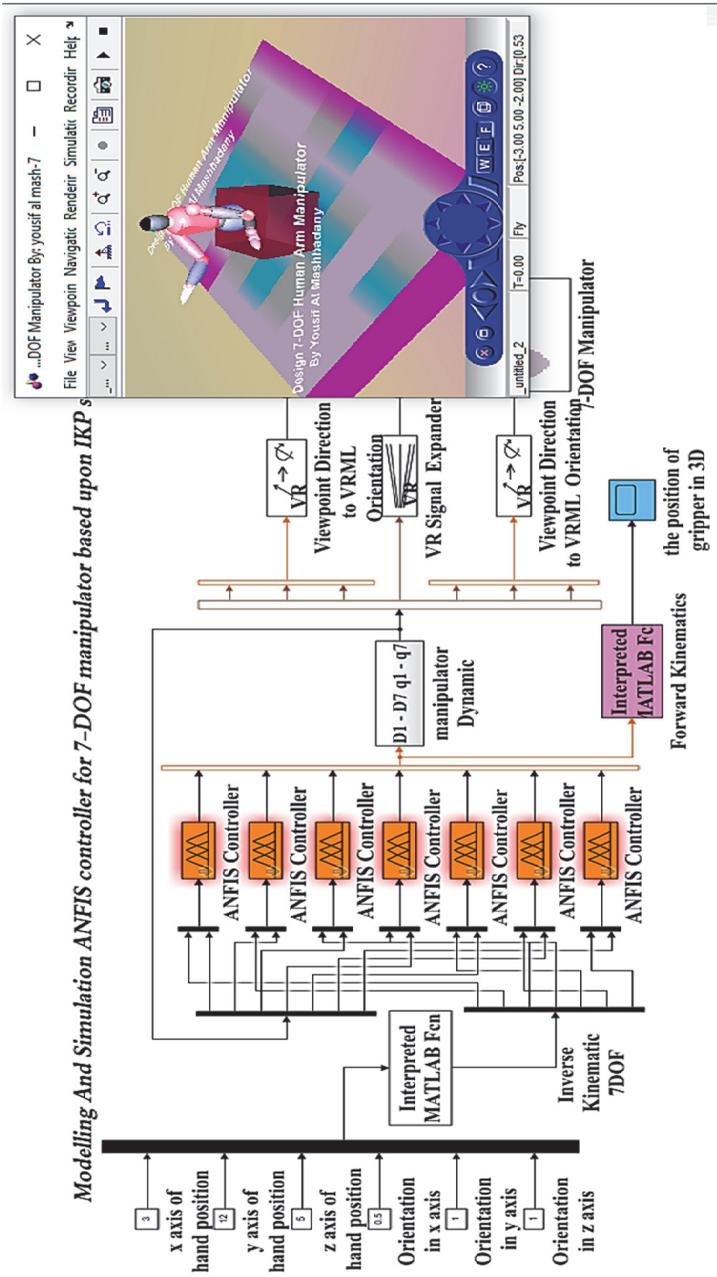


Fig. 7(a). Simulation testing of 7-DOF human manipulator model based on hybrid intelligent controlle

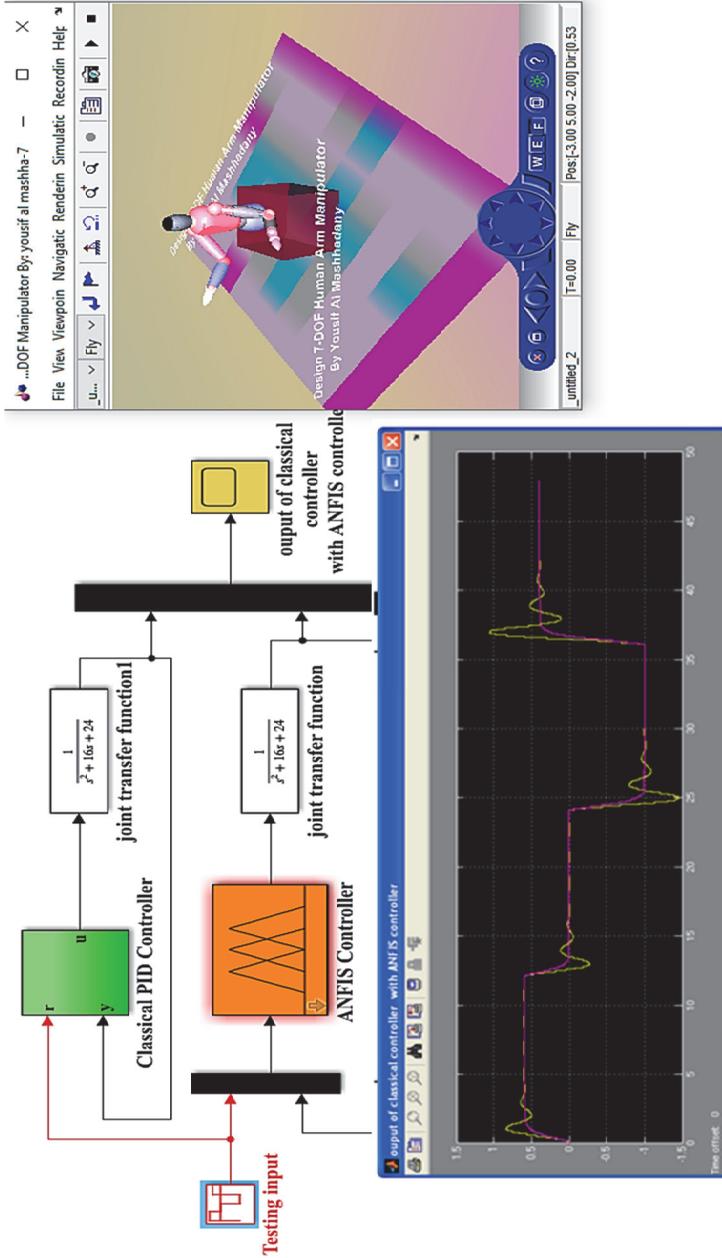


Fig. 7(b). Simulation testing of 7-DOF human manipulator model based on hybrid intelligent controller

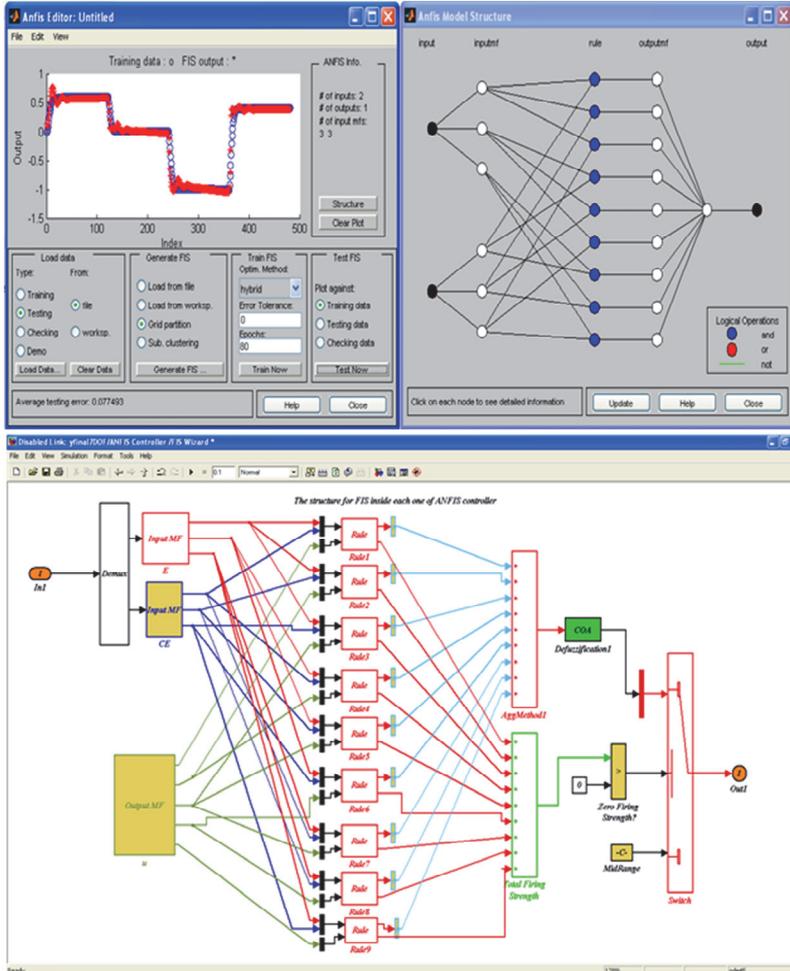


Fig. 8. GUI Matlab for ANFIS training and construction

Various contextual investigations are presented. Instructions are directed to various methods and show the trend of all watched joints. The amplitude of the multiple boundaries was marked by the method. There was a need for polynomial request to ensure a smooth increase in knuckle movement speed. The results indicate that significant implementation made contact reactions faster. Therefore, new trends can possibly be envisioned depending on the customers' requirements. The following computerized thinking methods will be applied to the robot architecture for better performance after the traits.

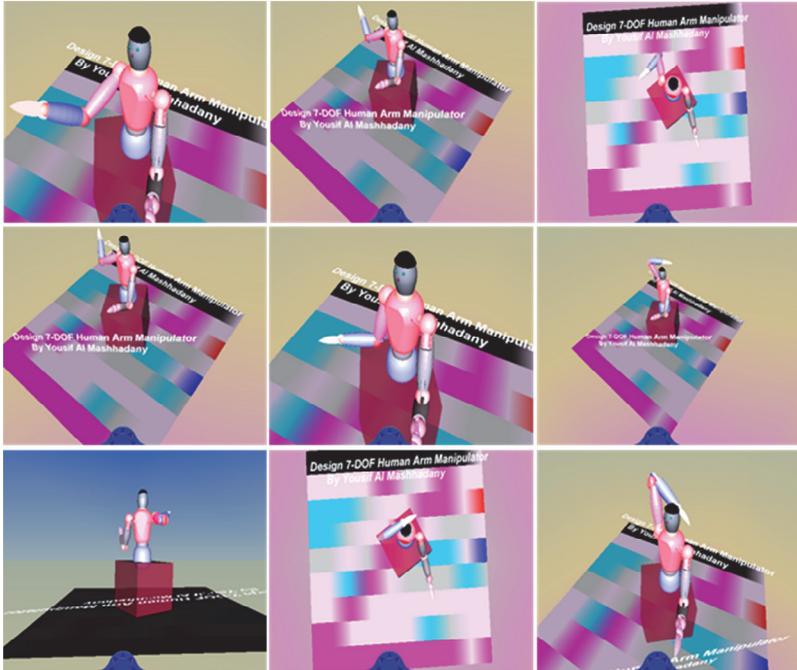


Fig. 9. The implementation of different postures for 7-DOF human manipulator model based on hybrid intelligent controller

7. Conclusion. The main goal of using smart controls of all kinds is to get rid of the linear systems' persisting problems, especially in dynamic systems. In this work, quite a precise hybrid intelligent controller was designed through using the ANFIS units, which depend on the accuracy of work based on eliminating all obscure obstacles at performance. The system administrator needs a high accuracy in training and examining all types of tracks that the arm can implement and store data for these measures. Comparing the results of traditional PID controls and smart controllers, depending on the hybrid installation that was used, it can be seen that the results of smart controls are highly accurate and fast, and they can perform broad tasks by increasing paths' accuracy. It can also be observed that the combination of the FIS system and the neural network system has given these controllers additional strength to deal with nonlinear interference in many complex movements that resulted in mixing more than one joint at the same time. The ANFIS control units with hybrid systems contribute to increasing the efficiency of these controllers' performance and accomplishing complex tasks by relying on the calculations' accuracy and the ability to address the

disturbances that occur during the performance of dynamic systems. Therefore, the use of hybrid control units on the basis of ANFIS units could be recommended for complex and important applications like surgical procedures and production lines for small objects in laboratories.

References

1. Rosen E. et al. Testing robot teleoperation using a virtual reality interface with ROS reality. Proceedings of the 1st International Workshop on Virtual, Augmented, and Mixed Reality for HRI (VAM-HRI). 2018. pp. 1–4.
2. Prabu D., Kumar S., Prasad R. Advanced Dynamic Path Control of the Three Links SCARA using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Robot Manipulators, Trends and Development*. 2010. pp. 399–412.
3. Katzschmann R.K. Building and Controlling Fluidically Actuated Soft Robots: From Open Loop to Model-based Control. Massachusetts Institute Of Technology. 2018. pp. 247–272.
4. Tayebihaghighi S., Piltan F., Kim J.M. Control of an Uncertain Robot Manipulator Using an Observation-based Modified Fuzzy Sliding Mode Controller. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018. vol. 10. no. 3. pp. 41–49.
5. Mahmoodabadi M.J., Ziaei A. Inverse Dynamics Based Optimal Fuzzy Controller for a Robot Manipulator via Particle Swarm Optimization. *Journal of Robotics*. 2019. vol. 2019. 10 p.
6. Al-Mashhadany Y.I. MIEEE H. E. ANFIS-Inverse-Controlled PUMA 560 Workspace Robot with Spherical Wrist. *Procedia Engineering*. 2012. vol. 41. pp. 700–709.
7. Ahmed M.N., Veladri K. Modeling and Simulation of 7-dof Robotic Manipulator. National Conference on Technological Advancements in Mechanical Engineering. 2016. pp. 303–309.
8. Al-Mashhadany Y.I. Modeling and Simulation of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Chopper-Fed DC Motor Drive. 2011 IEEE applied power electronic colloquium (IAPEC). 2011. pp. 110–115.
9. Gorobtsov A.S. et al. [Features of solving the equations of the inverse problem method for the synthesis of stable controlled motion of walking robots]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2019. vol. 18(1). pp. 85–122. (In Russ.).
10. Al-Mashhadany Y.I. A Posture of 6-DOF Manipulator By Locally Recurrent Neural Networks (LRNNs) Implement in Virtual Reality. 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA). 2010. pp. 573–578.
11. Klimchik A., Pashkevich A. Robotic manipulators with double encoders: accuracy improvement based on advanced stiffness modeling and intelligent control. *IFAC-Papers OnLine*. 2018. vol. 51. no. 11. pp. 740–745.
12. Shahri A.R.M., Khoshnavan H., Naebi A. Design ping-pong player robot controller with ANFIS. 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation. 2011. pp. 165–169.
13. He Y. et al. Dynamic Modeling, Simulation, and Experimental Verification of a Wafer Handling SCARA Robot With Decoupling Servo Control. *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 47143–47153.
14. Alferov G., Ivanov G., Efimova P., Sharlay A. Study on the Structure of Limit Invariant Sets of Stationary Control Systems with Nonlinearity of Hysteresis Type. AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1863. no. 1. pp.080003.
15. Ivanov G.G., Sharlay A.S. On stability of linear homogeneous switched systems. 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP). 2015. pp. 13–15.
16. Andreev V.P., Pletenev P.F. [The method of information interaction for distributed control systems in robots with a modular architecture]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2018. vol. 2(57). pp. 134–160. (In Russ.).

17. Mahmoodabadi M.J., Baghini A.Y. Design of an Optimal Fuzzy Controller of an Under-Actuated Manipulator Based on Teaching-Learning-Based Optimization. *Acta mechanica et automatica*. 2019. vol. 13. no. 3. pp. 166–172.
18. Busson D., Bearee R., Olabi A. Task-oriented rigidity optimization for 7-DOF redundant manipulators. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. vol. 50. no. 1. pp. 14588–14593.
19. Kulakov F., Kadry S., Alferov G., Sharlay A. Bilateral Remote Control over Space Manipulators. AIP Conference Proceedings. 2018. vol. 2040. no. 1. pp. 150015.
20. Cen L., Melkote S.N. Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling. *Procedia Manufacturing*. 2017. vol. 10. pp. 486–496.
21. Arkhipov V.V., Naumov V.B. [Artificial intelligence and autonomous devices in the context of law: on the development of Russia's first law on robotics]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 6(55). pp. 46–62. (In Russ.).
22. Di Vito D., Natale C., Antonelli G. A Comparison of Damped Least Squares Algorithms for Inverse Kinematics of Robot Manipulators. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. vol. 50. no. 1. pp. 6869–6874.
23. Faria C. et al. Position-based kinematics for 7-DoF serial manipulators with global configuration control, joint limit and singularity avoidance. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. vol. 121. pp. 317–334.
24. Kumar P.B., Verma N.K., Parhi D.R., Priyadarshi D. Design and control of a 7 DOF redundant manipulator arm. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2019. vol. 73. pp. 1–12.
25. Me M.N.A., Veladri K. Modeling and Simulation of 7-dof Robotic Manipulator. National Conference on Technological Advancements in Mechanical Engineering. 2016. pp. 303–309.
26. Faria C. et al. Review of Robotic Technology for Stereotactic Neurosurgery. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2015. vol. 8. pp. 125–137.
27. Sutyasadi P., Pamichkun M. Gait Tracking Control of Quadruped Robot Using Differential Evolution Based Structure Specified Mixed Sensitivity Robust Control. *Journal of Control Science and Engineering*. 2016. vol. 2016. pp. 1–17.
28. Kobayashi T. et al. Adaptive speed controller using swing leg motion for 3-D limitcycle-based bipedal gait. *Nonlinear Dynamics*. 2016. vol. 84. no. 4. pp. 2285–2304.
29. Garbi G.P. Multivalued Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Robot Vehicle. International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering. 2007.
30. Singh M.K., Parhi D.R., Pothal J.K. ANFIS Approach for Navigation of Mobile Robots. 2009 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing. 2009. pp. 727–731.
31. Shieh M.Y. et al. ANFIS based Controller Design for Biped Robots. 2007 IEEE Proceedings of International Conference on Mechatronics. 2007. pp. 1–6.
32. Xia K. et al. Virtual Decomposition Based Modeling for Multi-DOF Manipulator With Flexible Joint. *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 91582–91592.
33. Silawatchananai C., Pamichkun M. Haptics control of an arm exoskeleton for virtual reality using PSO-based fixed structure H1 control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. vol. 16. no. 3. pp. 1–15
34. Al Mashhadany Y., Gaeid K.S., Awsaj M.K. Intelligent Controller for 7-DOF Manipulator Based upon Virtual Reality Model. 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). 2019. pp. 687–692.
35. Budiharto W., Jazidie A., Purwanto D. Indoor Navigation using Adaptive Neuro Fuzzy Controller for Servant Robot. 2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications. 2010. vol. 1. pp. 582–586.
36. Luecke G.R. Haptic Interactions Using Virtual Manipulator Coupling with Applications to Underactuated Systems. *IEEE transactions on robotics*. 2011. vol. 27. no. 4. pp. 730–740.

37. Malafeyev O., Alferov G., Andreyeva M. Group strategy of robots in game-theoretic model of interception with incomplete information. 2015 International Conference on Mechanics-Seventh Polyakhov's Reading. 2015. pp. 1-3.
38. Muslim M.A., Rusli M., Zufaryansyah A.R., Ibrahim B.S.K.K. Development of a quadruped mobile robot and its movement system using geometric-based inverse kinematics. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2019. vol. 8. no. 4. pp. 1224–1231.
39. Lin N.I., Lee C.S. Measurement of the Robot Motor Capability of a Robot Motor System: A Fitts's-Law-Inspired Approach. *Sensors*. 2013. vol. 13(7). pp. 8412–8430.
40. Al-Mashhadany, Y.I. Modeling and Simulation of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Chopper-Fed DC Motor Drive. 2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC). 2011. pp. 110–115.
41. Lopez-Franco C. et al. Inverse kinematics of mobile manipulators based on differential evolution. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. vol. 15. no. 1. pp. 1–22.
42. Alferov G.V., Malafeyev O.A., Maltseva A.S. Game-theoretic model of inspection by anticorruption group. AIP Conference Proceedings. 2015. vol. 1648. no. 1. pp. 450009.
43. Hussien A.A. et al. DTC Controller Variable Speed Drive of Induction Motor with Signal Processing Technique. 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). 2019. pp. 681–686.
44. Ivanov G., Alferov G., Sharlay A., Efimova P. Conditions of Asymptotic Stability for Linear Homogeneous Switched System. AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1863. no. 1. pp. 080002.

Al Mashhadany Yousif Ismail — Ph.D., Associate Professor, Lecturer, Electrical Engineering Department of College of Engineering, University Of Anbar. Research interests: 7-DOF Manipulator, Human Manipulator, Intelligent Controller, Virtual Reality Model, Artificial Neural Network (ANN). The number of publications — 72. yousif_phd@hotmail.com; 11, Ramadi, Iraq; office phone: 009647824643998.

Ю.И. Аль Машхадани
**ДИЗАЙН И АНАЛИЗ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНОГО
МАНИПУЛЯТОРА С СЕМЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА
ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
КОНТРОЛЛЕРА**

Аль Машхадани Ю.И. Дизайн и анализ человекоподобного манипулятора с семью степенями свободы на основе гибридного интеллектуального контроллера.

Аннотация. Представлено взаимодействие с 3D-моделями в среде виртуальной реальности (VR), которое соотносится с движением реальной руки человека. Точность позиционирования достигается благодаря обратной связи. Ключевую роль в поиске оптимальных значений управляющих сигналов играет адаптивная нейро-нечеткая система вывода (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS), сочетающая в себе преимущества нейронных сетей (NN) и нечеткой логики (fuzzy logic, FL).

Данный подход дает точные результаты при добавлении обучающей сигнальной системы к комбинированной обучающей базе, используемой при объединении метода пропорций наклона; ошибка наименьших квадратов (LSE) подготавливает ANFIS к любому фреймворку. Контроллер на основе ANFIS был применён к робототехнической системе с семью степенями свободы, модель которого была разработана в виртуальной реальности, воспроизводящей системные конструкции через Matlab/Simulink, чтобы соединить VR-модель с инструкцией для выполнения команд гибридным интеллектуальным контроллером на основе технологии ANFIS. Данная усовершенствованная процедура при внедрении полученных результатов показывает возможность практического использования предлагаемой системы контроллера.

Ключевые слова: человекоподобный манипулятор, гибридный интеллектуальный контроллер, виртуальная реальность, искусственные нейронные сети.

Аль Машхадани Юсиф Исмаил — Ph.D., доцент, преподаватель, кафедра электротехники инженерного колледжа, Университет Анбара. Область научных интересов: манипулятор с семью степенями свободы, человеческий манипулятор, интеллектуальный контроллер, модель виртуальной реальности, искусственная нейронная сеть (ИНС). Число научных публикаций — 72. yousif_phd@hotmail.com; 11, Эр-Рамади, Ирак; р.т.: 009647824643998.

Литература

1. *Rosen E. et al.* Testing robot teleoperation using a virtual reality interface with ROS reality // Proceedings of the 1st International Workshop on Virtual, Augmented, and Mixed Reality for HRI (VAM-HRI). 2018. pp. 1–4.
2. *Prabu D., Kumar S., Prasad R.* Advanced Dynamic Path Control of the Three Links SCARA using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System // Robot Manipulators, Trends and Development. 2010. pp. 399–412.
3. *Katzschmann R.K.* Building and Controlling Fluidically Actuated SoftRobots: From Open Loop to Model-based Control // Massachusetts Institute Of Technology. 2018. pp. 247–272.
4. *Tayebihaghighi S., Piltan F., Kim J.M.* Control of an Uncertain Robot Manipulator Using an Observation-based Modified Fuzzy Sliding Mode Controller // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2018. vol. 10. no. 3. pp. 41–49.
5. *Mahmoodabadi M.J., Ziaei A.* Inverse Dynamics Based Optimal Fuzzy Controller for a Robot Manipulator via Particle Swarm Optimization // Journal of Robotics. 2019. vol. 2019. 10 p.
6. *Al-Mashhadany Y.I.* MIEEE H. E. ANFIS-Inverse-Controlled PUMA 560 Workspace Robot with Spherical Wrist // Procedia Engineering. 2012. vol. 41. pp. 700–709.

7. *Ahmed M.N., Veladri K.* Modeling and Simulation of 7-dof Robotic Manipulator // National Conference on Technological Advancements in Mechanical Engineering. 2016. pp. 303–309.
8. *Al-Mashhadany Y.I.* Modeling and Simulation of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Chopper-Fed DC Motor Drive // 2011 IEEE applied power electronic colloquium (IAPEC). 2011. pp. 110–115.
9. *Горбцов А.С. и др.* Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движения шагающих роботов // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18(1). С. 85–122.
10. *Al-Mashhadany Y.I.* A Posture of 6-DOF Manipulator By Locally Recurrent Neural Networks (LRNNs) Implement in Virtual Reality // 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA). 2010. pp. 573–578.
11. *Klimchik A., Pashkevich A.* Robotic manipulators with double encoders: accuracy improvement based on advanced stiffness modeling and intelligent control // IFAC-Papers OnLine. 2018. vol. 51. no. 11. pp. 740–745.
12. *Shahri A.R.M., Khoshravan H., Naebi A.* Design ping-pong player robot controller with ANFIS // 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation. 2011. pp. 165–169.
13. *He Y.et al.* Dynamic Modeling, Simulation, and Experimental Verification of a Wafer Handling SCARA Robot With Decoupling Servo Control // IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 47143–47153.
14. *Alferov G., Ivanov G., Efimova P., Sharlay A.* Study on the Structure of Limit Invariant Sets of Stationary Control Systems with Nonlinearity of Hysteresis Type // AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1863. no. 1. pp.080003.
15. *Ivanov G.G., Sharlay A.S.* On stability of linear homogeneous switched systems // 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP). 2015. pp. 13–15.
16. *Андреев В.П., Плетнев П.Ф.* Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой // Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 2(57). С. 134–160.
17. *Mahmoodabadi M.J., Baghini A.Y.* Design of an Optimal Fuzzy Controller of an Under-Actuated Manipulator Based on Teaching-Learning-Based Optimization // Acta mechanica et automatica. 2019. vol. 13. no. 3. pp. 166–172.
18. *Busson D., Bearee R., Olabi A.* Task-oriented rigidity optimization for 7-DOF redundant manipulators // IFAC-PapersOnLine. 2017. vol. 50. no. 1. pp. 14588–14593.
19. *Kulakov F., Kadry S., Alferov G., Sharlay A.* Bilateral Remote Control over Space Manipulators // AIP Conference Proceedings. 2018. vol. 2040. no. 1. pp. 150015.
20. *Cen L., Melkote S.N.* Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in RoboticMilling // Procedia Manufacturing. 2017. vol. 10. pp. 486–496.
21. *Архунов В.В., Наумов В.Б.* Искусственный интеллект и автономные устройства в контексте права: о разработке первого в России закона о робототехнике // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 6(55). С. 46–62.
22. *Di Vito D., Natale C., Antonelli G.* A Comparison of Damped Least Squares Algorithms for Inverse Kinematics of Robot Manipulators // IFAC-PapersOnLine. 2017. vol. 50. no. 1. pp. 6869–6874.
23. *Faria C. et al.* Position-based kinematics for 7-DoF serial manipulators with global configuration control, joint limit and singularity avoidance // Mechanism and Machine Theory. 2018. vol. 121. pp. 317–334.
24. *Kumar P.B., Verma N.K., Parhi D.R., Priyadarshi D.* Design and control of a 7 DOF redundant manipulator arm // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2019. vol. 73. pp. 1–12.
25. *Me M.N.A., Veladri K.* Modeling and Simulation of 7-dof Robotic Manipulator // National Conf. on Technological Advancements in Mechanical Engineering. 2016. pp. 303–309.
26. *Faria C. et al.* Review of Robotic Technology for Stereotactic Neurosurgery // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. 2015. vol. 8. pp. 125–137.

27. *Sutyasadi P., Parnichkun M.* Gait Tracking Control of Quadruped Robot Using Differential Evolution Based Structure Specified Mixed Sensitivity Robust Control // Journal of Control Science and Engineering. 2016. vol. 2016. pp. 1–17.
28. *Kobayashi T. et al.* Adaptive speed controller using swing leg motion for 3-D limitcycle-based bipedal gait // Nonlinear Dynamics. 2016. vol. 84. no. 4. pp. 2285–2304.
29. *Garbi G.P.* Multivalued Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Robot Vehicle // International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering. 2007.
30. *Singh M.K., Parhi D.R., Pothal J.K.* ANFIS Approach for Navigation of Mobile Robots // 2009 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing. 2009. pp. 727–731.
31. *Shieh M.Y. et al.* ANFIS based Controller Design for Biped Robots // 2007 IEEE Proceedings of International Conference on Mechatronics. 2007. pp. 1–6.
32. *Xia K. et al.* Virtual Decomposition Based Modeling for Multi-DOF Manipulator With Flexible Joint // IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 91582–91592.
33. *Slawatchananat C., Parnichkun M.* Haptics control of an arm exoskeleton for virtual reality using PSO-based fixed structure H1 control // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019. vol. 16. no. 3. pp. 1–15.
34. *Al Mashhadany Y., Gaeid K.S., Awsaj M.K.* Intelligent Controller for 7-DOF Manipulator Based upon Virtual Reality Model // 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). 2019. pp. 687–692.
35. *Budiharto W., Jazidie A., Purwanto D.* Indoor Navigation using Adaptive Neuro Fuzzy Controller for Servant Robot // 2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications. 2010. vol. 1. pp. 582–586.
36. *Luecke G.R.* Haptic Interactions Using Virtual Manipulator Coupling with Applications to Underactuated Systems // IEEE transactions on robotics. 2011. vol. 27. no. 4. pp. 730–740.
37. *Malafeyev O., Alferov G., Andreyeva M.* Group strategy of robots in game-theoretic model of interception with incomplete information // 2015 International Conference on Mechanics-Seventh Polyakhov's Reading. 2015. pp. 1-3.
38. *Muslim M.A., Rusli M., Zufaryansyah A.R., Ibrahim B.S.K.K.* Development of a quadruped mobile robot and its movement system using geometric-based inverse kinematics // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2019. vol. 8. no. 4. pp. 1224–1231.
39. *Lin N.I., Lee C.S.* Measurement of the Robot Motor Capability of a Robot Motor System: A Fitts's-Law-Inspired Approach // Sensors. 2013. vol. 13(7). pp. 8412–8430.
40. *Al-Mashhadany. Y.I.* Modeling and Simulation of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Chopper-Fed DC Motor Drive // 2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC). 2011. pp. 110–115.
41. *Lopez-Franco C. et al.* Inverse kinematics of mobile manipulators based on differential evolution // Int. Journal of Advanced Robotic Systems. 2018. vol. 15. no. 1. pp. 1–22.
42. *Alferov G.V., Malafeyev O.A., Maltseva A.S.* Game-theoretic model of inspection by anticorruption group // AIP Conference Proceedings. 2015. vol. 1648. no. 1. pp. 450009.
43. *Hussien A.A. et al.* DTC Controller Variable Speed Drive of Induction Motor with Signal Processing Technique // 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). 2019. pp. 681–686.
44. *Ivanov G., Alferov G., Sharlay A., Efimova P.* Conditions of Asymptotic Stability for Linear Homogeneous Switched System // AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1863. no. 1. pp. 080002.

И.В. СТЕПАНЯН, А.В. ХОМИЧ
**СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ РЕПЛИКАТИВНОГО
НЕЙРОПОДОБНОГО МОДУЛЯ**

Степанян И.В., Хомич А.В. Структура и функции репликативного нейроподобного модуля.

Аннотация. Описывается технология построения нейросетевой системы искусственного интеллекта на стыке декларативного программирования и машинного обучения на основе моделирования кортикальных колонок. Используя доступный материал и сравнительно простые явления, эволюционные механизмы создали сложноорганизованные разумные системы. Из этого следует вывод, что искусственный интеллект также должен основываться на простых, но масштабируемых и биоправдоподобных алгоритмах, в которых стохастическая динамика корковых нейронных модулей позволяет быстро и эффективно находить решения сложных проблем. Цель исследования – алгоритмическая формализация на уровне репликативных нейросетевых комплексов. Базовый модуль искусственного интеллекта представлен как специализация и формализация понятия «китайская комната», введенного Джоном Сёрлом. Приведены результаты экспериментов по прогнозированию бинарных последовательностей. Компьютерная симуляция показала высокую эффективность реализации предложенных алгоритмов, при этом вместо использования для каждой задачи тщательно подобранного и адаптированного отдельного метода с частично эквивалентной переформулировкой задач были применены стандартный единый подход и единые параметры алгоритма. Делается вывод, что результаты экспериментов показывают возможность эффективных прикладных решений на базе предложенной технологии. Представленная технология позволяет создать самообучающиеся и планирующие деятельности системы.

Ключевые слова: эволюционное моделирование, декларативное программирование нейронных сетей, китайская комната, репликативный нейроподобный модуль, модель колонки неокортекса.

1. Введение. Рассматривается опыт реализации машинного обучения на основе так называемых формальных искусственных нейронных сетей, – по сути, на основе нелинейной аппроксимации с использованием численных методов оптимизации. Не рассматриваются специализированные методы машинного обучения, такие как конкурентное обучение, свёрточные нейронные сети и другие, так как все эти методы направлены на определенные классы задач. По этой же причине они не в достаточной степени биоправдоподобны. Они могут быть полезны для решения определенных практических задач, но они не масштабируемы на необозримое разнообразие задач, которые решают в реальном мире живые организмы. Также не ставится цель превзойти известные специализированные методы в решении частных задач.

Цель работы – показать альтернативное направление исследований в области машинного обучения, ориентированное на решение задач адаптивного управления в естественной постановке и делающее

технологии машинного обучения более универсальной, простой и доступной широкому кругу специалистов. В частности, предпринимается попытка отойти от концепции обучения с учителем в пользу более гибкой концепции обучения с подкреплением. Дополнительно предлагается замена градиентных методов оптимизации, которые связаны с трудностями в области глубокого машинного обучения. Данная концепция позволяет сделать из нейронных сетей интеллектуальных агентов, активно управляющих потоком входных сигналов и собственным обучением. Практическая польза предложенного подхода – возможность создать технологию разработки интеллектуальных приложений. Предлагается шаблонное применение стандартной технологии с хорошо прогнозируемым полезным результатом (концепция мотивированного самообучения вместо прямого программирования).

Обратимся к эволюционно-физиологическим основам моделирования искусственного интеллекта. С одной стороны, предпринимается попытка придерживаться биоподобия по критерию реализуемости биовычислений, а с другой стороны – учитываются математические основы проблемы вычислимости. В итоге появилась концепция, которую можно представить как сеть «китайских комнат» с известным алфавитом языка общения и с системой обратной связи, но неизвестными инструкциями. Утерянные инструкции методом проб и ошибок должен восстановить ученик, запертый внутри комнаты и испытывающий потребность в поставках определенного вида информации. Исследование имеет концептуальный характер и условно использует терминологию из нейробиологии. Например, термин «нейромедиатор» упрощен до символа в некотором алфавите (данный термин понадобился, чтобы показать, что нейроны могут обмениваться разнотипными сигналами, числовое представление которых является частным техническим решением). Однако в данной статье не используется устоявшаяся терминология искусственных нейронных сетей, такая как адаптивный сумматор, функция активации, слой формальных нейронов и другое, так как представленная концепция далека от подобных типовых решений.

Не углубляясь в вопросы эффективной алгоритмической технической реализации, показывается суть концепции, которая заключается в объединении нейронов в сеть репликативных модулей, обладающих относительно простой структурой и собственной памятью и локально обучающихся методом подкрепления. Обучение проходит без явной глобальной координации с другими репликативными модулями. Координация взаимодействия для появления эффекта от объединения репликативных модулей в сеть должна выстраиваться в процессе самоорганизации.

Предлагаемый репликативный модуль функционально эквивалентен машине Тьюринга, и поэтому формально обладает вычислительной полнотой. В дополнение к формализму машины Тьюринга предлагается метод машинного обучения, позволяющий итеративно настроить репликативный модуль для решения различных задач.

2. Обзор работ по самоорганизующимся нейросетевым алгоритмам и алгоритмическому моделированию комплексов колонок неокортекса. Неокортекс – область коры, расположенная в верхнем слое головного мозга и отвечающая за высшие когнитивные функции – осознанное мышление, сенсорное восприятие и речь. Каждая колонка кортекса представляет собой группу нейронных клеток, расположенных перпендикулярно поверхности коры. Из литературы известны различные модели неокортекса для исследования динамики и когнитивных свойств соответствующих нейросетевых моделей. Соответствие между структурной и функциональной связностью в кортикальных системах формирует проблему понимания общего функционирования мозга и построения моделей сознания. При этом собственная стохастическая динамика общих корковых нейронных комплексов позволяет им экстренно мобилизовать приближенные решения сложных проблем, где хранимые знания и текущие данные совместно ограничивают поиск возможных решений. Принципы модульной самоорганизации в структурно-функциональном отношении с учетом медиаторики и интервзаимодействий исследованы в [1], где предложена концепция глобальности связей в коре мозжечка и приведено математическое описание (вопросы фазовой синхронизации нейронных сетей с изменяющимися во времени задержками рассмотрены в [2]). В [3] описаны результаты изучения хаотических свойств функционирования нейрона с учетом его автофрактального субсетевоего строения.

Мозг обрабатывает информацию через коллективную динамику больших нейронных сетей, при этом интеллект как эволюционно полезное приспособление повышает вероятность выживания. В связи с этим в нейроинформатике используются эволюционно-генетические алгоритмы и коллективы нейронных сетей. В [4] предложен метод организации искусственных нейронных сетей (ИНС) с учителем в виде набора раздельно обучаемых подсетей (блоков), взаимодействующих только при вычислении выходных сигналов ИНС. В [5] предложен алгоритм самообучения дифференциальной эволюции и оператор мутации для оптимизации архитектуры и параметров прямой нейросети; делается вывод, что предложенный подход может быть статистически сильным в решении универсальных задач. В [6] обучали глубокие нейронные сети имитации поведения пирамидальных нейро-

нов (в кортикальных структурах млекопитающих они представляют наиболее многочисленную популяцию возбудительных нейронов), получая пространственно-временные модели активации. В [7] исходили из модели коллективного хаоса в основе сложной динамики, наблюдаемой в сетях коры головного мозга, и вычислили спектр Ляпунова при всевозможных начальных условиях функционирования нейронных сетей для исследования динамики и геометрии соответствующих хаотических аттракторов.

В [8] проведено имитационное моделирование корковой обработки визуальных образов во время решения задач рабочей памяти и предложена архитектура, которая лежит в основе нейронных механизмов, опосредующих конкретные задачи памяти. В [9] представлено усовершенствованное измерение сложности на основе аттрактора для булевых рекуррентных нейронных сетей, которое представляет оценку их вычислительной мощности с точки зрения значимости динамики аттрактора. Следует отметить, что нейронная сеть с обратным распространением может решать сложные задачи нелинейного отображения, однако с увеличением размера выборки время, необходимое для обучения нейронных сетей, увеличивается, а точность классификации уменьшается. Чтобы повысить точность классификации и эффективность времени выполнения алгоритма нейронной сети, в [10] предложили метод параллельного проектирования и реализации для нейронной сети обратного распространения.

Экспериментальные данные нейробиологии предполагают, что значительный объем знаний хранится в мозге в виде распределений вероятностей по сетевым состояниям и траекториям сетевых состояний. В [11] приведена теоретическая основа для этой гипотезы, показывая, что даже очень подробные модели корковых нейронных комплексов с разнообразными нелинейными нейронами и синапсами имеют стационарное распределение состояний сети и траекторий состояний сети, к которым они экспоненциально сходятся при любых начальных условиях. В [12] исследовали процессы изучения языка в модели коры мозга. Сеть состояла из нейроноподобных элементов и имитировала нейроанатомические области в коре. В [13] исследовали использование искусственных нейронных сетей для моделирования взаимосвязи между скоростями запуска одиночных нейронов проприоцептивной области соматосенсорной коры и несколькими типами кинематических переменных, связанных с движением руки. В [14, 15] сравнивали вычислительную эффективность моделей спайковых нейронов Ижикевича и их применимость к крупномасштабным симуляциям кортикальных нейронных сетей для использования в нейроинженерных исследованиях.

В [16] исследовали механизмы модификации рецептивных полей отдельных нейронов в результате синаптической передачи внутри кортикальной сети. Для этого использовали акустический сигнал, который был подан на вход в модель улитки и слуховой периферии. В [17] приведена интересная попытка объяснить функцию коры головного мозга как массива маленьких компьютеров, каждый из которых применяет определенный алгоритм обучения для прогнозирования входов от органов чувств или других частей мозга. При этом на первый план выдвигается роль мозга для обучения законам изменения закономерностей входящих последовательностей. В [18] дана формальная математическая модель разреженных представлений активных дендритов неокортекса. Эти исследования позволяют предположить, что основная единица памяти паттерна в неокортексе инстанцирована небольшими кластерами синапсов, оперируемыми локализованными нелинейными дендритными процессами. Экспериментальное исследование в соматосенсорной коре крыс с фотостимуляцией, приведенное в [19], показывает, что большее количество горизонтальных связей неокортекса способствует развитию устойчивых асинхронных состояний текущей активности и уменьшает шумовые корреляции в стимулированной активности.

Идея поиска паттернов во входящих данных не нова, различные подходы описаны в [20-25]. В то же время большой научный интерес представляют идеи Дж. Хокинса по иерархической темпоральной памяти и кортикальным алгоритмам обучения (иерархическая временная память (hierarchical temporal memory, НТМ)). НТМ – коммерческая разработка, в открытом доступе подробное описание алгоритмов отсутствует. Из доступных материалов понятно, что есть некоторая родственная связь с предлагаемым подходом в плане формирования паттернов в режиме обучения без учителя. Но эти идеи не новы и встречаются уже в ART-модели (адаптивно резонансная теория) [26] и в сетях встречного распространения [27]. Предлагаемый вариант принципиально расходится с НТМ, поскольку в данном подходе отсутствует требование иерархичности структур (в этом же состоит радикальное отличие от свёрточных сетей).

Считается, что при моделировании нейронных систем на уровне бионейрона за деталями функционирования элементарных клеток могут теряться базовые принципы обучения, поэтому моделирование на уровне более крупных модулей может дать больше результатов. И здесь возникает аналогия с колонками неокортекса. Что если «забыть», что колонки неокортекса сделаны из клеток, и попробовать смодели-

ровать их функциональное назначение (как сеть формальных нейронов, как машину Тьюринга, как нормальный алгоритм Маркова и др.)

3. Методология эволюционного моделирования интеллекта.

Рассмотрим модель эволюции интеллекта на различных этапах.

Этап 1. Нейронная сеть отсутствует в организме. Клетки эффекторы действуют самостоятельно и прямо в ответ на воздействие. Появляются специализированные клетки-детекторы/индикаторы внутреннего состояния, которые:

- могут по синапсам напрямую передавать сигналы на клетки эффекторы;
- активируются при наступлении определенного состояния (выход за безопасный диапазон параметров).

Сигналы при этом генерируются хаотически. При возникновении опасного состояния организм начинает хаотическое движение, пока его состояние не придет в норму (алгоритм случайного поиска).

Этап 2. С развитием возникает проблема затухания сигнала, идущего от клетки-детектора к клеткам-эффекторам. Проблема решается появлением вставочных нейронов – усилителей сигнала. На данном этапе они лишены адаптации. Единственная «интеллектуальность» поведения в том, что они могут только усиливать сигнал выше некоторого порогового уровня, фильтруя таким образом шум.

Этап 3. Поведение вставочных нейронов усложняются. Они могут жестко программироваться в процессе развертывания организма по заданной генетической программе и с помощью инициируемых процессов. Возникают нейросетевые комплексы, реализующие безусловные рефлексы (неизменная последовательность действий, стартовая при наступлении некоторых условий). Появляются нейроны-сенсоры, чей сигнал нейтрален и не указывает прямо на опасность или эволюционную полезность. Сенсоры необходимы для активации программ инстинктов при определенных условиях.

Этап 4. Некоторые типовые нейросетевые комплексы, аналоги колонок неокортекса, начинают реализовывать функцию специализированного микрокомпьютера со своей перезаписываемой памятью и хранящимся в ней изменяемым алгоритмом функционирования. В отличие от неизменных программ инстинктов функция такого модуля меняется в зависимости от истории прошлого функционирования и изменений состояния организма во времени.

На всех этапах нет глобального архитектора системы, строящей ее по рациональным правилам. Поэтому будем придерживаться эмпирического правила: должна просматриваться возможность естественно-эволюционного получения результата, аналогичного требуемому.

4. Материалы и методы: репликативный нейронный модуль, ассоциативная память, синапс, эффектор, обучение. Для взаимодействия с внешним миром нейронная сеть связана с нейронами-сенсорами, эффекторами и индикаторами. Связи осуществляются синапсами. Но есть ограничения на направление связей: разрешена передача сигнала только от индикатора к нейрону. Эффектор принимает сигналы от нейромодулей, но обратного направления сигналов нет. Сенсор также не принимает сигналов от нейронов, но только передает их нейромодулям.

Гипотезы:

1. Нейросеть эффективней анализировать на уровне нейронных комплексов (нейромодулей), а не отдельных нейронов. В этом случае появляется возможность наделять нейромодули функциональностью специализированных миникомпьютеров, не нарушая при этом биологической правдоподобности.

2. Каждый нейромодуль по отдельности обладает слабыми возможностями к адаптации, но способность к адаптации группы нейромодулей экспоненциально зависит от ее размера.

3. Нерегулярность синаптических связей есть необходимое свойство для возможности специализации нейромодулей и всей сети. Это позволяет нейромодулю оставаться относительно простым, не реализуя глобальную оптимизацию, а специализируясь под свою частную функцию, которая определяется структурой своих связей (локальная оптимизация).

Репликативный нейромодуль – это типовой вычислительный узел (рис. 1), одинаковый по своим возможностям (функциональному полю, множеству потенциально реализуемых функций) для всей нейронной сети. На рисунке 1 на входе отображены нейромедиаторы, внутри идет классификация (левый и правый столбцы). Null – признак отсутствия медиатора. Базовый модуль сети хранит и модифицирует два списка правил. Каждое правило с точки зрения целей всей сети интерпретируется как прогноз положительного (Good) или отрицательного (Evil) исхода в ответ на определенное действие модуля при определенном состоянии входов модуля (наблюдаемых переменных). Правило на рисунке 1 записано в формате вход модуля → выход модуля. Прогноз результата применения правила определяется списком, в котором сохранено правило. Все вычислительные узлы соединены синапсами и образуют нейронную сеть (рис. 2). Базовые обучаемые модули моделируют функционал, реализуемый колонками в неокортексе. На рисунке 2 демонстрируется вариант взаимного расположения модулей относительно друг друга и сенсоров (черные точки – базовые обучаемые модули, S – сенсоры, e – эффекторы). Нейромодули управляют производством нейромедиаторов и сами управляются нейромедиаторами.

Задача модуля – адаптивная корректировка правил, позволяющих управлять работой нейронной сети в условиях неполных данных. Хотя модуль осуществляет локальное управление без знания всей системы и всей истории сигналов, взаимодействие сети модулей должно решать глобальные задачи сети. С точки зрения вычислительной полноты представленная сеть эквивалентна клеточному автомату.

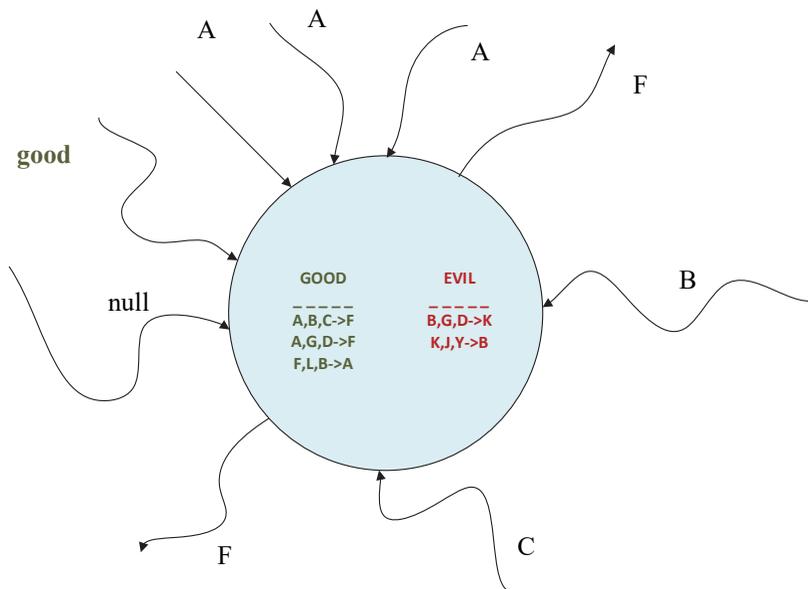


Рис. 1. Иллюстрация работы репликативного модуля

В формальной нейросети нейроны обмениваются числами. В предлагаемом подходе идет обмен нейромедиаторами. Качественный состав нейромедиаторов зависит от заданного алфавита. Само по себе это отличие от формальной нейросети не принципиально, ведь тип нейромедиатора можно кодировать числовым вектором, и наоборот. Формально оба варианта имеют равную вычислительную мощность, однако предлагаемый вариант позволяет явно задать определенный алгоритм обучения нейромодулей, основанный на списке шаблонов функционирования (наподобие программ для машины Тьюринга или инструкций для «китайской комнаты»).

Предлагаются следующие функции и свойства репликативного нейромодуля:

- Соседние нейромодули могут быть соединены синапсами. Нейромодуль вырабатывает нейромедиатор, который может быть пе-

редан далее по синапсам. В каждый момент времени нейромодуль может вырабатывать нейромедиатор только определенного типа. Также нейромодуль может быть неактивным и ничего не производить.

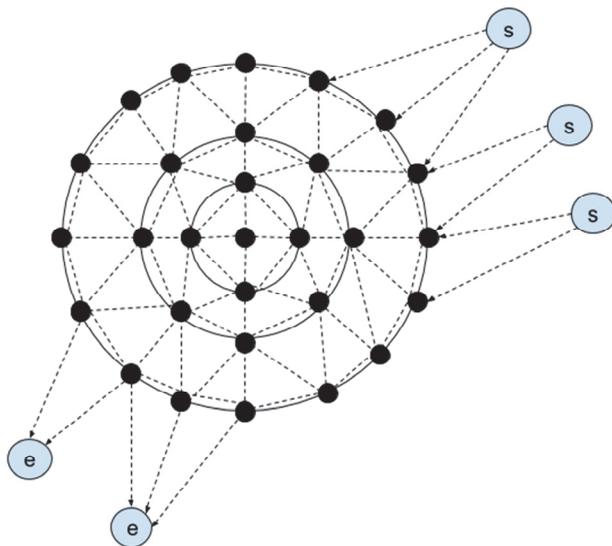


Рис. 2. Схематическое отображение сети, построенной на репликах модуля

Возможные типы нейромедиаторов ограничены списком (алфавитом), формируемым в ходе эволюции организма. Отсутствие нейромедиатора кодируют словом «Null». Предлагается три специальных типа нейромедиатора: Good – нейромедиатор позитивного сигнала (удовольствие); Evil – нейромедиатор негативного сигнала (ущерб); Inhibitor – нейромедиатор, подавляющий производство всех нейромедиаторов. Нейромедиаторы Evil и Good производят только клетки-индикаторы состояния организма (иначе есть риск, что нейроны начнут стимулировать синапсы безусловно производить только один нейромедиатор Good, что не является эволюционно полезным свойством). Клетки-индикаторы распределены равномерно среди клеток нейронов. При компьютерной симуляции не требуется реализовывать индикатор состояния организма как множество отдельных клеток. Достаточно одной клетки, соединенной со всеми нейромодулями. Другие нейромедиаторы могут производиться нейромодулями и клетками-сенсорами.

– Первичным входом репликативного нейромодуля является качественный и количественный состав поступивших по входным синапсам

нейромедиаторов. На первом этапе работы репликативного нейромодуля оригинальный паттерн, точно отражающий тип и количество медиатора в каждом входном синапсе, значительно сокращается до жестко фиксированного паттерна небольшого размера, который отражает только качественную карту медиаторов. Это необходимо, чтобы была возможность обучить репликативный нейромодуль за приемлемое время.

– Репликативный нейромодуль обладает программой производства нейромедиаторов в виде списка шаблонов: качественный состав нейромедиаторов на входе → производимый нейромедиатор. Шаблоны поведения оцениваются по количеству поступающего на вход нейромедиатора Good и Evil. В процессе обучения нейромодуля решается задача подбора шаблонов, максимизирующую показатель Rating:

Rating = количество Good на входе – количество Evil на входе.

– Количество хранимых шаблонов ограничено размером памяти нейромодуля. В случае необходимости запомнить новый шаблон и нехватке на это памяти нейромодуль забывает наименее используемый шаблон. При небольшом алфавите медиаторов и размере входного паттерна появляется возможность хранить в памяти нейромодуля все возможные правила поведения.

5. Группа методов обучения, построенных на принципе обобщения «китайской комнаты». В оригинальной модели «китайской комнаты» [28] инструкции уже даны в готовом виде. В данной модификации изначально у обитателя комнаты нет инструкций. Он должен начать со случайной версии инструкции и затем скорректировать ее, анализируя свои действия и обратную связь, причем может делать это разными способами. Второе отличие от оригинала – обитатель комнаты за свои действия получает обратную связь. Иногда он получает поощрение, иногда наказание, иногда ничего не получает.

У комнаты есть конечное множество входов, из которых можно брать медиаторы, и один выход, в который также помещается некоторый медиатор из ограниченного списка допустимых медиаторов. Обратную связь обитатель комнаты получает с неизвестной и непостоянной задержкой. На обратную связь также воздействуют неконтролируемые факторы, меняющиеся со временем. Из-за этого на одни и те же действия в разное время можно получить как положительную, так и отрицательную обратную связь. На конкретную обратную связь в момент времени T может накладываться результат нескольких предыдущих действий и случайные факторы.

У нейромодуля есть два типа памяти: предпамять (Pre-Memory) и основная память (Memory). В основной памяти хранятся рабочие шаб-

лоны поведения, в предпамяти хранится история поведения и его результаты. Будем называть информационным медиатором все медиаторы, кроме Inhibitor, Good и Evil. Медиаторы Good и Evil необходимы для оценки эффективности поведения. Inhibitor – это командный медиатор.

Предпамять хранит информацию об истории функционирования нейромодуля. В ней хранится не более N последних действий нейромодуля (приказ вырабатывать определенный медиатор) в ответ на определенный качественный состав входных медиаторов. Здесь N – емкость предпамяти. Запись в предпамять выполняется только в присутствии медиаторов Good или Evil. При нейтральной ситуации запись в предпамять не ведется. История действий нейромодуля в предпамяти сопровождается историей состояния индикаторов. Структура записи предпамяти:

$$\langle \text{Input, Output, Rating} \rangle,$$

где Input отражает структурный и качественный состав информационных медиаторов на входе нейромодуля, каждый элемент Input отражает тип медиатора на определенном входе; Output – произведенный медиатор в ответ на вход; Rating вычисляется в момент начала производства Output. При вычислении Rating никакие задержки влияния и кросс-влияния не учитываются.

Записи в предпамять добавляются только при ненулевом количестве медиатора Good или Evil на входе нейромодуля. В отсутствии сигналов от индикаторов предпамять не заполняется. Когда количество записей в предпамяти достигает максимального возможного значения (предпамять полностью заполнена) выполняется очередной цикл обучения нейромодуля. После чего предпамять полностью очищается.

6. Память шаблонов поведения. В памяти нейромодуля хранятся шаблоны поведения – варианты производства медиаторов в выходных синапсах – в ответ на конкретный качественный состав информационных медиаторов на входе нейромодуля. Каждый вариант продукции сопровождается оценкой Rating. Вариант с максимальным значением Rating выбирается в качестве текущего рабочего варианта продукции. Структура записи памяти (шаблон поведения):

$$\langle \text{Input, Output} \rangle; \text{Output} = \{ \langle M_1, R_1 \rangle, \langle M_2, R_2 \rangle, \dots, \langle M_n, R_n \rangle \},$$

где Input – необходимый состав информационных медиаторов на входе нейромодуля для активации правила; Output – список пар <медиатор кандидат для продукции, рейтинг (приоритет) производства медиато-

$ra >$; M_i – i -й вариант медиатора продукции; R_i – рейтинг i -го варианта медиатора продукции.

Обучающие примеры накапливаются либо в ходе пассивного наблюдения, либо в ходе активного планирования экспериментов. Классическое машинное обучение предполагает, что набор обучающих примеров подготовлен заранее. Сама обучаемая машина не влияет на план экспериментов. В отличие от классического машинного обучения, пассивно принимающие обучающие примеры, репликативный нейромодуль одновременно обучается и проводит активный эксперимент.

Input является уникальным ключом шаблона поведения в памяти. В памяти может быть не более одной записи с заданным Input. Для активации шаблона поведения текущий состав входных информационных медиаторов должен точно совпадать с Input. Новый шаблон поведения в памяти возникает, когда для текущего состава медиаторов на входе нейромодуля не находится подходящий шаблон поведения. В этом случае такой шаблон создается со случайными значениями рейтингов в Output. Если доступной памяти недостаточно для сохранения нового шаблона, то из памяти удаляется наиболее редко используемый шаблон поведения.

7. Алгоритм обучения. Репликативный нейромодуль обучается когда предпамять полностью заполнена. После обучения предпамять полностью очищается и начинает наполняться снова. Итак, предпамять полностью заполнилась и настало время корректировать рейтинги в шаблонах поведения:

1. По всем записям в предпамяти рассчитываем средний рейтинг. Обозначим его как AvgRating.

2. $I := 0$.

3. Для I -й записи предпамяти Pre-Memory[I] находим в памяти шаблон поведения Pattern, для которого Pre-Memory[I].Input = Pattern.Input. Если такого нет, то переход на шаг 6.

4. В шаблоне Pattern находим позицию K , такую что Pattern.Output[K].M = Pre-Memory[I].Output.

5. Pattern.Output[K].R := Pattern.Output[K].R * (1 - F) + AvgRating * F. Где $0 < F < 1$ задает скорость обучения.

6. $I := I + 1$.

7. Если I равно количеству записей в предпамяти, то очищаем предпамять и СТОП.

8. Переход на шаг 3.

8. Эффектор. Логика обработки эффектором входящих медиаторов может быть различной. Один из простых вариантов следующий. Эффектор имеет только два состояния – активное или пассивное. Эффекто-

ру назначается его активирующий медиатор. Если среди входных медиаторов активирующий медиатор представлен наибольшим количеством, то эффе́ктор активизируется, иначе эффе́ктор остается пассивным.

9. Нейросетевая структура. Нейросеть не имеет регулярной структуры. Изначально синапсы и клетки-детекторы/индикаторы состояния организма приблизительно равномерно заполняют некоторый объем, отведенный под нейронную сеть. Например, сенсоры (s) и эффе́кторы (e) располагаются согласно анатомии моделируемого организма или архитектуре робототехнического комплекса.

Репликативные нейромодули и отдельные нейроны связываются с соседними нейронами. Оптимизации структуры связей не выполняется. Требования, чтобы два соседних нейромодуля были обязательно связаны, не предъявляется (регулярность связей не обязательна). Определение «соседнего» нейромодуля жестко не задается. Важно, чтобы не было структуры связи, близкой к типу «каждый-с-каждым». Это необходимо для поддержания разнообразия функций нейромодулей.

10. Выявленные проблемы и пути их решения. Выявленная в ходе тестирования проблема – затухание влияния изменения сигнала. Проблема остается в силе и для многослойного персептрона (MLP), обучаемого градиентными алгоритмами [10]. Нейрон может одинаково реагировать на различные входные сигналы. Таким образом, чем больше промежуточных нейронов, тем ниже вероятность того, что изменение выходного сигнала сенсора или первых нейронов повлияет на итоговый входной сигнал эффе́ктора (рис. 3).

Возможны следующие решения:

1. Увеличение количества альтернативных путей прохождения с преобразованием сигнала от сенсора к эффе́ктору.
2. Сокращение длины путей, то есть сокращение количества промежуточных преобразователей сигнала.
3. Дублирование сигналов от сенсоров через простые ретранслирующие узлы и повышение доли прямых связей нейронов с эффе́кторами.

Таким образом, количество промежуточных нейронов должно быть сбалансировано с количеством сенсоров и эффе́кторов. В данной модели видно, что интеллектуальные возможности зависят не только от количества промежуточных нейронов, но и от количества сенсоров и эффе́кторов. На рисунке 3 иллюстрируется проблема, что если нейроны выстроены в длинную цепочку, то вероятность того, что изменения на входе цепочки приведут к изменениям на ее выходе, снижается по мере удлинения цепочки.

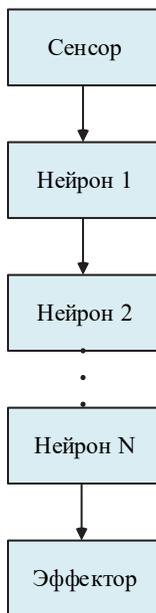


Рис. 3. Цепочка обработки сигнала от сенсора до эффектора

Базовые обучаемые модули моделируют функционал, реализуемый колонками в неокортексе. Обучаются именно «колонки», отдельные же нейроны, из которых состоят «колонки», реализуют неизменяемый алгоритм работы «колонки» и ее память.

Рациональная пространственная структура нейросети – это относительно тонкая плоскость или поверхность сферы, в которой распределены сенсоры, эффекторы и нейроны. Их равномерное распределение предлагается использовать как базовый вариант, когда нет оснований для выбора иного распределения.

11. Введение эффекта рефрактерности. Идея заключается в том, чтобы подавлять сигналы нейромодулей с константным (не меняющимся) выходом. Даже если обеспечить достаточное множество альтернативных путей обработки сигнала, все равно большое количество неизменных фоновых сигналов из нейромодулей заглушит полезный сигнал. Но неизменность выхода вне зависимости от входа противоречит назначению нейросистемы, которая должна обеспечивать на каждый вариант входов индивидуальную и полезную реакцию. Проблема не в том, что поведение становится далеким от оптимального, самая большая проблема заключается в остановке обучения нейросистемы.

Введем дендриты. Дендрит – часть репликативного нейромодуля, выполняющая предварительную и жестко запрограммированную обработку входных сигналов. Количество дендритов фиксировано в количестве от 1 до 3, а вот количество синапсов, входящих в дендрит, может достигать на порядок больших значений. Области входов дендритов одного нейромодуля не должны полностью совпадать. В идеале они не должны даже пересекаться. Дендрит из всех входящих медиаторов выбирает представленный наибольшим количеством (принцип, известный в машинном обучении как «победитель забирает все» [29-30]) и передает его в центральную часть нейромодуля, который содержит предпамять и адаптивные правила функционирования. Нейромодуль сверяет паттерн, сформированный дендритами, со списком правил функционирования и формирует на выходе соответствующий нейромедиатор в количестве $Out[1]$ (рис. 4).

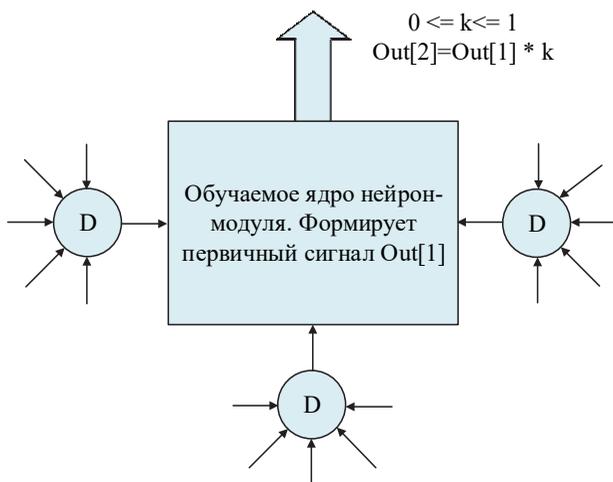


Рис. 4. Репликативный нейромодуль с обучаемым ядром, содержащим предпамять и память шаблонов поведения. На периферии необучаемые дендриты, выполняющие предобработку входных сигналов по фиксированному алгоритму. Количество медиатора на выходе ядра изменяется в зависимости от значения коэффициента усиления

12. Введение коэффициента усиления выходного сигнала.

Его значение меняется от 0 до 1. При 0 выходной сигнал полностью подавляется, а при 1 количество выходного медиатора остается стандартным ($Out[2]=Out[1]*k$). Коэффициент уменьшается при каждом случае повторения выходного медиатора, и наоборот, увеличивается при каждом случае изменения типа выходного медиатора.

Таким образом, нейросистема дополнительно разряжается, усиливая только нейроцепочки с функциональным разнообразием. Остальные части нейросистемы временно подавляются, пока они в ходе обучения не придут к функционально разнообразному и полезно-му состоянию. Нейросистема по количеству нейромоделей становится с чисто вычислительной точки зрения избыточной, но зато обучаемой (аналогично в «естественных» нейросетях в полезном функционировании задействован лишь небольшой процент нейронов).

13. Эксперименты. Прогнозирование двоичной последовательности. В данной задаче возможно несколько способов подачи известной части ряда в нейронную сеть: последовательно (динамическая последовательность) или в виде графика (образ). Для тестов был выбран второй вариант. Двоичная последовательность формируется по конечному шаблону. Фиксируется четкий размер шаблона. Каждому биту шаблона случайно назначается 0 и 1, но так, чтобы количество нулей и единиц в шаблоне было одинаково. Это необходимо для максимизации количества информации (по Шеннону) в шаблоне. Двоичная последовательность составляется из повторяющихся блоков шаблона. Например, если шаблон = 01110010, то двоичная последовательность будет следующей 01110010-01110010-□.

Нейронная сеть должна была прогнозировать следующий бит бинарной последовательности по известным значениям ограниченного числа предыдущих бит. Минимальный используемый алфавит медиаторов: Null, Good, Evil, Inhibitor, A, B, C, D. Для построения бинарной последовательности в выполненном тесте использовались шаблоны из 10, 20, 50 и 100 бит. Нейронной сети было, соответственно, доступно 20, 40, 100, 200 значений последних бит последовательности. Каждый бит известной предыстории последовательности был представлен отдельным сенсором. Каждый сенсор кодировал 0 медиатором A, а 1 медиатором B. Изучалось влияние на точность прогнозов после обучения следующих параметров:

- размер шаблона бинарной последовательности;
- размер известной истории бинарной последовательности;
- количество итераций обмена медиаторами между нейронами;
- размер алфавита медиаторов;
- уровень связности нейронов;
- ограничение на количество типов входных медиаторов, определяющих продукцию нейрона.

Ограничение локальности связей нейросети реализовывалось через ограничение числа соседних нейронов. Сами «соседи» подбирались случайно, без использования метрик расстояния. После установки

состояния сенсоров нейроны несколько раз обменивались медиаторами, от 3 до 10 итераций.

Единственный эффектор считывал производимый медиатор всех нейронов нейросети. Медиатор С интерпретировался как -1, медиатор D как +1, остальные как 0. Положительная сумма интерпретировалась как прогноз 1, отрицательная как прогноз 0, нулевая как неопределенный прогноз. В случае совпадения прогноза и факта, индикаторы выделяли медиатор Good. В ином случае, в том числе при неопределенном прогнозе, индикатор выделял медиатор Evil.

Сеть инициировалась один раз перед началом работы. Далее прямо менялись только состояния сенсоров. Нейросеть функционировала и одновременно обучалась на фиксированном количестве примеров. При любых вариантах настройки количество примеров оставалось неизменным.

Второй эксперимент – распознавание 2D-образов из базы MNIST. База данных MNIST (сокращение от «Modified National Institute of Standards and Technology») – объемная база данных образов рукописного написания цифр. База данных является стандартом, предложенным Национальным институтом стандартов и технологий США с целью калибровки и сопоставления методов распознавания изображений с помощью машинного обучения. Данные состоят из заранее подготовленных примеров полутоновых изображений размером 28x28 пикселей. База данных MNIST содержит 60000 изображений для обучения и 10000 изображений для тестирования [31].

14. Результаты и обсуждение. Первоначально тестировался вариант нейросети без использования адаптивного коэффициента усиления выхода нейромодуля (без дендритов). Из-за этого и благодаря этому на практике был обнаружен эффект затухания влияния изменения сигнала.

При указанных ограничениях в случае простейших шаблонов в 2 или 4 бита нейросеть училась прогнозировать с точностью 100%. При более сложных шаблонах в 10 и 20 бит нейросеть обучалась прогнозировать бинарную последовательность с точностью от 60% до 90%. При шаблоне в 50 бит точность прогнозирования достигала 60%-70%. При шаблоне в 100 бит точность прогнозирования достигала 60%-68%. При недостаточном количестве нейромодулей или истории бинарной последовательности (сенсоров) нейросеть не показывала значительного прогресса в обучении. Таким образом, увеличение размера шаблона снижало достижимую в ходе обучения точность прогнозирования. Напомним, количество итераций обучения было фиксировано и не зависело от сложности задачи.

Для фиксированного размера шаблона существует оптимальное количество сенсоров и нейромоделей в сети, при котором точность прогнозирования после обучения максимальна. Отклонение от этих значений в любую сторону ведет к снижению точности прогнозирования (растет размер шаблона – растет и оптимальный размер нейросети). При этом важно соблюдение баланса между количеством сенсоров, эффекторов, отзывчивостью среды и количеством анализирующих нейронов.

Снятие ограничений на локальность связей и количество типов медиаторов на входе нейрона приводило к отсутствию прогресса обучения. Таким образом, поддержание разнообразия функциональности критично для обучаемости нейросети.

Увеличение алфавита медиаторов приводило к снижению достигаемой точности прогнозирования. Максимальный эффект был достигнут при кодировании состояния сенсоров двумя медиаторами и кодировании продукции нейромоделей двумя медиаторами. Медиаторы были разделены на производимые сенсорами и производимые нейромоделями.

Вариант нейросети с дендритами при приблизительно тех же затратах вычислительных ресурсов показывал лучшие результаты (результаты модельных экспериментов приведены в таблице 1).

Для второго эксперимента по распознаванию 2D-образов из базы MNIST изображения подвергались предварительному кодированию. Вариации полутонов сводились к 10 уровням, делящим совокупность пикселей изображения на равные части (децили).

Задача связана с распознаванием 2D-образов, поэтому мы ввели привязку нейронов к 3D-координатам и ввели ограничения на локальность связей с расчетом расстояния между нейронами по Евклидовой метрике (L2-норма). Нейроны условно размещались в 3D-кубе $28 \times 28 \times N$, где N варьировалось от 5 до 30. Нейроны располагались послойно, но медиаторы могли распространяться в любом направлении. Слой в данном случае определял набор правил функционирования нейронов. В каждом слое правила функционирования нейронов после цикла обучения приводились к единому набору. Данное ограничение сближало нашу архитектуру с архитектурой свёрточных сетей, в которых одно ядро свертки применяется к различным участкам изображений. В нашем случае вместо ядра свертки к различным участкам соседних слоев сети применялся общий набор правил функционирования.

Таблица 1. Результаты обучения нейросетей прогнозированию бинарной последовательности с фиксированным количеством итераций обучения

Длина бинарной последовательности	Средняя точность прогнозирования после обучения на 1000 случайно сгенерированных примерах (%)	
	Без дендритов	С дендритами
$2 * 10^3$	100	100
$4 * 10^3$	100	100
$10 * 10^3$	87,3	98,3
$20 * 10^3$	75,7	95,2
$50 * 10^3$	65,1	92,7
$100 * 10^3$	64,6	88,3
$150 * 10^3$	61,5	84,1
$200 * 10^3$	57,1	82,6

В отличие от Conv-сетей или MLP-сетей, ограничений по направлению распространения сигналов нет. Сигналы/медиаторы от одного слоя могут передаваться в любой из двух соседних слоев: входные данные сначала поступают в первый слой, затем во второй, из второго слоя сигналы идут в третий и обратно в первый. Из третьего слоя в четвертый и второй и так далее. Это можно изобразить в виде кубической решетки, в узлах которой находятся нейроны.

На каждом уровне решетки все нейроны работают по одному правилу. Нейроны из разных слоев работают по разным правилам.

Слои использовались нами для обработки изображений. Различные участки изображения обрабатываются единообразно. Два соседних пикселя изображения – это не просто две переменные, они имеют связь и пространственную привязку.

Примеры изображений предъявлялись сети однократно. Таким образом моделировалось адаптивное онлайн-обучение.

Достигнутая точность распознавания сопоставима с результатами применения линейного классификатора [32]. Но следует учесть, что результат достигнут за один проход по базе и без дорогостоящего вычисления градиента функции потерь. Результаты эксперимента по распознаванию рукописных цифр из базы MNIST приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты обучения нейросети распознаванию рукописных цифр из базы MNIST

Количество слоев	Точность прогнозирования после однократного предъявления сети каждого изображения из набора для обучения
5	57%
10	59%
15	73%
20	86%
25	88%
30	93%

Отметим, что демонстрация решения задач служит не для того, чтобы показать, что метод превосходит по результатам другие методы. Цель – продемонстрировать принципиальную жизнеспособность метода на простой задаче. Несомненно, требуются дополнительные исследования и проверка на других задачах, что будет показано в следующих работах.

15. Заключение. В последние годы машинное обучение бурно развивается и активно внедряется в практику. Однако преимущественно развивается совершенствование решения задач, относящихся к классу «обучение с учителем» – построение классификаторов по примерам, регрессия, распознавание образов по 2D-изображениям. Решение этих задач в большей степени достигло технологического совершенства.

Однако при решении задач адаптивного управления, в частности встающих перед интеллектуальными агентами в мультиагентных системах, использование классических методов машинного обучения все еще нестандартизировано в выборе архитектуры решений. Задачи адаптивного управления приходится переформулировать в терминах задач обучения с учителем, иногда с потерей качества решения исходной задачи.

Известно, что современные методы машинного обучения, по видимому, имеют мало общего с процессами обучения и управления в биологических организмах. Если понятия «формальный нейрон» и «синапс» еще могут ассоциироваться с естественными нейронными

системами, то метод обратного распространения ошибки не встречает аналогов в естественных системах.

Предпринята попытка обрисовать контуры новой нейросетевой технологии, которая сохраняет относительную простоту типовых вычислительных узлов нейронов, но не требует для обучения расчета и накопления градиента некоторой функции ошибки. Отказавшись от обучения с учителем, выбрали более биоправдоподобное обучение с подкреплением. При разработке технологии за отправную точку был взят мысленный эксперимент «китайская комната».

Эксперименты по компьютерной симуляции показали возможность реализации предложенных алгоритмов и верность направления исследований. С помощью стандартных построений удалось успешно решить ряд тестовых задач. При этом вместо использования для каждой задачи тщательно подобранного и адаптированного отдельного метода с частично эквивалентной переформулировкой задач были применены единый стандартный метод, единые параметры алгоритма и естественная постановка задачи.

Представленные эксперименты служат для целей самой первичной проверки работоспособности высказанных идей. Результаты экспериментов представляются достаточно интересными, чтобы продолжать исследования в выбранном направлении.

Целесообразным шагом видится создание универсального декларативного языка для ввода запросов в репликативную систему. Необходимо начинать решать более сложные и практически важные задачи, которые плохо решаются известными методами машинного обучения. В идеале для апробации технологии нужен роботизированный комплекс, включающий различные сенсоры, манипуляторы и вычислительные блоки. Необходимо в рамках единой технологии научить такого робота примитивному общению и выполнению на первых этапах несложных практических задач.

В перспективе результаты исследований могут привести к созданию методов, эффективно работающих в областях, в которых другие известные методы (нейросетевая регрессия, деревья решений, сверточные сети) могут применяться только ограниченно. Также предполагается, что возможны эффективные приложения новой технологии в области анализа изображений.

Литература

1. *Савельев А.В.* Критический анализ функциональной роли модульной самоорганизации мозга // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение.* 2008. № 5-6. С. 4-17.
2. *Shi Y., Cao J.* Finite-time synchronization of memristive Cohen–Grossberg neural networks with time delays // *Neurocomputing.* 2020. vol. 377. pp. 159–167.

3. *Степанян И.В., Савельев А.В.* Управление хаотическими свойствами нейрона // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 6. С. 27–29.
4. *Степанян И.В., Хомич А.В., Карпишук А.В.* Принцип блочности в эволюционной оптимизации структур нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2006. № 3. С. 17–25.
5. *Ruizheng J. et al.* A Collective Intelligence Based Differential Evolution Algorithm for Optimizing the Structure and Parameters of a Neural Network // IEEE Access. 2020. vol. 8. pp. 69601–69614.
6. *Beniaquev D., Idan S., London M.* Single Cortical Neurons as Deep Artificial Neural Networks // bioRxiv. 2020. pp. 613141.
7. *Engelken R., Fred W., Abbott L.F.* Lyapunov spectra of chaotic recurrent neural networks //2020. arXiv preprint arXiv:2006.02427.
8. *Liu Q., Ulloa A., Horwitz B.* Using a Large-scale Neural Model of Cortical Object Processing to Investigate the Neural Substrate for Managing Multiple Items in Short-term Memory // J Cogn Neurosci. 2017. vol. 29. no. 11. pp. 1860–1876.
9. *Cabessa J., Villa A.E.P.* An Attractor-Based Complexity Measurement for Boolean Recurrent Neural Networks // PLoS ONE. 2014. vol. 9. no. 4. pp. e94204.
10. *Cao J., Cui H., Shi H., Jiao L.* Big Data: A Parallel Particle Swarm Optimization-Back-Propagation Neural Network Algorithm Based on MapReduce // PLoS ONE. 2016. vol. 11(6). pp. e0157551.
11. *Habenschuss S., Jonke Z., Maass W.* Stochastic Computations in Cortical Microcircuit Models // PLoS Comput Biol. 2013. vol. 9(11). pp. e1003311.
12. *Fry D.B.* The development of the phonological system in the normal and deaf child // The genesis of language. 1966. pp. 187–206.
13. *Lucas A. et al.* Neural Networks for Modeling Neural Spiking in S1 Cortex // Front. Syst. Neurosci. 2019. vol. 13. pp. 13.
14. *Teka W.W., Upadhyay R.K., Mondal A.* Spiking and bursting patterns of fractional-order Izhikevich model // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018. vol. 56. pp. 161–176.
15. *Karam E. et al.* Izhikevich Neuron Spike Model in LabVIEW // 2017 ASEE Northeast Section Conference. 2017.
16. *Chambers J.D. et al.* Computational Neural Modeling of Auditory Cortical Receptive Fields // Front Comput Neurosci. 2019. vol. 13. pp. 28.
17. *Mycielski J., Swierczkowski S.* A model of the neocortex // Advances in Applied Mathematics. 1988. vol. 9. no. 4. pp. 465–480.
18. *Ahmad S., Hawkins J.* How do neurons operate on sparse distributed representations? A mathematical theory of sparsity, neurons and active dendrites // 2016. arXiv preprint arXiv:1601.00720.
19. *Schnepel P. et al.* Physiology and Impact of Horizontal Connections in Rat Neocortex // Cerebral Cortex. 2015. vol. 25. no. 10. pp. 3818–3835.
20. *Vaz A.I.F., Vicente L.N.* A particle swarm pattern search method for bound constrained global optimization // Journal of Global Optimization. 2007. vol. 39. no. 2. pp. 197–219.
21. *Momma M., Bennett K.P.* A pattern search method for model selection of support vector regression // Proceedings of the 2002 SIAM International Conference on Data Mining. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2002. pp. 261–274.
22. *Audet C., Dennis Jr.J.E.* A pattern search filter method for nonlinear programming without derivatives // SIAM Journal on Optimization. 2004. vol. 14. no. 4. pp. 980–1010.
23. *Zhao Y., Zhou C.C.* System and method for knowledge pattern search from networked agents // US Patent 8903756. 2014.

24. *Torczon V.* On the convergence of pattern search algorithms // *SIAM Journal on optimization*. 1997. vol. 7. no. 1. pp. 1–25.
25. *Kamotsky D., Vargas M.* System and method for performing a pattern matching search // *US Patent 10565188*. 2020.
26. *da Silva L. E.B., Elnabarawy I., Wunsch D.C.* A Survey of Adaptive Resonance Theory Neural Network Models for Engineering Applications // *Neural Networks*. 2019. vol. 120. pp. 167–203.
27. *Hecht-Nielsen R.* Counterpropagation networks // *Applied Optics*. 1987. vol. 26. no. 23. pp. 4979–4984.
28. *Pisano N.A.* Searle’s Chinese Room Reconsidered // *Rerum Causae*. 2019. vol. 10(1).
29. *Chen Y.* Mechanisms of Winner-Take-All and Group Selection in Neuronal Spiking Networks // *Fronts Comput Neurosci*. 2017. vol. 11. pp. 20.
30. *Çağatay H. et al.* A Fair Version of the Chinese Room // *Problemos*. 2019. vol. 96. pp. 121–133.
31. *Kussul E.; Baidyk T.* Improved method of handwritten digit recognition tested on MNIST database // *Image and Vision Computing*. 2004. vol. 22. no. 12. pp. 971–981.
32. *LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P.* Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition // *Proceedings of the IEEE*. 1998. vol. 86. no. 11. pp. 22782324.

Степанян Иван Викторович – д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория исследования биомеханических систем отдела вибрационной биомеханики, ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). Область научных интересов: биомеханика, биоматематика, психоакустика, медицина и психофизиология умственного труда, нейросетевые технологии. Число научных публикаций – 150. neurocomp.pro@gmail.com; Малый Харитоньевский пер., 4, 101000, Москва, Россия; р.т.: +7(495)628-87-30.

Хомич Андрей Владимирович – инженер-программист, АО «Райффайзенбанк». Область научных интересов: нейроинформатика, математическая статистика, теория вероятности, применение методов математического моделирования в экономике. Число научных публикаций – 12. supremum76@gmail.com; ул. Троицкая, 17/1, 129090, Москва, Россия; р.т.: 111.

I. STEPANYAN, A. HOMICH
**STRUCTURE AND FUNCTIONS OF A REPLICATIVE NEURO-
LIKE MODULE**

Stepanyan I., Homich A. Structure and Functions of a Replicative Neuro-like Module.

Abstract. The given work describes a technology of construction of neural network system of artificial intellect (AI) at a junction of declarative programming and machine training on the basis of modelling of cortical columns. Evolutionary mechanisms, using available material and relatively simple phenomena, have created complex intelligent systems. From this, the authors conclude that AI should also be based on simple but scalable and biofeasible algorithms, in which the stochastic dynamics of cortical neural modules allow to find solutions to of complex problems quickly and efficiently.. Purpose: Algorithmic formalization at the level of replicative neural network complexes - neocortex columns of the brain. Methods: The basic AI module is presented as a specialization and formalization of the concept "Chinese room" introduced by John Earle. The results of experiments on forecasting binary sequences are presented. The computer simulation experiments have shown high efficiency in implementing the proposed algorithms. At the same time, instead of using for each task a carefully selected and adapted separate method with partially equivalent restatement of tasks, the standard unified approach and unified algorithm parameters were used. It is concluded that the results of the experiments show the possibility of effective applied solutions based on the proposed technology. Practical value: the presented technology allows creating self-learning and planning systems.

Keywords: Evolutionary Modeling, Declarative Programming of Neural Networks, Chinese Room, Replicative Neural-like Module, Model of Neocortex Columns.

Stepanyan Ivan – Ph.D., Dr.Sci., Leading Researcher, Biomechanical Systems Research Laboratory of Department of Vibrational Biomechanics, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests: biomechanics, biomathematics, psychoacoustics, medicine and the psychophysiology of mental labor, neural network technologies. The number of publications – 150. neurocomp.pro@gmail.com; 4, Maly Khari-tonyevskiy per., 101000, Moscow, Russia; office phone: +7(495)628-87-30.

Khomich Andrey – Software Engineer, Raiffeisenbank JSC. Research interests: neuroinformatics, mathematical statistics, probability theory, application of mathematical modeling methods in economics. The number of publications – 12. supremum76@gmail.com; 17/1, Troitskaya str., 129090, Moscow, Russia; office phone: 111.

References

1. Savel'ev A.V. [Critical analysis of the functional role of modular brain self-organization] *Nejrokompyutery: razrabotka i primeneniye – Neurocomputers: development and application*, 2008. vol. 5–6. pp. 4–17. (In Russ.).
2. Shi Y., Cao J. Finite-time synchronization of memristive Cohen–Grossberg neural networks with time delays. *Neurocomputing*. 2020. vol. 377. pp. 159–167.
3. Stepanyan I.V., Savel'ev A.V. [Managing the chaotic properties of a neuron] *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye – Neurocomputers: development and application*. 2016. vol. 6. pp. 27–29. (In Russ.).
4. Stepanyan I.V., Homich A.V., Karpishuk A.V. [The principle of modularity in evolutionary optimization of neural network structures] *Nejrokompyutery: razrabotka i primeneniye – Neurocomputers: development and application*. 2006. vol. 3. pp. 17–25. (In Russ.).

5. Ruizheng J. et al. A Collective Intelligence Based Differential Evolution Algorithm for Optimizing the Structure and Parameters of a Neural Network. *IEEE Access*. 2020. vol. 8. pp. 69601–69614.
6. Beniaguev D., Idan S., London M. Single Cortical Neurons as Deep Artificial Neural Networks. bioRxiv. 2020. pp. 613141.
7. Engelken R., Fred W., Abbott L.F. Lyapunov spectra of chaotic recurrent neural networks. 2020. arXiv preprint arXiv:2006.02427.
8. Liu Q, Ulloa A, Horwitz B. Using a Large-scale Neural Model of Cortical Object Processing to Investigate the Neural Substrate for Managing Multiple Items in Short-term Memory. *J Cogn Neurosci*. 2017. vol. 29. no. 11. pp. 1860–1876.
9. Cabessa J, Villa A.E.P. An Attractor-Based Complexity Measurement for Boolean Recurrent Neural Networks. *PLoS ONE*. 2014. vol. 9. no. 4. pp. e94204.
10. Cao J, Cui H., Shi H., Jiao L. Big Data: A Parallel Particle Swarm Optimization-Back-Propagation Neural Network Algorithm Based on MapReduce. *PLoS ONE*. 2016. vol. 11(6). pp. e0157551.
11. Habenschuss S., Jonke Z., Maass W. Stochastic Computations in Cortical Microcircuit Models. *PLoS Comput Biol*. 2013. vol. 9(11). pp. e1003311.
12. Fry D.B. The development of the phonological system in the normal and deaf child. The genesis of language. 1966. pp. 187–206.
13. Lucas A. et al. Neural Networks for Modeling Neural Spiking in S1 Cortex. *Front. Syst. Neurosci*. 2019. vol. 13. pp. 13.
14. Teka W.W., Upadhyay R.K., Mondal A. Spiking and bursting patterns of fractional-order Izhikevich model. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2018. vol. 56. pp. 161–176.
15. Karam E. et al. Izhikevich Neuron Spike Model in LabVIEW. 2017 ASEE Northeast Section Conference. 2017.
16. Chambers J.D. et al. Computational Neural Modeling of Auditory Cortical Receptive Fields. *Front Comput Neurosci*. 2019. vol. 13. pp. 28.
17. Mycielski J., Swierczkowski S. A model of the neocortex. *Advances in Applied Mathematics*. 1988. vol. 9. no. 4. pp. 465–480.
18. Ahmad S., Hawkins J. How do neurons operate on sparse distributed representations? A mathematical theory of sparsity, neurons and active dendrites. 2016. arXiv preprint arXiv:1601.00720.
19. Schnepel P. et al. Physiology and Impact of Horizontal Connections in Rat Neocortex. *Cerebral Cortex*. 2015. vol. 25. no. 10. pp. 3818–3835.
20. Vaz A.I.F., Vicente L.N. A particle swarm pattern search method for bound constrained global optimization. *Journal of Global Optimization*. 2007. vol. 39. no. 2. pp. 197–219.
21. Momma M., Bennett K.P. A pattern search method for model selection of support vector regression. Proceedings of the 2002 SIAM International Conference on Data Mining. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2002. pp. 261–274.
22. Audet C., Dennis Jr.J.E. A pattern search filter method for nonlinear programming without derivatives. *SIAM Journal on Optimization*. 2004. vol. 14. no. 4. pp. 980–1010.
23. Zhao Y., Zhou C.C. System and method for knowledge pattern search from networked agents. US Patent 8903756. 2014.
24. Torczon V. On the convergence of pattern search algorithms. *SIAM Journal on optimization*. 1997. vol. 7. no. 1. pp. 1–25.
25. Kamotsky D., Vargas M. System and method for performing a pattern matching search. US Patent 10565188. 2020.

26. da Silva L. E.B., Elnabarawy I., Wunsch D.C. A Survey of Adaptive Resonance Theory Neural Network Models for Engineering Applications. *Neural Networks*. 2019. vol. 120. pp. 167–203.
27. Hecht-Nielsen R. Counterpropagation networks. *Applied Optics*. 1987. vol. 26. no. 23. pp. 4979–4984.
28. Pisano N.A. Searle’s Chinese Room Reconsidered. *Rerum Causae*. 2019. vol. 10(1).
29. Chen Y. Mechanisms of Winner-Take-All and Group Selection in Neuronal Spiking Networks. *Front Comput Neurosci*. 2017. vol. 11. pp. 20.
30. Çagatay H. et al. A Fair Version of the Chinese Room. *Problemos*. 2019. vol. 96. pp. 121–133.
31. Kussul E.; Baidyk T. Improved method of handwritten digit recognition tested on MNIST database. *Image and Vision Computing*. 2004. vol. 22. no. 12. pp. 971–981.
32. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proceedings of the IEEE*. 1998. vol. 86. no. 11. pp. 22782324.

вые формы баз данных сегодня использует все больше компаний, среди которых такие гиганты, как «Google» или «Amazon» [1].

359 systems in ranking, August 2020

Rank			DBMS	Database Model
Aug 2020	Jul 2020	Aug 2019		
1.	1.	1.	Oracle	Relational, Multi-model
2.	2.	2.	MySQL	Relational, Multi-model
3.	3.	3.	Microsoft SQL Server	Relational, Multi-model
4.	4.	4.	PostgreSQL	Relational, Multi-model
5.	5.	5.	MongoDB	Document, Multi-model
6.	6.	6.	IBM Db2	Relational, Multi-model
7.	8.	8.	Redis	Key-value, Multi-model
8.	7.	7.	Elasticsearch	Search engine, Multi-model
9.	9.	11.	SQLite	Relational
10.	11.	9.	Microsoft Access	Relational

Рис. 1. Рейтинг систем управления базами данных [2]

Обо всех этих системах написано немало учебников, статей и им посвящено много различных ознакомительных и профессиональных сайтов и форумов в сети Интернет [3-5].

В [6] описаны пятнадцать категорий баз данных NoSQL, некоторые принципы и примеры для выбора подходящей базы для разных отраслей. В [7] анализируется и сравнивается реализация модели согласованности в пяти популярных базах данных NoSQL: Redis, Cassandra, MongoDB, Neo4j и OrientDB.

Принято считать, что реляционные системы управления базами данных (СУБД) позволяют создавать довольно сложные системы данных, а NoSQL базы данных и СУБД не подразумевают внутренних связей. NoSQL не основываются на одной модели, а каждая база данных в зависимости от целей использует различные модели. Однако проведенный обзор прикладных систем, которые построены на основе NoSQL баз данных, позволяет сделать вывод, что многие разработчики для построения сложных систем данных по тем или иным причинам сегодня выбирают не только реляционные базы данных. Стоит также отметить, что если теория проектирования реляционных баз данных, основанная на функциональных зависимостях и теоремах о нормализации реляционных схем, существует с 70-х годов [8], то для NoSQL баз данных такой теории пока нет, но есть много исследований в этой области.

Описывается новый формализованный метод построения NoSQL базы данных типа ключ-документ с учетом структуры запросов, планируемых для выполнения запросов к базе данных. Исследования показали, что этот метод является основополагающим для преобразования баз данных любых форматов, однако в данной статье демонстрируется его действие только на базах данных типа ключ-документ. Эти базы востребованы и хорошо описаны в большом числе публикаций, например [9-12].

2. Обзор связанных работ. Надо отметить, что вопросам преобразования схемы реляционной базы данных посвящалось много исследований на протяжении последних тридцати лет [13, 14]. Но как бы ни была усовершенствована схема реляционной базы данных, она имеет свои ограничения, которые и способствовали развитию иных форм баз данных, таких как ключ-значение и их разновидностей [9-12] или графовых баз данных [15].

В [16] предложен способ переноса реляционных баз данных в MongoDB путем преобразования таблиц в файлы CSV и импорта преобразованных файлов с помощью встроенной команды MongoDB. Однако данный способ только непосредственно переводит таблицы в коллекции и не учитывает связи между ними. Проведенное тестирование подтверждает, что MongoDB значительно хуже работает при выполнении запросов, затрагивающих несколько коллекций. В данном исследовании мы решаем эту проблему.

В [17] также разработали подход к переносу данных из реляционных баз данных в MongoDB, состоящий из трех этапов: извлечение данных из исходной базы данных, преобразование данных и перенос преобразованных данных в целевую базу данных. К сожалению, этот подход не затрагивает вопросов зависимости производительности от схем баз данных и связей между объектами. В нашем подходе мы учитываем связи и показываем, что от этого производительность запросов выигрывает.

Авторы [18] предложили модель преобразования реляционной схемы в схему базы данных NoSQL на основе структуры данных и запросов к данным. Эта модель имеет трехфазную структуру: описание структуры реляционной базы данных и требований к запросам данных; запросно-ориентированное моделирование данных для базы данных NoSQL; запросно-ориентированное описание схемы базы данных NoSQL. Но в этой модели отсутствует учет зависимостей между объектами базы данных при переходе от реляционной базы данных к NoSQL базе данных. Новая структура NoSQL базы данных основывается только на метаданных об объектах и запросах, а это неизбежно

приведет к потере универсальности запросов. В нашем подходе мы показываем, как связи между объектами влияют на структуру документа со встроеными документами.

В [19] предложили подход к миграции данных из реляционной базы данных в NoSQL базу данных на основе методов реляционной алгебры. В этом исследовании авторы предлагают адаптировать теорию и методы реляционной алгебры к разработке схемы базы данных MongoDB. Для этих же целей мы применяем теорию множеств, которая позволяет построить формализованные правила перевода реляционной БД в БД MongoDB.

В [20] авторы предлагают шесть правил для перевода реляционной базы данных в базу данных NoSQL трех типов (Column-Based, Document-Based и Graph-Based). Каждое правило связано с типом связи между таблицами (1-1, 1-M, M-M) или со специальной операцией, проводимой в одной из таблиц (например, агрегирования). При этом во всех трех типах рассматриваются подвиды NoSQL базы данных. Это работа, которая демонстрирует, как легко можно перевести реляционную базу данных в NoSQL, если не учитывать структуру запросов. Но проблема в том, что NoSQL базы данных являются ориентированными на определенные запросы. И те запросы, которые обращаются к нескольким таблицам в реляционной базе данных будут очень медленно работать в NoSQL базе данных при непосредственном переводе реляционной базы данных в NoSQL. Авторы решают эту проблему путем создания единой коллекции в БД NoSQL. Однако это не очень хорошее решение – соединять все таблицы в одну коллекцию, так как возрастает объем данных и возникают проблемы с памятью. В конце данной статьи мы на основе результатов тестирования показываем, что предлагаемый подход, который основан на построении определенного числа коллекций, лучше, чем подход, который основан на создании единой коллекции.

Главная проблема – отсутствие в NoSQL базах данных операций соединения множеств данных (коллекций, таблиц, семейств и т.п.). Эту проблему решают в [21] с помощью предлагаемого ими подхода к выполнению операций соединения на уровне приложений. Они реализуют свой подход в MongoDB. Их подход хорош тем, что позволяет сохранять модели данных. Однако этот подход не будет эффективным в случае консолидации данных, когда в разных моделях так или иначе окажутся одинаковые данные и, как следствие, при консолидации все равно будет необходима модификация структуры.

В другом случае [22, 23] описывается программная надстройка NoSQLayer, состоящая из двух модулей: модуль переноса данных, ко-

торый идентифицирует и анализирует схему NoSQL базы данных и преобразует ее в схему реляционной базы данных; и модуль отображения данных, который позволяет пользователям создавать запросы на SQL, при этом выбирая данные из базы данных NoSQL. Эта программа не предназначена для миграции данных и многие запросы работают медленнее, чем при непосредственном обращении к базам данных NoSQL на встроенном языке запросов [24]. В предлагаемом подходе мы оптимизируем процесс обработки запроса, используя внутренний язык запросов.

В [25] предоставлена технология, которая позволяет переводить системы реляционных баз данных на документно-ориентированные базы данных. Эта технология состоит из двух этапов: описание данных существующей реляционной базы данных и перенос в базу данных NoSQL. Эта технология не предусматривает оптимизацию схемы NoSQL к выполняемым запросам.

Согласно [26] отношения в документно-ориентированной модели базы данных могут быть представлены в форме встроенных документов и связей между этими документами. Однако, во-первых, встроенные документы могут использоваться для ограниченного объема данных, а во-вторых, остается проблемой определение формы встраивания. Исследования, описанные в [26], это подтверждают.

В [27] авторы применили традиционные правила теории нормализации реляционной схемы базы данных (теоремы о нормальных формах: вторая и третья нормальные формы (2NF, 3NF) и нормальная форма Бойса – Кодда (BCNF)) для разработки схемы MongoDB. Например, если существует функциональная зависимость между двумя атрибутами, то оба атрибута данных преобразуются в один элемент данных в MongoDB. Такой же принцип применяется для частичной и транзитивной зависимостей. Тестирование показало, что в результате применения такого подхода реально повысить производительность запросов для связанных объектов базы данных. Однако тестирование проводилось на небольшой схеме. Подход не учитывает наличие зависимости отношений типа многие-ко-многим, первичные ключи и внешние ключи. В данной статье показывается, как можно учитывать зависимость отношений такого типа.

Анализ русскоязычных публикаций показал, что большая часть научных работ, связанных с нереляционными базами данных, лежит в прикладной плоскости. Всего по запросу с ключевыми словами «коллекция, MongoDB» в научной электронной библиотеке «eLIBRARY.RU» были найдены 261 публикация из 34844888, в поисковой системе по полным текстам научных публикаций «Академия

Google» было найдено 370 русскоязычных публикаций по данным ключевым словам. Среди найденных работ следует выделить интересные работы: [28], в которой описано приложение, позволяющее преобразовывать SQL-запросы по чётким и нечётким данным в запросы на языке MongoQL; и [29], в которой описана общая концепция преобразования реляционной базы данных в формат MongoDB без учета запросов к базе данных.

Таким образом, анализ работ в области оптимизации структуры баз данных NoSQL, в частности документных баз данных, показал, что есть много различных подходов к преобразованию баз данных, но нет комплексного подхода, который бы одновременно учитывал типы связей между объектами и структуру запросов к объектам базы данных и позволял бы строить такое количество коллекций и такой внутренней структуры, чтобы запросы на выбор данных из документной базы данных выполнялись максимально быстро.

В данной статье метод и все примеры будут рассматриваться применительно к классическим реляционным базам данным и MongoDB.

MongoDB является одной из самых популярных баз данных. В литературе описано много хороших методологий по ее применению для различных практических задач. Например, в [30] приведена технология шардинга базы данных и модель управления крупномасштабными данными; в [31] описан метод построения слепых запросов к хранилищам документов JSON на примере MongoDB; метод обработки запросов в пространственно-временном диапазоне на основе индекса на примере базы данных большого объема MongoDB описан в [32]. В работах [33, 34] рассмотрены преимущества MongoDB перед известными реляционными базами данных, представлены результаты сравнительного анализа реляционных и нереляционных баз данных. Много работ посвящено описанию применения системы MongoDB в различных предметных областях: для создания прототипа трехмерной кадастровой системы и трехмерной визуализации [35]; прогнозирования потребляемой тепловой мощности зданий [36], для контроля потока грунтовых вод и переноса загрязняющих веществ [37], в персонализированной системе мониторинга здравоохранения [38] и, конечно, приложениях IoT [39].

3. Постановка задачи. Трансляция данных между различными источниками данных – необходимый шаг для многих задач интеллектуального анализа данных. Однако различия между методами хранения данных в этих двух формах SQL и NoSQL поднимают много проблем в области трансляции, трансформации и

консолидации данных. Одна из них – соответствие коллекций NoSQL таблицам реляционных баз данных. Для трансляции, трансформации и консолидации баз данных различных типов необходимо также учитывать отсутствие структуры и особенности языка запросов. Если для реляционных баз данных существуют методы формализованного построения отношений на основе заданных свойств объекта и функциональных зависимостей между ними, то для баз данных NoSQL и NewSQL такого формализованного аппарата не существует. И, например, при трансляции реляционной базы данных к формату СУБД MongoDB всегда встает вопрос о том, как этот перевод осуществлять.

При этом возможны следующие варианты изменения формата (перечень не полный):

- 1) Каждой таблице в реляционной базе данных поставить в соответствие отдельную коллекцию документов в MongoDB.
- 2) Из всех таблиц реляционной базы данных сделать одну коллекцию документов в MongoDB.
- 3) Создать такой набор коллекций документов в MongoDB, чтобы они наиболее полно подходили под выполняемые запросы.

Каждый из трех вариантов может быть эффективным при одной схеме БД и неэффективным при другой схеме БД. В [40] показано, как с помощью метода, основанного на теории множеств, можно определить число коллекций для конкретной БД. В данной статье объясняется, как можно усовершенствовать внутреннюю структуру коллекций, основываясь на информации о свойствах объектов в БД, запросов к БД и связях между объектами. Метод, представленный в данной статье, является продолжением метода создания коллекций без встроенных документов, описанного в [40].

4. Подход к применению методов определения коллекций в документной БД. В [40] мы оговаривали, что новая база данных MongoDB создается на основе существующей реляционной базы данных. Мы показали, что применение формализованного подхода, основанного на теории множеств, помогает найти оптимальный набор коллекций в MongoDB на основе информации о запросах, выполняемых к базе данных.

Но что делать, если новая база данных MongoDB создается не на основе реляционной базы данных? Ответ прост: надо использовать информацию об атрибутах объектов, которые планируется хранить в базе данных, применить к этим атрибутам методы реляционной алгебры и создать схему базы данных, удовлетворяющую третьей нормальной форме или нормальной форме Бойса – Кодда.

Принцип применения предлагаемых методов из [40] и данной статьи для разного рода преобразований структуры базы данных приведен на рисунке 2.

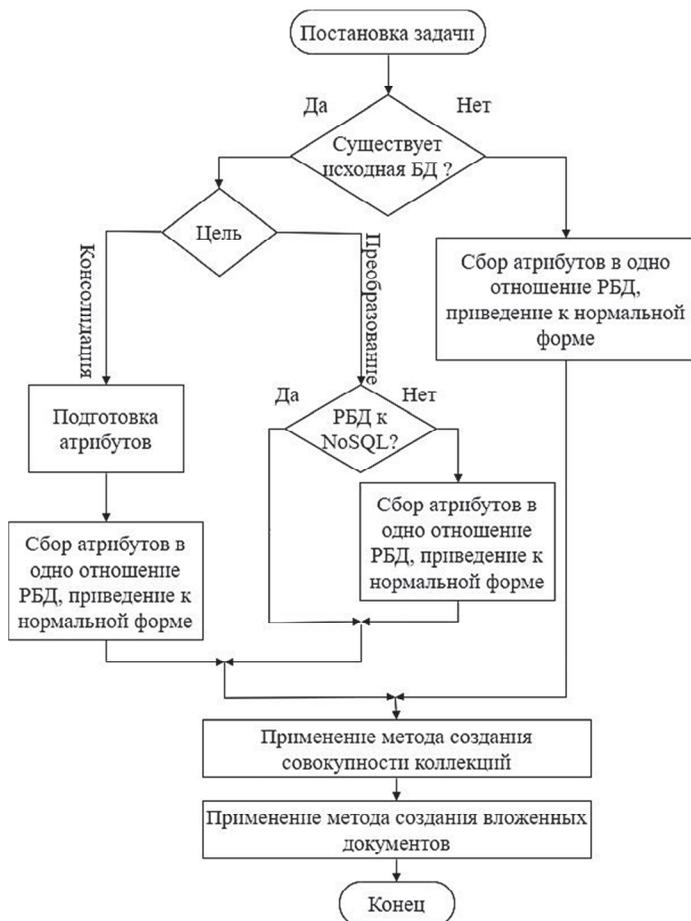


Рис. 2. Применение метода определения коллекций в документных БД

Суть этой методики в том, что независимо от того, происходит ли трансляция реляционной базы данных в документную БД, или консолидация реляционной БД с документной БД, или создание новой документной БД, если конечным результатом должна быть документная БД, то для оптимального по быстродействию выполнения запросов к ней необходимо к набору атрибутов объектов БД последовательно применить два наших метода:

- 1) Определение оптимального числа коллекций [40].
- 2) Определение внутренней структуры документов в коллекции: число и порядок встроенных документов. Этот метод описывается ниже.

Для определения необходимости создания вложенных документов лучше, если схема будет приведена изначально к третьей нормальной форме или нормальной форме Бойса – Кодда с помощью реляционной алгебры. Это позволит найти компромисс между быстродействием запросов и минимальным объемом памяти для хранения данных.

Если БД изначально не была реляционной, то ее структуру всегда можно привести к реляционной модели [40]. Нормальная форма реляционной модели – это всего лишь промежуточная форма. Она необходима для установления связей между отношениями, которые впоследствии будут учтены при создании вложенных документов. Таким образом, если исходная БД изначально не была реляционной, то преобразование ее схемы должно пройти по принципу: NoSQL-RDB-NoSQL.

5. Метод определения структуры вложенных документов в документных базах данных. Метод определения числа и порядка встроенных документов основан на типе связей между таблицами реляционной модели. В зависимости от типа связи необходимо применить определенное правило для составления документа в коллекции.

Ниже рассмотрены основные типы связей (1-1, 1-M, M-M) для двух и трех таблиц. Правила для трех таблиц построены на основе правил для двух таблиц. Правила для модели из более чем трех таблиц будут основаны на правилах для двух и трех таблиц, поэтому их рассматривать смысла нет.

Показано, что при применении метода определения числа коллекций из [40], встроенные документы могут быть только в том случае, если между таблицами, атрибуты которых вошли в коллекцию, была связь 1-M. Поэтому для двух таблиц выведено только одно правило. Для трех таблиц имеет значение последовательность связей между таблицами и число главных и второстепенных (связанных с ними), поэтому правил для этого случая больше.

5.1 Определение вложенных документов для двух отношений. Входные данные:

- 1) Даны два отношения реляционной модели, на основе которых строится схема нереляционной БД типа ключ-документ: T_1 и T_2 :

$$T_1 \{T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1k}\};$$

$$T_2 \{T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2n}\};$$

где T_{ij} – это j -е поле i -го отношения; k – число полей в отношении T_1 ; n – число полей в отношении T_2 .

2) По методу определения коллекций в БД типа ключ-документ получена некоторая коллекция:

$$Q\{T_{11}, \dots, T_{1m}, T_{21}, \dots, T_{2r}\}, m \leq k, r \leq n.$$

3) Отношения T_1 и T_2 имеют связи типа 1 – M $\boxed{T_1}_{1-\infty} \boxed{T_2}$.

4) В отношениях определены ключи, принадлежащие данной коллекции:

$$T_1 : T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1s1}, \text{ где } 1 \leq s1 \leq m,$$

$$T_2 : T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2s2}, \text{ где } 1 \leq s2 \leq r.$$

5) Есть совокупность запросов S_2 к коллекции Q :

$$S_{21} \{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i1}, T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j1}\};$$

$$\dots$$

$$S_{2t} \{T_{11}, \dots, T_{1st}, \dots, T_{1it}, T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2jt}\},$$

и совокупность запросов S_1 к атрибутам отношения T_2 из коллекции Q :

$$S_{11} \{\dots, T_{2i1}, \dots\},$$

$$\dots$$

$$S_{1r} \{\dots, T_{2ir}, \dots\}.$$

Запросы во множествах S_1 и S_2 – это запросы только на выбор данных, то есть в терминах SQL запросы вида «*select ... from ... where ...*». В этих запросах могут быть многоуровневые подзапросы или операции агрегирования, группирования, сортировки. В них в терминах SQL могут быть также операции объединения, пересечения и вычитания таблиц, так как предварительно был применен метод [40]. Под запросами не рассматриваются запросы на удаление, модификацию и вставку данных.

6) $T'_2(S_2)$ – это множество всех атрибутов, участвующих в запросах:

$$T'_2(S_2) = \{T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j1}\} \cup \dots \cup ,$$

$$\{T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2jt}\} = \{T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j1}, \dots, T_{2jt}\}.$$

7) Всего запросов S_1 к базе данных равно V_s .

Правило 1. Встроенный документ должен состоять из атрибутов множеств:

$$T'_2 = T'_2(S_2) \cup \bigcup_{i=1}^m (S_1 - T'_2(S_2))_{S_{1i} - T'_2(S_2) \neq \emptyset \& S_{1i} - T'_2(S_2) \neq S_{1i}},$$

а новая структура коллекции Q имеет вид:

$$\begin{aligned} Q' \{ & T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1m}, T'_2 : \{ T'_2(S_2) \cup \\ & \cup \bigcup_{i=1}^m (S_{1i} - T'_2(S_2))_{S_{1i} - T'_2(S_2) \neq \emptyset \& S_{1i} - T'_2(S_2) \neq S_{1i}} \}, \\ & T''_2 : \{ \bigcup_{i=1}^m (S_{1i})_{S_{1i} \cap T'_2(S_2) = \emptyset} \} \} \end{aligned} \quad (1)$$

где T'_2 и T''_2 – это имена новых ключей для встроенных документов.

В данном правиле рассмотрена только связь типа 1 – M . Если схема РБД была изначально приведена к нормальной форме BCNF, 3NF или 4NF, то других связей между отношениями T_1 и T_2 быть не может. Но если по каким-либо причинам, например проведенной денормализации схемы РБД, эти связи существуют, то:

– для связи типа 1–1 вложенных документов быть не может ввиду однозначности соответствия каждому кортежу из отношения T_1 единственного кортежа из отношения T_2 ;

– для связи типа M – M вложенные документы строятся по тому же принципу, что и для связи 1 – M .

5.2. Определение вложенных документов для трех отношений с одним главным отношением и двумя подчиненными. Пусть:

1) Даны три отношения реляционной модели, на основе которых строится схема нереляционной БД типа ключ-документ: T_1 , T_2 и T_3 :

$$T_1 \{ T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1k} \};$$

$$T_2 \{ T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2n} \};$$

$$T_3 \{ T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3m} \}.$$

где T_{ij} – это j -е поле i -го отношения; k – число полей в отношении T_1 ;

n – число полей в отношении T_2 ; m – число полей в отношении T_3 .

2) По методу определения коллекций в БД типа ключ-документ получена некоторая коллекция:

$$Q\{T_{11}, \dots, T_{k'}, T_{21}, \dots, T_{2n'}, T_{31}, \dots, T_{3m'}\}, \quad k' \leq k, n' \leq n, m' \leq m.$$

3) Отношения T_1 , T_2 и T_3 имеют связи типа $1 - \infty$: $\boxed{T_3}_{\infty-1} \boxed{T_1}_{1-\infty} \boxed{T_2}$.

4) В отношениях определены ключи, принадлежащие данной коллекции:

$$T_1 : T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1s1}, \quad \text{где } 1 \leq s1 \leq k';$$

$$T_2 : T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2s2}, \quad \text{где } 1 \leq s2 \leq n';$$

$$T_3 : T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3s3} \quad \text{где } 1 \leq s3 \leq m'.$$

Правило 2. Если $S_1\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}\}$ – запрос, который обращается только к атрибутам одного отношения, например T_1 , то из пункта 5.1. следует, что вложенных документов в данной коллекции быть не может.

Правило 3. Если $S_2\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}, T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j}\}$ – запрос, который обращается к атрибутам двух отношений T_1 , T_2 или T_1 , T_3 , то в пункте 5.1. показано, что новая структура коллекции Q примет вид (1).

Правило 4. Если $S_3\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}, T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j}, T_{31}, \dots, T_{3s3}, \dots, T_{3r}\}$ – запрос, который обращается к атрибутам всех трех отношений T_1, T_2 и T_3 , то новая структура коллекции Q примет вид:

$$\begin{aligned} Q\{T_{11}, \dots, T_{1m}, T'_2 \{T'_2(S_2) \cup \bigcup_{i=1}^{l'} (S_{1i} - \\ - T'_2(S_2))_{S_{1i} - T'_2(S_2) \neq \emptyset \& S_{1i} - T'_2(S_2) \neq S_{1i}}\}, \\ T''_2 : \{ \bigcup_{i=1}^{l'} (S_{1i})_{S_{1i} \cap T'_2(S_2) = \emptyset} \}, T'_3 : \{ T'_3(S_3) \cup \\ \cup \bigcup_{i=1}^{l'} (S_{1i} - T'_3(S_3))_{S_{1i} - T'_3(S_3) \neq \emptyset \& S_{1i} - T'_3(S_3) \neq S_{1i}} \}, \\ T''_3 : \{ \bigcup_{i=1}^{l'} (S_{1i})_{S_{1i} \cap T'_3(S_3) = \emptyset} \} \} \end{aligned} \quad (2)$$

где T'_2 , T'_3 – это имена новых ключей для вложенных документов; атрибуты $T'_2(S_3)$ – это все атрибуты отношения T_2 , входящие в за-

просы типа S_3 к коллекции Q ; атрибуты $T'_3(S_3)$ – это все атрибуты отношения T_3 , входящие в запросы типа S_3 к коллекции Q ; V_S – количество запросов типа S_1 ; T''_2 – множество атрибутов, которые не вошли в T'_2 из всех атрибутов отношения T_2 , входящих в коллекцию Q ; T''_3 – множество атрибутов, которые не вошли в T'_3 из всех атрибутов отношения T_3 , входящих в коллекцию Q .

Надо заметить, что этот случай является обобщением Правила 3 с двух отношений со связью $1-\infty$ на две пары отношений со связью $1-\infty$.

5.3. Определение вложенных документов для трех отношений с двумя главными отношениями и двумя подчиненными. Пусть:

1) Даны три отношения реляционной модели, на основе которых строится схема нереляционной БД типа ключ-документ: T_1 , T_2 и T_3 :

$$T_1 \{T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1k}\};$$

$$T_2 \{T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2n}\};$$

$$T_3 \{T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3m}\},$$

где T_{ij} – это j -е поле i -го отношения; k – число полей в отношении T_1 ; n – число полей в отношении T_2 ; m – число полей в отношении T_3 .

2) По методу определения коллекций в БД типа ключ-документ получена некоторая коллекция:

$$Q\{T_{11}, \dots, T_{1k'}, T_{21}, \dots, T_{2n'}, T_{31}, \dots, T_{3m'}\}, k' \leq k, n' \leq n, m' \leq m.$$

3) Отношения T_1 , T_2 и T_3 имеют связи типа $1-M$:

$$\boxed{T_1}_{1-\infty} \boxed{T_2}_{1-\infty} \boxed{T_3}.$$

4) В отношениях определены ключи, принадлежащие данной коллекции:

$$T_1 : T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1s1}, \text{ где } 1 \leq s1 \leq k'.$$

$$T_2 : T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2s2}, \text{ где } 1 \leq s2 \leq n'.$$

$$T_3 : T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3s3}, \text{ где } 1 \leq s3 \leq m'.$$

Рассмотрим возможные варианты запросов к коллекции Q :

a) $S_1\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}\}$ – запрос, который обращается только к атрибутам одного отношения, например T_1 ;

b) $S_2\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}, T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j}\}$ – запрос, который обращается к атрибутам двух отношений: T_1 , T_2 или T_2 , T_3 ;

c) $S_3\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}, T_{21}, \dots, T_{2s2}, \dots, T_{2j}, T_{31}, \dots, T_{3s3}, \dots, T_{3r}\}$ – запрос, который обращается к атрибутам всех трех отношений: T_1 , T_2 и T_3 ;

d) $S_4\{T_{11}, \dots, T_{1s1}, \dots, T_{1i}, T_{31}, \dots, T_{3s3}, \dots, T_{3r}\}$ – запрос, который обращается к атрибутам двух отношений: T_2 и T_3 .

Случай a). Этот случай рассмотрен в пункте 5.1 при определении вложенных документов для коллекции, построенной из атрибутов двух отношений, и показано, что *вложенных документов в данной коллекции быть не может.*

Случай b). Этот случай рассмотрен в пункте 5.1 при определении вложенных документов для коллекции, построенной из атрибутов двух отношений, и показано, что новая структура коллекции Q примет вид (1).

Случай c). Этот случай является обобщением *случая b)* с двух отношений на три отношения. В данном случае новая структура коллекции Q примет вид:

$$\begin{aligned} Q' \{T_{11}, \dots, T_{1m}, T'_2 : \{T'_2(S_3) \cup \bigcup_{i=1}^{V_S} (S_{1i} \cap (S_{1i} - T'_2(S_3)))\}; \\ T'_3 : \{T'_3(S_3) \cup \bigcup_{i=1}^{V_S} (S_{1i} \cap (S_{1i} - T'_3(S_3)))\}, T''_2, T''_3\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где T'_2 , T'_3 – это имена новых ключей для вложенных документов; атрибуты $T'_2(S_3)$ – это все атрибуты отношения T_2 , входящие в запросы типа S_3 к коллекции Q ; атрибуты $T'_3(S_3)$ – это все атрибуты отношения T_3 , входящие в запросы типа S_3 к коллекции Q ; V_S – количество запросов типа S_1 ; T''_2 – множество атрибутов, которые не вошли в T'_2 из всех атрибутов отношения T_2 , входящих в коллекцию Q ; T''_3 – множество атрибутов, которые не вошли в T'_3 из всех атрибутов отношения T_3 , входящих в коллекцию Q .

Случай d). Так как запрос к атрибутам отношений T_1 и T_3 может быть выполнен только через атрибуты отношения T_2 , то этот случай в результате сводится к *случаю c)*.

Если коллекция Q построена более чем для трех отношений, то вложенные документы строятся так же, как и для трех отношений.

6. Тестирование эффективности методики определения структуры вложенных документов в БД типа ключ-документ.

Тестирование проводилось на персональном компьютере Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz, с операционной системой Windows, MySQL Community Server Версия 8.0.17, MongoDB Community Server v4.0.5.

Тестирование было выполнено для трех реляционных баз данных с разными схемами (рис. 3-5).

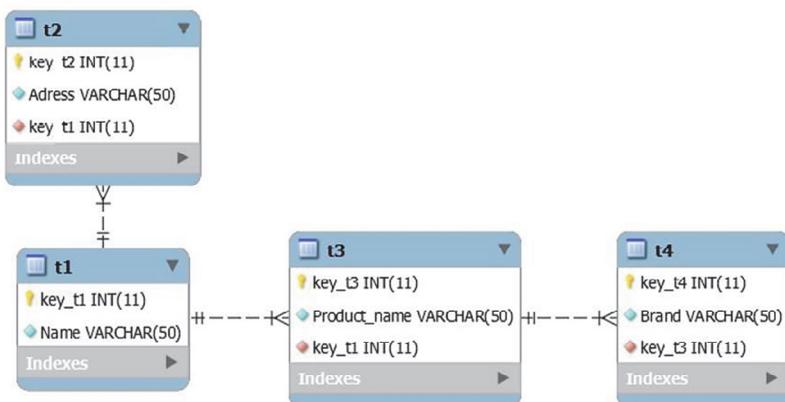


Рис. 3. Вариант I схемы тестируемой базы данных

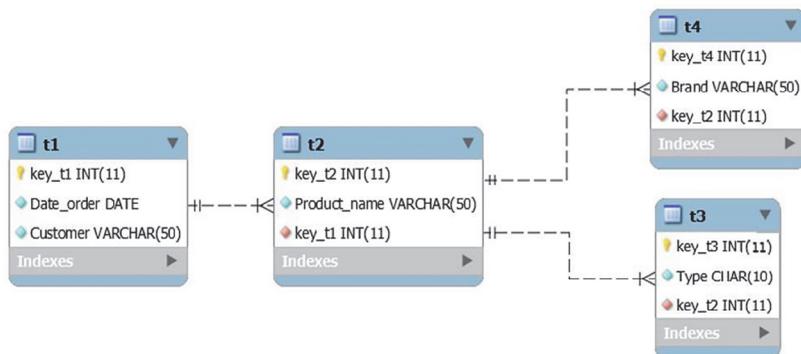


Рис. 4. Вариант II схемы тестируемой базы данных

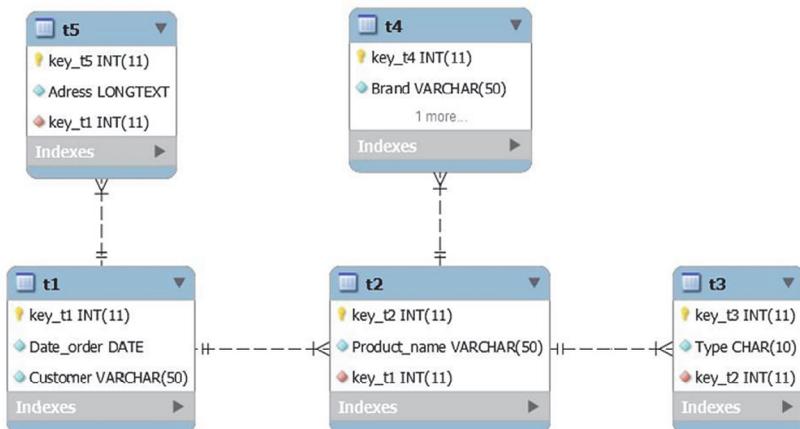


Рис. 5. Вариант III схемы тестируемой базы данных

Объемы тестируемых баз данных были следующие:

- вариант I: таблица T1 – 15000 записей, T2 – 50 000 записей, T3 – 110 000 записей, T4 – 200 000 записей;
- вариант II: таблица T1 – 50 000 записей, T2 – 120 000 записей, T3 – 350 000 записей, T4 – 300 000 записей;
- вариант III: таблица T1 – 60 000 записей, T2 – 170 000 записей, T3 – 360 000 записей, T4 – 400 000 записей, T5 – 100 000 записей.

Для каждой из схем баз данных, представленных на рисунках 4-6, были построены по две базы данных MongoDB: база данных, которая состоит из единой коллекции, объединяющей в себе все данные из всех таблиц реляционной базы данных без вложенности документов, и база данных, которая также состоит из единой коллекции, построенной по предлагаемому в данной статье методу со вложенными документами. В тестировании применяется совокупность описанных правил к базе данных MongoDB без предварительной оптимизации ее структуры по числу коллекций с помощью метода, приведенного в [40]. Это сделано специально с целью демонстрации именно данного подхода, но на практике эти методы рекомендуется применять последовательно. Сначала метод оптимизации по числу коллекций, затем метод оптимизации структуры коллекций, описанный в данной статье.

Фрагменты коллекций без вложенных документов представлены на рисунке 6:

Базы данных, построенные в соответствии с правилами 1-3, описанными в пункте 5, имеют следующие коллекции:

– вариант I:

$Q'\{key_t1, Name, T2_of_T1 : \{key_t2, Adress\}, T3_of_T1 : \{key_t3, Product_name, T4_of_T3 : \{key_t4, Brand\}\}\}$;

– вариант II:

$Q'\{key_t1, Date_order, Customer, T2_of_T1 : \{key_t2, Product_name, T3_of_T2 : \{key_t3, Type\}, T4_of_T2 : \{key_t4, Brand\}\}\}$;

– вариант III:

$Q'\{key_t1, Date_order, Customer, T5_of_T1 : \{key_t5, Adress\}, T2_of_T1 : \{key_t2, Product_name, T3_of_T2 : \{key_t3, Type\}, T4_of_T2 : \{key_t4, Brand\}\}\}$.

T1		...
_id	objectId	NN
key_t1	double	NN
Name	string	NN
key_t2	double	NN
Adress	string	NN
key_t3	double	NN
Product_name	string	NN
key_t4	double	NN
Brand	string	NN

а) Вариант I

T1		...
_id	objectId	NN
key_t1	double	NN
Date_order	string	NN
Customer	string	NN
key_t2	double	NN
Product_name	string	NN
key_t3	double	NN
Type	string	NN
key_t4	double	NN
Brand	string	NN

б) Вариант II

T1		...
_id	objectId	NN
key_t1	double	NN
Date_order	string	NN
Customer	string	NN
key_t2	double	NN
Product_name	string	NN
key_t3	double	NN
Type	string	NN
key_t4	double	NN
Brand	string	NN
key_t5	double	NN
Adress	string	NN

в) Вариант III

Рис. 6. Единая коллекция MongoDB без вложенных документов

Структуры коллекций, полученных для вариантов I-III баз данных, показаны на рисунке 7.

Т1			Т4		
key_id	objectId	NN	key_id	objectId	NN
key_t1	double	NN	key_t1	double	NN
Name	string	NN	Customer	string	NN
T2_of_T1 [{}]	...T1.T2_of_T1	NN	Date_order	string	NN
key_t2	double	NN	T2_of_T1 [{}]	...T4.T2_of_T1	NN
Address	string	NN	key_t2	double	NN
T3_of_T1 [{}]	...T1.T3_of_T1	NN	Product_name	string	NN
key_t3	double	NN	T3_of_T2 [{}]	...T4.T2_of_T1.T3_of_T2	NN
Product_name	string	NN	key_t3	double	NN
T4_of_T3 [{}]	...T1.T3_of_T1.T4_of_T3	NN	Type	string	NN
key_t4	double	NN	T4_of_T2 [{}]	...T4.T2_of_T1.T4_of_T2	NN
Brand	string	NN	key_t4	double	NN
			Brand	string	NN

а) Вариант I

б) Вариант II

Т1		
key_id	objectId	NN
key_t1	double	NN
Customer	string	NN
T5_of_T1 [{}]	...T1.T5_of_T1	NN
key_t5	double	NN
Address	string	NN
Date_order	string	NN
T2_of_T1 [{}]	...T1.T2_of_T1	NN
key_t2	double	NN
Product_name	string	NN
T3_of_T2 [{}]	...T1.T2_of_T1.T3_of_T2	NN
key_t3	double	NN
Type	string	NN
T4_of_T2 [{}]	...T1.T2_of_T1.T4_of_T2	NN
key_t4	double	NN
Brand	string	NN

в) Вариант III

Рис. 7. Новые коллекции со вложенными документами

Для оценки эффективности применения предлагаемого подхода для баз данных с различными типами связей было проведено тестирование 8 разных запросов для каждого из вариантов полученных баз данных. Каждый запрос выполнялся 25 раз. Все 25 повторов каждого запроса выполнялись последовательно. Представленное время является усредненным значением (в миллисекундах).

Для чистоты эксперимента при тестировании не использовались индексы и было отключено кэширование. Исследования по дополнению метода информацией об индексах проводятся в настоящий момент и будут представлены в другой статье.

Учитывая, что функция кэширования в обеих СУБД была отключена, разброс по времени выполнения между 25 запусками для каждого запроса был небольшим. Среднее квадратическое отклонение значений времени выполнения запроса в выборке из 25 значений для каждого исследуемого запроса принадлежит интервалу [0.002; 0,004].

Структура запросов различалась по числу таблиц, к которым велось обращение, и наличию условий для поиска. Особенности запросов:

– запросы 1, 2 обращаются к двум таблицам. Содержат операцию естественного соединения таблиц. Таблицы отличаются в запросах. Коды запросов:

```
select name, address from t1, t2 where t1.key_1 = t2.key_1;  
select product_name, brand from t2, t4 where t2.key_t2 = t4.key_t2;
```

– запрос 3 обращается к трем таблицам. Содержит операцию естественного соединения таблиц. Код запроса:

```
select name, product, brand from t1,t3,t4 where t1.key_t1 = t3.key_t1 and  
t3.key_t3 = t4.key_t3;
```

– запросы 4, 5 обращаются к двум таблицам. Содержат условие на выбор данных и операцию естественного соединения таблиц. Таблицы и операции отличаются в запросах. Коды запросов:

```
select adress from t1,t2 where t1.key_t1 = t2.key_t1 and name = 'charity  
dickerson';  
select t3.product_name from t3,t4 where t3.key_t3 = t4.key_t3 and t4.brand  
= 'sureraquistor international corp.';
```

– запросы 6, 7 обращаются к трем таблицам. Содержат условие на выбор данных и операцию естественного соединения таблиц. Таблицы и операции отличаются в запросах. Коды запросов:

```
select Product_name, Brand from t1,t3,t4 where t1.key_t1 = t3.key_t1 and  
t3.key_t3 = t4.key_t3 and Name = 'Mindy Garcia'  
select Name, Product_name from t1,t3,t2 where t1.key_t1 = t2.key_t1 and  
t1.key_t1 = t3.key_t1 and Adress = '662 South Second Drive';
```

– запрос 8 обращается к четырем таблицам. Содержит условие на выбор данных и операцию естественного соединения таблиц. Код запросов:

```
select Adress, Product_name, Brand from t1,t2,t3,t4 where t1.key_t1 =  
t2.key_t1 and t1.key_t1 = t3.key_t1 and t3.key_t3 = t4.key_t3 and Name =  
'Sonia Chang'.
```

На рисунке 8 приведен график времени выполнения тестируемых запросов.

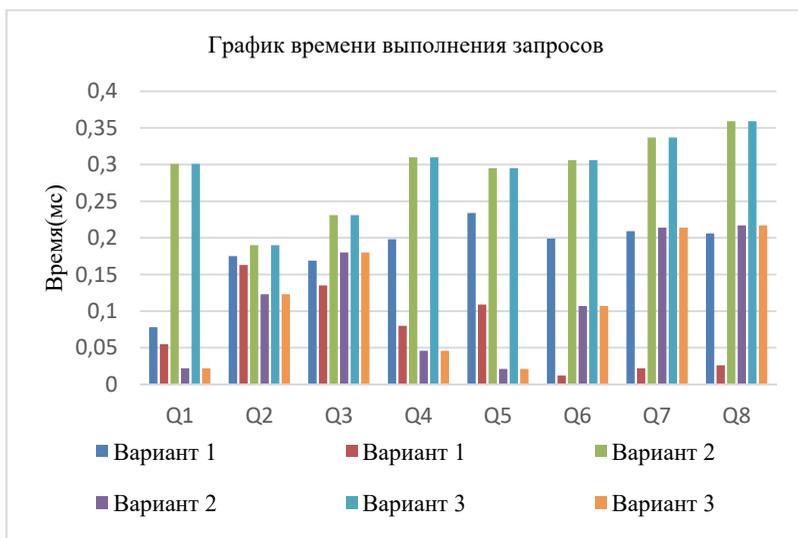


Рис. 8. Графики результатов выполнения запросов

Из диаграмм на рисунке 8 видно, что в зависимости от структуры запросов разность во времени их выполнения к обем базам данных для всех вариантов I-III может быть как малой, так и очень большой. Но все запросы со вложенными документами выполнялись, как правило, намного быстрее. Это можно объяснить тем, что объем коллекции при использовании вложенных документов гораздо меньше, чем в случае построения коллекции без вложенных документов. Например, для варианта I при трансляции данных с БД MySQL в MongoDB новая коллекция со вложенными документами состояла из 15000 документов и имела объем $\approx 21,2$ Мб, а коллекция без вложенных документов состояла из 597686 документов и имела объем $\approx 112,3$ Мб. Именно поэтому очень важно оценить, в каких коллекциях должны быть вложенные документы, а в каких нет. Эти примеры показывают эффективность применения описанных в пунктах 3-4 подходов и правил построения коллекций с учетом связей между объектами в базе данных и структуры запросов, которые к ним выполняются.

7. Заключение. В результате проведенных исследований был разработан формализованный метод, основанный на теории множеств и позволяющий автоматизировать процесс построения документной базы дан-

ных по заданной совокупности свойств объектов и связей между ними. Учет структуры запросов к базе данных позволяет определить число и состав коллекций для СУБД MongoDB таким образом, чтобы можно было избежать операций объединения коллекций. Учет связей между объектами позволяет оценить необходимость создания встроженных документов.

Предлагаемый метод был тщательно протестирован на документных базах данных различной структуры с разными связями между таблицами. Показаны только самые характерные примеры со встроженными документами. В каждом тестировании замерялось среднее время выполнения запросов, часть из них отражена в разделе 6. Проведенный анализ результатов выполнения запросов показал, что организация базы данных с применением предлагаемого метода позволяет ускорить выполнение запросов на 10-50% по сравнению с другими формами организации баз данных. Величина ускорения запросов зависит от двух обстоятельств: начальной схемы базы данных (до применения к этой схеме метода, описанного в данной статье) и структуры запроса.

В целом предлагаемый метод может применяться для:

- 1) Создания эффективной структуры новой базы данных типа ключ-документ.
- 2) Трансляции данных из реляционной базы данных в базу данных типа ключ-документ.
- 3) Трансляции данных из произвольной базы данных в базу данных типа ключ-документ.
- 4) Консолидации баз данных.

Есть и другие возможности для применения данного метода, например создание временных коллекций.

И последнее, что стоит отметить: в новую структуру данные переносятся в последнюю очередь, и делается это, как правило, с помощью программных надстроек или с помощью алгебры кортежей, что частично описано в [41].

Литература

1. Rocha L. et al. A Framework for Migrating Relational Datasets to NoSQL // *Procedia Computer Science*. 2015. vol. 51. pp. 2593–2602.
2. Рейтинг баз данных [DB-Engines Ranking]. URL: <https://db-engines.com/en/ranking> (дата обращения 15.07.2020).
3. Jose B., Abraham S. Performance analysis of NoSQL and relational databases with MongoDB and MySQL // *Materials Today: Proceedings*. 2020. vol. 24. pp. 2036–2043.
4. Čerešňák R., Kvet M. Comparison of query performance in relational a non-relation database // *Transportation Research Procedia*. 2019. vol. 40. pp. 170–177.
5. Diogo M., Cabral B., Bernardino J. Consistency Models of NoSQL Databases // *Future Internet*. 2019. vol. 11(2). pp. 43.
6. Chen J., Lee W. An Introduction of NoSQL Databases Based on Their Categories and Application Industries // *Algorithms*. 2019. vol. 12(5). pp. 106.

7. *Diogo M., Cabral B., Bernardino J.* Consistency Models of NoSQL Databases // Future Internet. 2019. vol. 11(2). pp. 43.
8. *Li W., Clifton C., Liu S.* Database Integration Using Neural Networks: Implementation and Experiences // Knowl. Inf. Syst. 2000. vol. 2. no. 1. pp. 73–96.
9. *Storey V.C., Song I.Y.* Big data technologies and Management: What conceptual modeling can do // Data Knowl. Eng. 2017. vol. 108. pp. 50–67.
10. *Corbellini A. et al. S.* Persisting big-data: The NoSQL landscape // Inf. Syst. 2017. vol. 63. pp. 1–23.
11. *Makris A., Tserpes K., Andronikou V., Anagnostopoulos D.* A classification of NoSQL data stores based on key design characteristics // Procedia Computer Science. 2016. vol. 97. pp. 94–103.
12. *Atzeni P., Bugiotti F., Rossi L.* Uniform access to NoSQL systems // Inf. Syst. 2014. vol. 43. pp. 117–133.
13. *Pardede E., Rahayu J.W., Taniar D.* Mapping Methods and Query for Aggregation and Association Relationship in Object-Relational Database using Collection // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC). 2004. pp. 539–543.
14. *Shichkina Y., Kupriyanov M., Shevsky V.* The Application of Graph Theory and Adjacency Lists to Create Parallel Queries to Relational Databases // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. vol. 10963 LNCS. pp. 61–77.
15. *Robinson I., Webber J., Eifrem E.* Graph Databases: New Opportunities for Connected Data // O'Reilly Media, Inc. 2015. 238 p.
16. *Chickerur S.* Comparison of Relational Database with Document-Oriented Database (MongoDB) for Big Data Applications // 8th International Conference on Advanced Software Engineering and Its Applications ASE.A. 2015. pp. 41–47.
17. *Hanine M., Bendarag A., Boutkhoul O.* Data Migration Methodology from Relational to NoSQL Databases // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. 2015. vol. 9. no. 12. pp. 2566–2570.
18. *Li X., Ma Z., Chen H.* QODM: A Query-Oriented Data Modeling Approach for NoSQL Databases // Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA). 2014. pp. 338–345.
19. *Zhao G., Huang W., Liang S., Tang Y.* Modeling MongoDB with Relational Model // 2013 Fourth International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies (EIDWT). 2013. pp. 115–121.
20. *Alotaibi O., Pardede E.* Transformation of Schema from Relational Database (RDB) to NoSQL Databases // Data. 2019. vol. 4(4). pp. 148.
21. *Celesti A., Fazio M., Villari M.* A Study on Join Operations in MongoDB Preserving Collections Data Models for Future Internet Applications // Future Internet. 2019. vol. 11(4). pp. 83.
22. *Rocha L., Vale F., Cirilo E.* A Framework for Migrating Relational Datasets to NoSQL // Procedia Computer Science. 2015. vol. 51. pp. 2593–2602.
23. *Liang D., Lin Y., Ding G.* Mid-model Design Used in Model Transition and Data Migration between Relational Databases and NoSQL Databases // IEEE Int. Conf. Smart City. 2015. pp. 866–869.
24. *Hamid S., Rezapour M., Moradi M., Ghadiri N.* Performance evaluation of SQL and MongoDB databases for big e-commerce data // IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers, and Signal Processing. 2015. pp.1–7.
25. *Karnitis G., Arnicans G.* Migration of Relational Database to Document-Oriented Database: Structure Denormalization and Data Transformation // 7th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN). 2015. pp. 113–118.

26. *Mason R.T.* NoSQL Databases and Data Modeling Techniques for a Document-oriented NoSQL Database // *Computer Science*. 2015. pp. 259–268.
27. *Gu Y., Shen S., Wang J., Kim J.* Application of NoSQL Database MongoDB // *IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*. 2015. pp. 158–159.
28. *Самойлов Н.К.* Трансляция запросов с языка SQL в язык MongoDB // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2019. № 3. С. 104–111.
29. *Шепелева Ж.А., Аболмасова Е.С., Емельянова Е.С.* Анализ функционирования технологии NOSQL, реализованной на примере MONGODB // *Программная инженерия: современные тенденции развития и применения*. 2018. С. 113–116.
30. *Wang S. et al.* A Distributed Storage and Access Approach for Massive Remote Sensing Data in MongoDB // *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2019. vol. 8(12). pp. 533.
31. *Marrara S., Pelucchi M., Psaila G.* Blind Queries Applied to JSON Document Stores // *Information*. 2019. vol. 10(10). pp. 291.
32. *Qian C. et al.* GeoSOT-Based Spatiotemporal Index of Massive Trajectory Data // *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2019. vol. 8(6). pp. 284.
33. *Степовик А.Н., Ефанова Н.В.* Анализ реляционных и нереляционных баз данных // *Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты*. 2019. С. 414–416.
34. *Королева Ю.А., Маслова В.О., Козлов В.К.* Разработка концепции миграции данных между реляционными и нереляционными системами БД // *Программные продукты и системы*. 2019. Т. 32. № 1. С. 063–067.
35. *Višnjevac N. et al.* Prototype of the 3D Cadastral System Based on a NoSQL Database and a JavaScript Visualization Application // *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2019. vol. 8(5). pp. 227.
36. *Acquaviva A et al.* Forecasting Heating Consumption in Buildings: A Scalable Full-Stack Distributed Engine // *Electronics*. 2019. vol. 8(5). pp. 491.
37. *Marchiori A., Li Y., Evans J.* Design and Evaluation of IoT-Enabled Instrumentation for a Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff Wall // *Infrastructures* 2019. vol. 4(1). pp. 5.
38. *Alfian G. et al.* A Personalized Healthcare Monitoring System for Diabetic Patients by Utilizing BLE-Based Sensors and Real-Time Data Processing // *Sensors*. 2018. vol. 18(7). pp. 2183.
39. *Syafrudin M., Alfian G., Fitriyani N.L., Rhee J.* Performance Analysis of IoT-Based Sensor, Big Data Processing, and Machine Learning Model for Real-Time Monitoring System in Automotive Manufacturing // *Sensors*. 2018. vol. 18(9). pp. 2946.
40. *Ха В.М., Шичкина Ю.А., Костичев С.В.* Определение совокупности коллекций для баз данных типа ключ-документ по заданному набору свойств объектов и запросов к базе данных // *Компьютерные инструменты в образовании*. № (3). С. 15–28.
41. *Shichkina J., Degtyarev A., Kulik B., Fridman A.* Optimization of relational databases schemas by means of n-tuple algebra // *AIP Conference Proceedings*. 2017. vol. 1863. no. 1. pp. 11008.

Шичкина Юлия Александровна — д-р техн. наук, профессор, кафедра вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" (СПбГЭТУ "ЛЭТИ"). Область научных интересов: параллельные вычисления, базы данных и интеллектуальный анализ данных. Число научных публикаций — 88. strange.y@mail.ru; ул. Профессора Попова, 5/2, 197376, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7 812 234-25-03.

Ха Ван Муон — аспирант, кафедра вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" (СПбГЭТУ "ЛЭТИ"). Область научных интересов: параллельные вычисления, базы данных и интеллектуальный анализ данных. Число научных публикаций — 5. muon.ha@mail.ru; ул. Профессора Попова, 5/2, 197376, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +79650884495.

Поддержка исследований. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и СИТМА в рамках научного проекта №18-57-3400.

Yu. SHICHKINA, V.M. HA
**METHOD FOR CREATING COLLECTIONS WITH EMBEDDED
DOCUMENTS FOR DOCUMENT-ORIENTED DATABASES
TAKING INTO ACCOUNT EXECUTABLE QUERIES**

Shichkina Yu., Ha V.M. Method for Creating Collections with Embedded Documents for Document-oriented Databases Taking into Account Executable Queries.

Abstract. In the recent decades, NoSQL databases have become more popular day by day. And increasingly, developers and database administrators, for whatever reason, have to solve the problems of database migration from a relational model in the model NoSQL databases like the document-oriented database MongoDB database. This article discusses the approach to this migration data based on set theory. A new formal method of determining the optimal runtime searches aggregate collections with the attached documents NoSQL databases such as the key document. The attributes of the database objects are included in optimizing the number of collections and their structures in search queries. The initial data are object properties (attributes, relationships between attributes) on which information is stored in the database, and query the properties that are most often performed, or the speed of which should be maximal. This article discusses the basic types of connections (1-1, 1-M, M-M), typical of the relational model. The proposed method is the following step of the method of creating a collection without embedded documents. The article also provides a method for determining what methods should be used in the reasonable cases to make work with databases more effectively. At the end, this article shows the results of testing of the proposed method on databases with different initial schemes. Experimental results show that the proposed method helps reduce the execution time of queries can also significantly as well as reduce the amount of memory required to store the data in a new database.

Keywords: NoSQL, Database Query, Collections, Document Key, Broadcast Data, Data Format, Creating the Database Structure, Embedded Documents.

Shichkina Yulia — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Department of Computer Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Research interests: parallel computing, databases, data mining. The number of publications — 88. strange.y@mail.ru; 5/2, Professor Popov str., 197376, St. Petersburg, Russia; office phone: +7 812 234-25-03.

Ha Van Muon — Ph.D. Student, Department of Computer Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Research interests: parallel computing, database, data mining. The number of publications — 5. muon.ha@mail.ru; 5/2, Professora Popova str., 197376, St. Petersburg, Russia; office phone: +79650884495.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR and CITMA according to the research project No. 18-57-3400.

References

1. Rocha L. et al. A Framework for Migrating Relational Datasets to NoSQL. *Procedia Computer Science*. 2015. vol. 51. pp. 2593–2602.
2. Rejting baz dannyh [DB-Engines Ranking]. Rating of Databases [DB-Engines Ranking]. Available at : <https://db-engines.com/en/ranking> (accessed: 15.07.2020). (In Russ.).
3. Jose B., Abraham S. Performance analysis of NoSQL and relational databases with MongoDB and MySQL. *Materials Today: Proceedings*. 2020. vol. 24. pp. 2036–2043.
4. Čerešňák R., Kvet M. Comparison of query performance in relational a non-relation database. *Transportation Research Procedia*. 2019. vol. 40. pp 170–177.

5. Diogo M., Cabral B., Bernardino J. Consistency Models of NoSQL Databases. *Future Internet*. 2019. vol.11(2). pp. 43.
6. Chen J., Lee W. An Introduction of NoSQL Databases Based on Their Categories and Application Industries. *Algorithms*. 2019. vol. 12(5). pp. 106.
7. Diogo M., Cabral B., Bernardino J. Consistency Models of NoSQL Databases. *Future Internet*. 2019. vol. 11(2). pp. 43.
8. Li W., Clifton C., Liu S. Database Integration Using Neural Networks: Implementation and Experiences. *Knowl. Inf. Syst.* 2000. vol. 2. no. 1. pp. 73–96.
9. Storey V.C.; Song I.Y. Big data technologies and Management: What conceptual modeling can do. *Data Knowl. Eng.* 2017. vol. 108. pp. 50–67.
10. Corbellini A. et al. S. Persisting big-data: The NoSQL landscape. *Inf. Syst.* 2017. vol. 63. pp. 1–23.
11. Makris A., Tserpes K., Andronikou V., Anagnostopoulos D. A classification of NoSQL data stores based on key design characteristics. *Procedia Computer Science*. 2016. vol. 97. pp. 94–103.
12. Atzeni P., Bugiotti F., Rossi L. Uniform access to NoSQL systems. *Inf. Syst.* 2014. vol. 43. pp. 117–133.
13. Pardede E., Rahayu, J.W., Taniar D. Mapping Methods and Query for Aggregation and Association Relationship in Object-Relational Database using Collection. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC)*. 2004. pp. 539–543.
14. Shichkina Y., Kupriyanov M., Shevsky V. The Application of Graph Theory and Adjacency Lists to Create Parallel Queries to Relational Databases. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2018. vol. 10963 LNCS. pp. 61–77.
15. Robinson I., Webber J., Eifrem E. *Graph Databases: New Opportunities for Connected Data*. O'Reilly Media, Inc. 2015. 238 p.
16. Chickerur S. Comparison of Relational Database with Document-Oriented Database (MongoDB) for Big Data Applications. *8th International Conference on Advanced Software Engineering and Its Applications ASEA*. 2015. pp. 41–47.
17. Hanine M., Bendarag A., Boutkhroum O. Data Migration Methodology from Relational to NoSQL Databases. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*. 2015. vol. 9. no. 12. pp. 2566–2570.
18. Li X., Ma Z., Chen H. QODM: A Query-Oriented Data Modeling Approach for NoSQL Databases. *Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA)*. 2014. pp. 338–345.
19. Zhao G., Huang W., Liang S., Tang Y. Modeling MongoDB with Relational Model. *2013 Fourth International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies (EIDWT)*. 2013. pp. 115–121.
20. Alotaibi O., Pardede E. Transformation of Schema from Relational Database (RDB) to NoSQL Databases. *Data*. 2019. vol. 4(4). pp. 148.
21. Celesti A., Fazio M., Villari M. A Study on Join Operations in MongoDB Preserving Collections Data Models for Future Internet Applications. *Future Internet*. 2019. vol. 11(4). pp. 83.
22. Rocha L., Vale F., Cirilo E. A Framework for Migrating Relational Datasets to NoSQL. *Procedia Computer Science*. 2015. vol. 51. pp. 2593–2602.
23. Liang D., Lin Y., Ding G. Mid-model Design Used in Model Transition and Data Migration between Relational Databases and NoSQL Databases. *IEEE Int. Conf. Smart City*. 2015. pp. 866–869.
24. Hamid S., Rezapour M., Moradi M., Ghadiri N. Performance evaluation of SQL and MongoDB databases for big e-commerce data. *IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers, and Signal Processing*. 2015. pp.1–7.

25. Karnitis G., Arnicans G. Migration of Relational Database to Document-Oriented Database : Structure Denormalization and Data Transformation. 7th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN). 2015. pp. 113–118.
26. Mason R.T. NoSQL Databases and Data Modeling Techniques for a Document-oriented NoSQL Database. *Computer Science*. 2015. pp. 259–268.
27. Gu Y., Shen S., Wang J., Kim J. Application of NoSQL Database MongoDB. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). 2015. pp. 158–159.
28. Samoilov N.K. [Translation of queries from SQL to MongoDB]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii – Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technology*. 2019. vol. 3. pp. 104–111. (In Russ.).
29. Shepeleva Zh.A., Abolmasova E.S., Emelyanova E.S. [Analysis of the functioning of NOSQL technology, implemented on the example of MONGODB]. *Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendencii razvitiya i primeneniya* [Software engineering: modern trends in development and application]. 2018. pp. 113–116. (In Russ.).
30. Wang S. et al. A Distributed Storage and Access Approach for Massive Remote Sensing Data in MongoDB. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. vol. 8(12). pp. 533.
31. Marrara S., Pelucchi M., Psaila G. Blind Queries Applied to JSON Document Stores. *Information*. 2019. vol. 10(10). pp. 291.
32. Qian C. et al. GeoSOT-Based Spatiotemporal Index of Massive Trajectory Data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. vol. 8(6). pp. 284.
33. Stepovik A.N., Efanova N.V. [Analysis of relational and non-relational databases]. *Cifrovizaciya ekonomiki: napravleniya, metody, instrumenty* [Digitalization of the economy: directions, methods, tools]. 2019. pp. 414–416. (In Russ.).
34. Koroleva Yu.A., Maslova V.O., Kozlov V.K. [Development of the concept of data migration between relational and non-relational database systems]. *Programmnye produkty i sistemy – Software products and systems*. 2019. Issue 32. vol. 1. pp. 063–067. (In Russ.).
35. Višnjevac N. et al. Prototype of the 3D Cadastral System Based on a NoSQL Database and a JavaScript Visualization Application. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. vol. 8(5). pp. 227.
36. Acquaviva A et al. Forecasting Heating Consumption in Buildings: A Scalable Full-Stack Distributed Engine. *Electronics*. 2019. vol. 8(5). pp. 491.
37. Marchiori A., Li Y., Evans J. Design and Evaluation of IoT-Enabled Instrumentation for a Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff Wall. *Infrastructures*. 2019. vol. 4(1). pp. 5.
38. Alfian G. et al. A Personalized Healthcare Monitoring System for Diabetic Patients by Utilizing BLE-Based Sensors and Real-Time Data Processing. *Sensors*. 2018. vol. 18(7). pp. 2183.
39. Syafrudin M., Alfian G., Fitriyani N.L. Rhee J. Performance Analysis of IoT-Based Sensor, Big Data Processing, and Machine Learning Model for Real-Time Monitoring System in Automotive Manufacturing. *Sensors*. 2018. vol. 18(9). pp. 2946.
40. Ha V.M., Shichkina Yu.A., Kostichev S.V. [Determining the Composition of Collections for Key-Document Databases Based on a Given Set of Object Properties and Database Queries]. *Kompyuternye instrumenty v obrazovanii – Computer tools in education*. 2019. vol. 3. pp. 15–28. (In Russ.).
41. Shichkina J., Degtyarev A., Kulik B., Fridman A. Optimization of relational databases schemas by means of n-tuple algebra. AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1863. no. 1. pp. 11008.

А.М. Лях
**МИНИМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА БАЗЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ
ДАННЫХ О БИОЛОГИЧЕСКОМ РАЗНООБРАЗИИ
ОРГАНИЗМОВ**

Лях А.М. Минимальная структура базы для хранения данных о биологическом разнообразии организмов.

Аннотация. К настоящему времени накоплено огромное количество данных о разнообразии организмов. Сохранить и использовать эти данные для решения научных задач помогают базы данных. В литературе описано несколько десятков баз, предназначенных для хранения данных о биоразнообразии. Каждая имеет оригинальную структуру, которая плохо согласуется со структурами других баз, что, в свою очередь, затрудняет обмен данными и формирование массивов больших данных о биоразнообразии.

Причиной сложившейся ситуации является отсутствие формальных определений универсальных компонент, из которых можно построить базу с любыми данными о разнообразии организмов. Анализ литературы и исследования авторов показывают, что универсальные компоненты есть в характеристиках любых организмов. Например, таксономическое название организма и место его поимки. Таких компонент шесть, и они отвечают на один из шести вопросов: *что, где, когда, кто, откуда и куда*. Первые три компонента – *что, где, когда* – являются фундаментальными. Они составляют минимальную основу, которая описывает экземпляр таксона в пространственно-временных координатах. Каждой компоненте соответствует отдельная таблица базы данных. Эти таблицы связаны с таблицей данных об организме (особи) и не связаны между собой. Атрибуты связей между особью и таблицами компонент хранятся в промежуточных таблицах.

Процесс создания любой базы о разнообразии живых существ начинается с определения таблицы экземпляров организмов. Ее необходимо использовать, даже если нет явных данных об организмах. Тогда следует ввести виртуальные организмы и связать с ними остальные компоненты при помощи промежуточных таблиц. Последние стыкуются с прочими данными. Минимальные структуры всех таблиц, связи между ними и примеры построения баз данных описаны в настоящей работе.

Ключевые слова: компоненты данных, данные об организме, географическая точка, таксономическое название, библиографическая запись, биологическая коллекция, коллекционный экземпляр, метаданные.

1. Введение. Под биологическим разнообразием (биоразнообразием) понимают совокупность всех живых существ и групп организмов, населяющих определенную территорию (акваторию) или биосферу в целом. Выделяют несколько уровней биоразнообразия: генетический, индивидуальный, популяционный, таксономический, биоразнообразие сообществ и тому подобное [1, 2]. Но единственным фундаментальным уровнем биоразнообразия является разнообразие живых организмов, так как только естественные или искусственно выделенные группы организмов создают разнообразие иных уровней жизни.

Исследование биоразнообразия начинается с инвентаризации накопленных данных, которая приводит к обнаружению новых фактов

о живых существах. Совокупность добытой информации необходимо где-то хранить, желательно в структурированном виде, удобном для извлечения данных и удовлетворяющем разнообразным критериям. Такие выборки помогают решить научные задачи инвентаризации, анализа, моделирования и прогноза биоразнообразия, и следовательно, способствуют выработке рекомендаций для его сохранения. Лучше всего задачу структурированного хранения и многокритериального выбора данных помогают решить базы данных [1, 3, 4].

Существует несколько крупных хранителей данных о биоразнообразии – это обладающие богатейшими биологическими коллекциями организации, такие как МГУ (Москва) [5], Зоологический институт РАН (Санкт-Петербург) [6], Музей естественной истории (Лондон); либо организации, которые длительное время занимаются экологическим мониторингом [7]. Некоторые из них выступают с идеей объединить всю информацию о биоразнообразии в единое общедоступное информационное пространство и предлагают для этого собственные площадки [5, 6, 8]. Например, Глобальная база данных по объектам биоразнообразия (англ., Global Biodiversity Information Faculty; GBIF) предлагает исследователям разместить данные о находках организмов в глобальной базе данных [9], а взамен предоставляет унифицированный перечень полей для описания собранного материала [10] и обеспечивает доступ к данным остальных участников. Однако до сих пор существует большое число оригинальных баз данных, которые принадлежат отдельным организациям и не связаны в единую систему [11-15]. Разработчики этих продуктов чаще всего стараются решить локальную задачу и не планируют в дальнейшем включать в базу новые модули или объединять ее с другими базами. В результате накопленные данные остаются неизвестными научному сообществу, и существует опасность, что они со временем будут безвозвратно утеряны [16, 17].

Таким образом, данные о биоразнообразии востребованы, но для их детального анализа, моделирования и прогноза необходимы большие массивы. Такие массивы могут предоставить организации, которые поддерживают глобальные базы данных. Однако информационная инфраструктура, обеспечивающая работу с данными, не позволяет эффективно решить частные исследовательские задачи. Во-первых, предлагаемые форматы содержат массу ненужных для частной задачи сущностей; во-вторых, стандартизацией предлагаемых форматов занимаются большие коллективы, из-за чего внесение любых правок затянато, так как проходит длительную бюрократическую процедуру согласований; в-третьих, глобальные хранилища предполагают однократную загрузку данных, а не их динамическую модификацию; в-четвертых, переданные данные

становятся общедоступными, что нежелательно для владельца первичных, еще необработанных и неопубликованных данных. По этим и иным причинам небольшие коллективы продолжают придумывать новые структуры баз [11-15], которые оптимально подходят для текущих исследований, но плохо стыкуются друг с другом. Чтобы хоть как-то решить проблему существования огромного числа локальных БД, некоторые исследователи предлагают создать аннотированный каталог всех баз данных по биоразнообразию [17]. Но в целом задача формирования большого общедоступного массива накопленных данных об организмах остается нерешенной [17, 18].

Предположительно, основной причиной сложившейся ситуации является отсутствие формального определения универсальных компонент, из которых можно построить базу с любыми данными о разнообразии организмов. Опыт авторов по разработке многочисленных баз биологических данных и анализ существующих работ по теме показали, что универсальные компоненты можно обнаружить во всех данных, связанных с исследованием организмов. Например, в библиотеках изображений особей, в таксономических списках, в базах морфологических и морфометрических признаков и молекулярно-генетических последовательностей, в виртуальных биологических коллекциях, в базах с результатами биологического мониторинга, в библиографии с описаниями групп таксонов. Все эти коллекции содержат дополнительную информацию об организме. Так как вариантов для представления такой информации немного, то эти описания включают общие части, например название, место и время находки. Именно эти части являются элементарными кирпичиками, которые составляют фундамент любой базы данных о биоразнообразии.

Цель работы – описать структуру и связи между элементарными компонентами, из которых состоит база данных о биоразнообразии, и рассмотреть практические приемы использования этих компонент.

2. Данные о биоразнообразии. Данные о биологическом разнообразии, в первую очередь, основаны на данных об отдельном организме (особи, экземпляре, индивидууме), так как не может быть биоразнообразия без организма. При изучении разнообразия видов, генетического разнообразия, разнообразия морфологических форм и экологических группировок всегда используются первичные данные, полученные в процессе исследования конкретных особей. Поэтому характеристики экземпляров организмов являются ядром любой базы данных (БД) о биоразнообразии.

Практический опыт разработки информационных систем по биоразнообразию и анализ большого числа данных показывают, что в

характеристиках любых организмов есть общая часть. Ее содержимое делится на шесть компонент. Удобно считать, что состав компонент содержит ответ на один из вопросов: *что, где, когда, кто, откуда и куда*. *Что* – определяет название организма; *где* – место находки; *когда* – время находки; *кто* – перечисляет тех, кто имеет отношение к обнаружению и исследованию организма; *откуда* – ссылается на научные источники, откуда были взяты или где были опубликованы данные об организме; *куда* – показывает, в какую коллекцию помещен организм. Данные вопросы являются мнемоническими правилами для запоминания элементарной структуры базы данных.

Первые три компонента – *что, где, когда* – являются фундаментальными. Они составляют минимальную основу, которая описывает экземпляр таксона в пространственно-временных координатах [2]. Остальные компоненты описывают детали находки и первичного анализа особи, уточняют источники дополнительных данных и помогают отыскать экземпляр организма в материальной или виртуальной коллекциях.

3. Минимальная структура базы данных о биоразнообразии. База данных о биоразнообразии строится из элементарных компонент, каждой из которых соответствует отдельная таблица. Эти таблицы связаны с таблицей данных об особи и не связаны между собой, что подчеркивает нацеленность базы на хранение данных об организме (рис. 1).



Рис. 1. Компоненты минимальной структуры базы данных о биоразнообразии; промежуточные таблицы отмечены кружками

Компоненты связаны с особью отношениями один-ко-многим или многие-ко-многим. Для описания отношений между особью и

компонентами используются промежуточные таблицы. Эти таблицы также функционируют как стыковочные станции, к которым присоединяются таблицы с прочей информацией. Таким способом можно расширять минимальную структуру базы данных.

Структуры таблиц, связи между ними и примеры использования описаны ниже.

4. Универсальные компоненты данных об организме. Таблица с данными об особи. Характеристики живых организмов хранятся в *таблице экземпляров* (на всех рисунках обозначена как *особь*). Любой организм можно описать огромным количеством параметров. Чем более точные методы исследования мы используем, тем больше данных об организме получаем. По этой причине проблема анализа больших данных также актуальна и для данных об организме [19].

Одной из теоретических оценок возможного числа данных об организме может служить число комбинаций, которые возможно составить из всех элементарных частиц, слагающих организм. Эти данные не учитывают другие характеристики живого существа, например поведение, предпочитаемые экологические условия, взаимоотношения с другими особями. Поэтому теоретическую оценку количества разнообразных данных об организме можно смело увеличить еще на несколько порядков.

К счастью, в реальных условиях количество признаков, которые используются для характеристики организма, невелико [15]. Предлагаемая таблица с минимальной структурой описания особи содержит первичный ключ (*specm_id*) и три группы полей для фундаментальных компонент (рис. 2).



Рис. 2. Минимальная структура таблицы для описания экземпляров организмов (особей) содержит указатели на фундаментальные компоненты: название таксона, место и дату находки организмов

Все прочие данные об организме факультативны. Они хранятся или в дополнительных полях, или в других таблицах, связанных с особью, и в настоящей работе не рассматриваются.

4.1. Компонент *что* – таблица с научными названиями организмов. Все известные науке организмы отнесены к некоторым таксонам и названы таксономическими именами. Таксон – это множество организмов, объединенных по некоторым признакам. Таксоны последовательно вложены друг в друга и в совокупности образуют иерархически упорядоченное дерево. Листьями дерева таксонов являются естественные виды организмов. Не теряя общности, можно считать, что дерево является системой иерархически связанных названий таксонов, потому что любое таксономическое название – это ключ для доступа к данным об организмах.

Таблица с названиями организмов хранит дерево таксономических имен. Для удобства структура таблицы разделена на три смысловые группы полей (модулей): иерархическую, номенклатурную и атрибутивную [20] (рис. 3).

	Что Название таксона	Где Географическое место
<i>Первичный ключ</i>	taxon_id	place_id
<i>Иерархическое положение</i>	parent_id tree_level tree_path	parent_id tree_level tree_path
<i>Номенклатурные данные</i>	taxon_name taxon_author taxon_year	place_name
<i>Атрибуты</i>	status	status

Рис. 3. Структуры таблиц для названий таксонов и географических названий

Иерархическая группа полей описывает положение названия в таксономическом дереве. Для этого используется структура данных *материализованный путь* [20, 21]. Эта структура компактна и наглядна – для ее описания достаточно двух полей: путь к узлу и относительный уровень узла, который одновременно кодирует ранг таксона. Такая структура дает возможность хранить неполные ветви, в которых пропущены названия промежуточных уровней (рангов). Она также позволяет выбирать названия любого ранга, которые относятся к лю-

бому вышестоящему узлу, например названия видов из заданного класса или отряда.

Номенклатурная группа полей служит для хранения полного таксономического названия организма, удовлетворяющего требованиям таксономической номенклатуры. Она включает поля для названия таксона, авторов таксономического названия и года обнародования названия.

Атрибутивная группа полей включает одно числовое поле. Оно показывает статус таксономического имени и указывает на действующее (валидное) название, если данное название не валидно. Валидным является название, которое действует сейчас и удовлетворяет правилам одного из кодексов таксономической номенклатуры. Нулевое значение поля обозначает валидное название. Отрицательное – не валидное название, которое составлено или опубликовано с нарушением правил. Положительное значение сообщает, что данное название – синоним другого названия и это значение является ссылкой на идентификатор записи с действующим названием таксона.

Указанных трех групп полей достаточно для полноценного представления и работы с деревом таксономических имен [20].

4.2. Компонент где – таблица с географическими названиями мест находки организмов. Для предварительного указания места обнаружения организма достаточно географического названия территории. Оно понятно любому человеку лучше географических координат. Для хранения географических названий используется отдельная таблица, которая одновременно служит своеобразным справочником.

Географические названия, так же как и названия таксонов, образуют древовидную иерархию. Ее корнем является вся Земля. Она подразделяется на Мировой океан и материки, вплоть до конкретной географической точки. Так как в географии нет устоявшейся иерархии уровней, то выстроить однозначную ветвь (цепочку) географических названий достаточно сложно. С другой стороны, это не столь необходимо. В цепочке географических имен нам всегда интересна конечная точка и несколько названий верхних уровней. Например, из цепочки «бухта Провато – акватория Крыма – Черное море – (Средиземное море – Атлантический океан – Мировой океан)» можно понять, что мы говорим о бухте в Черном море на побережье Крыма. Промежуточные уровни в скобках понадобятся, когда мы захотим выбрать все морские (океанические) точки или все точки из Средиземного моря или Атлантического океана, так как Черное море относится к бассейну этих акваторий. Но и без них указание места будет понятным.

Для хранения иерархии географических имен подходит та же структура модульной таблицы БД, которая используется для названий таксонов [20]. В этой таблице иерархическая группа полей остается прежней, номенклатурная группа включает одно поле для названия местности, а поле атрибутивной группы указывает на синонимы географических названий так же, как и в случае синонимов таксономических имен (рис. 3).

4.3. Компонент *когда* – дата находки организма. Любой организм всегда пойман в одно конкретное время. Поэтому для записи времени не требуется дополнительная таблица – оно хранится непосредственно в поле таблицы экземпляров.

Однако ученые исследуют не только современное биоразнообразие, но и биоразнообразие прошлых эпох по палеонтологическим находкам [11, 22]. Датировка любых ископаемых образцов всегда примерна и обычно описывается интервалом. Поэтому для хранения диапазона ископаемых дат используется еще два поля. Так как палеонтологические даты исчисляются сотнями тысяч и миллионами лет, то они записываются в экспоненциальной форме.

Таким образом, для записи дат используется три поля: одно для точной современной даты (*date_modern*), два – для примерного датирования ископаемых образцов (*date_past_a*, *date_past_b*). Даты хранятся в таблице с описанием организмов (особей) (рис. 2).

4.4. Компонент *кто* – таблица с именами исследователей. При изучении биоразнообразия имя исследователя предоставляет определенную информацию об особенностях сбора, обработки и таксономической идентификации и анализе собранных данных. В каждой области научной деятельности есть признанные специалисты, есть начинающие исследователи и есть люди, запятнавшие свою репутацию. Поэтому, например, если записано, что виды определил исследователь А, то у специалистов может возникнуть сомнение в правильности этой идентификации, потому что большая часть его определений неверная. Или если указано, что организмы для анализа подготовил исследователь Б, то сообществу исследователей станет понятно, что его материал никоим образом нельзя сопоставлять с материалом исследователя В, так как они применяют несопоставимые методики. Таким образом, имя исследователя в данном случае является косвенным показателем качества данных.

Имена всех исследователей хранятся в соответствующей таблице имен. Имя записывается в трех полях для имени (*name*), фамилии (*family*) и отчества или прочих частей имени (*patronym*). Однако такой записи недостаточно для того, чтобы различить полных

тезок. В научном сообществе полных тезок можно отличить, например, по городу или названию организации, в которой работал человек. Если и этого недостаточно, можно использовать какую-то иную характеристику каждого человека, понятную остальным. Например, примерный возраст (старший, младший), специализацию (ихтиолог, микробиолог, малаколог, ботаник), должность. Для этих характеристик предназначено дополнительное поле (*nick*) (рис. 4).

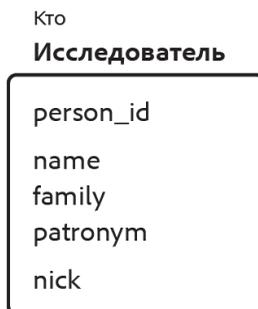


Рис. 4. Минимальная структура таблицы для хранения имен исследователей

Все остальные поля таблицы являются необязательными, а состав полей определяется конкретным назначением базы данных. Например, в таблицу можно включить поля с контактными данными человека. Однако, если база содержит исторические данные и кого-то из исследователей нет в живых, то их контактные данные будут представлять только историческую ценность.

4.5. Компонент *откуда* – таблица с публикациями. Публикации являются богатейшим источником неструктурированной информации. Крайне важно эту информацию разделить на отдельные факты и связать с организмами, которые упоминаются в публикациях. Но прежде необходимо сохранить данные о публикациях.

Библиографическая таблица хранит библиографические ссылки на публикации, а не сами публикации, потому что многие из них охраняются авторским правом. Краткая библиографическая запись состоит из фамилий и инициалов авторов (*authors*), заголовка (*title*), года опубликования (*year*), прочих выходных данных (*imprint*) и DOI (*doi*). Для описания сетевой публикации без DOI используется URL (*url*) и дата последнего обращения к документу (рис. 5). Это минимальный набор полей библиографической записи, которые можно дополнять прочими данными.

Откуда

Публикация

publ_id
authors
title
year
imprint
doi
url
request_date

Рис. 5. Минимальная структура таблицы для хранения библиографических записей

4.6. Компонент *куда* – таблица с описанием коллекций.

Биологические коллекции служат для длительного сохранения биологических объектов [23, 24], к которым в том числе относятся организмы или части организмов. Биологическая коллекция является одним из основных источников данных для исследования биоразнообразия.

Полноценное исследование биоразнообразия подразумевает депонирование найденных организмов в биологические коллекции. Это позволяет повторно использовать любую особь для уточнения морфологических, генетических, морфометрических и прочих признаков, на которые исследователь при первичном анализе организма не обратил внимание. Таким образом, биологические коллекции предотвращают утрату ценной научной информации.

Минимальная структура таблицы с описанием биологической коллекции (рис. 6) включает только уникальный (буквенно-цифровой) идентификатор (*coll_abbr*). Подобные идентификаторы (аббревиатуры) присвоены некоторым коллекциям (см. например [25]). Они помогают кратко сослаться на коллекцию, а также используются для формирования уникальных номеров коллекционных экземпляров [26]. Любая другая информация о названии коллекции, организации, которая содержит коллекцию, ответственных за коллекционные материалы, веб-адресе виртуального коллекционного ресурса и прочие сведения, является факультативной. Эти сведения дополняют минимальную структуру таблицы и в настоящей работе не рассматриваются.

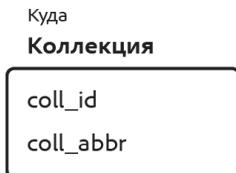


Рис. 6. Минимальная структура таблицы для описания биологической коллекции

5. Отношения между компонентами и особью. Особь связана с компонентами при помощи отношений. Свойства этих отношений описаны в дополнительных таблицах. Рассмотрим каждую из них подробнее.

5.1. Отношение что: особь – название таксона. Любому организму соответствует конкретное название таксона. Чаще всего это название вида, так как любой организм всегда стремится идентифицировать до вида. Однако даже если мы не знаем название вида, то вполне можем отнести особь к таксону более высокого ранга: роду, семейству, классу или даже царству, и впоследствии уточнить результаты определения. Например, любой образованный рыбак, поймавший барабульку у берегов Ялты, сразу же скажет ее видовое название *Mullus barbatus*, тогда как менее образованный только предположит, что это представитель отряда *Perciformes*. Таким образом, оба рыбака установили отношение между пойманным экземпляром рыбы и таксономическим названием вида или отряда.

Всегда существует однозначная связь особи с конкретным таксономическим названием. По этому названию с помощью дерева названий таксонов можно получить имена таксонов вышестоящих рангов. Поэтому в таблице экземпляров поле для названия организма содержит только ссылку на запись (идентификатор записи) с названием таксона из соответствующей таблицы (рис. 7).

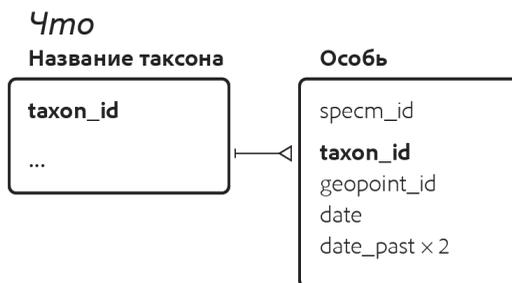


Рис. 7. Отношение между таксономическим названием и особью

5.2. Отношение *когда*: особь – дата. Это однозначное отношение и промежуточной таблицы для его хранения не требуется, так как дата записана в таблице особей (рис. 2).

Другим вариантом представления является выделение отдельной таблицы для палеонтологических дат. Такие даты относят к определенным эпохам: эоцен, миоцен, плейстоцен и так далее. Таблица будет хранить название эпохи и диапазон дат (тысячи или миллионы лет), определяющих эту эпоху.

5.3. Отношение *где*: особь – точка на карте – географическое место. Для точного описания места поимки организма недостаточно географического названия местности. Нужны дополнительные данные. К ним относятся, в первую очередь, географические координаты, а также ориентир и высота или глубина места поимки. Так как эти данные нельзя поместить в таблицу с названиями географических мест, для них используется промежуточная таблица. Она связывает особь с точкой на карте, а точку – с географическим местом. Эти связи многозначные, потому что в одной точке может быть найдено много особей и в одном районе может быть много точек (рис. 8).

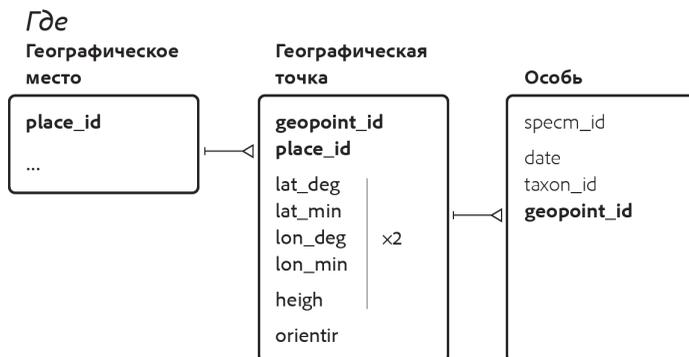


Рис. 8. Отношение между географическим местом, географической точкой и особью; ×2 означает, что указанные поля удвоены

Таблица для описания точки включает поля для географических координат, высоты или глубины и словесного описания ориентиров. Для координат предназначено восемь полей: две группы по четыре поля. В каждой группе два поля хранят градусы широты и долготы (*lat_deg*, *lon_deg*), два – десятичную запись минут (*lat_min*, *lon_min*), где отрицательные значения соответствуют южной широте и западной долготе. Две координаты позволяют записать координаты горизонтальных траловых сборов. Если обе координаты совпадают или вторые пустые – это единственная точка.

Высоты или глубины также хранятся в двух полях (*height*), где глубине соответствует отрицательное значение. Когда значения в обоих полях совпадают, они описывают одну точку; когда отличаются – вертикальный слой глубин или высот. Такие данные получаются, например, при сборе планктонных проб. Если заданы две координаты и первой координате соответствует одна глубина, а второй – другая, то такие данные опишут наклонный путь.

Ориентир записывается в отдельном поле (*orientir*) в свободной форме. Например, «проба собрана у родника в пяти метрах на северо-восток от входа в пещеру». Ориентиры помогают найти точку сборов, когда точные координаты неизвестны или их невозможно определить.

5.4. Отношение *кто: особь* – роль исследователя – исследователь. Каждый исследователь выполняет определенную роль при сборе особей. Один – отлавливает организмы, другой – определяет вид, третий – выполняет молекулярно-генетический анализ, четвертый – готовит постоянные препараты для коллекции. Очевидно, при сборе разных организмов меняются как роли, так и сами исследователи. Также один исследователь может сразу выполнять несколько функций. Например, исследователь С, в одном случае ловил лягушек, в другом – ловил и определял, в третьем – подготавливал для длительного хранения в коллекции, в четвертом – вместо него все делал исследователь З. Роли исследователей, которые принимали участие в сборе экземпляров, записываются в таблице ролей (рис. 9). В этой же таблице можно предусмотреть поля для уточнения методики сбора или анализа, для важных комментариев и прочей информации.

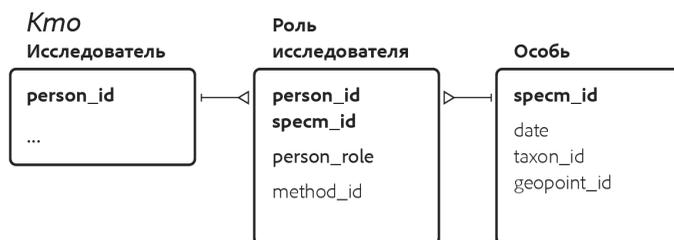


Рис. 9. Отношения между исследователем, ролью исследователя и особью

У каждого исследователя может быть несколько ролей и одной особью могут заниматься несколько исследователей, поэтому отношения между этими таблицами многие-ко-многим. Так как роли будут постоянно повторяться, то можно дополнительно хранить справочник ролей в отдельной таблице (на рисунке не показана). Таковую же таблицу можно предусмотреть для словаря с описанием методик.

5.5. Отношение *откуда*: публикация – факт – особь. Из публикаций мы черпаем факты об организмах и в публикациях мы описываем новые факты. Фактом является предложение, абзац или параграф с текстом, изображение, табличные данные. Вот, например, факт о строении представителей какого-то вида морских свободноживущих нематод: «губернакулом окружает дистальный конец спикул с дорсально направленным апофизом 30 мкм длиной».

Факты описаны в таблице фактов (рис. 10). Кроме самих фактов (*fact*) она хранит ссылки на них (*fact_ref*). Это может быть номер рисунка или таблицы, страница статьи или отсылка к конкретному параграфу. В целом ссылка уточняет, откуда и какие именно данные были извлечены из публикации.

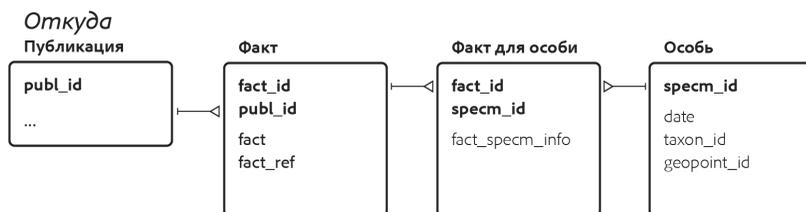


Рис. 10. Отношение между публикацией, фактом и особью

Так как любой факт может относиться к нескольким особям и каждая особь характеризуется множеством фактов из разных публикаций, то для связи особи с фактом предусмотрена еще одна промежуточная таблица (рис. 10). В ней также может быть записана информация (*fact_specm_info*), которая уточняет факт для данного организма.

5.6. Отношение *куда*: особь – коллекционный экземпляр – коллекция. Ценность любой биологической коллекции составляют экземпляры живых организмов [24]. Но таблица с описанием коллекций (рис. 6) не хранит данные о коллекционных экземплярах. Для этого предназначена вспомогательная таблица.

Минимальная структура таблицы с коллекционными экземплярами состоит из уникального коллекционного номера единицы хранения (*specm_numb*), идентификатора коллекции (*coll_id*) и особи (*specm_id*), типового статуса сохраненного экземпляра (*type_status*), сведений о цельности коллекционного образца (*specm_integrity*), о стадии развития (*ontogeny_stage*) и о состоянии хранимого объекта (*specm_condition*) (рис. 11) [14].

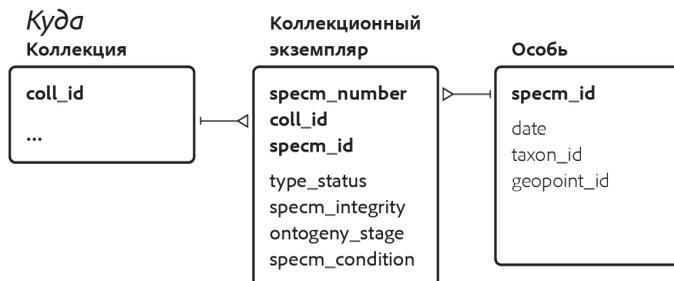


Рис. 11. Отношения между коллекцией, коллекционным экземпляром и особью

Для однозначной идентификации любого коллекционного экземпляра используют коллекционные номера [26, 27]. Коллекционный номер – это уникальная символьная метка, привязанная к коллекционному экземпляру. Она нужна для однозначной ссылки на конкретный организм при проведении научных исследований. Номер физически наносится на коллекционный экземпляр или препарат с экземпляром. Его записывают на каталожной карточке с информацией о единице хранения и используют в качестве идентификатора записи коллекционной базы данных. Таким образом, коллекционный номер служит для однозначной идентификации материальных коллекционных носителей и виртуальных информационных образов этих носителей. В таблице с коллекционными экземплярами коллекционный номер одновременно служит первичным ключом.

С одним организмом может быть связано несколько коллекционных экземпляров с разными номерами. Такая ситуация возникает, когда в коллекции хранятся части некогда целого организма и каждая часть считается отдельной единицей хранения. Например, коллекция костей стеллеровой коровы содержит множество костей некогда целого скелета, каждая из которых имеет уникальный номер и является отдельной единицей хранения [28]. Поле «цельность организма» (*specm_integrity*) как раз сообщает, часть или целый организм скрывает данный номер, а идентификатор особи (*specm_id*) позволяет выбрать все части одного организма.

С коллекционным номером соотнесен типовой статус экземпляра (*type_status*): голотип, паратип, неотип, нетиповой (ваучерный) экземпляр. Отдельное поле (*ontogeny_stage*) описывает стадию развития (онтогенеза) организма: взрослая особь, личинка, яйцо и тому подобное. Также предусмотрено поле (*specm_condition*) для данных о состоянии сохраненного объекта: отличное, хорошее, плохое.

Прочие сведения о возрасте и поле особи, типе сосуществования с другими организмами, экологических предпочтениях, не являются общими для всех живых существ и относятся к факультативным данным [14], поэтому в работе они не рассматриваются.

6. Метаданные о данных о разнообразии организмов. Метаданные – это данные о данных, краткий перечень того, что содержит база данных. Метаданные помогают выбрать из огромного разнообразия баз только те, которые содержат необходимые для исследования сведения [29]. Метаданные используют как люди, так и машины. Последние – для генерации метабаз с данными о базах данных, например, метабаза о данных о биоразнообразии [17]. Несомненно, метабаза данных удобно использовать для многокритериального поиска информации.

Предложенные компоненты минимальной базы данных о биоразнообразии (рис. 1) подходят для автоматической генерации метаданных. Они включают статичные фундаментальные компоненты с названием высших таксонов и крупных географических провинций, где собраны данные [30], краткую информацию о коллекциях, куда депонированы экземпляры организмов, и библиографические сведения о публикациях, где опубликованы данные об этих экземплярах. Помимо этого, метаданные могут содержать динамические данные о числе особей, которые собраны в указанном районе, в указанное время, депонированы в указанную коллекцию и относятся к указанному таксону. Такие метаданные генерируются в ответ на запрос и достаточно полно описывают содержимое базы данных.

7. Использование компонент для построения баз данных. Процесс создания любой базы о разнообразии живых существ начинается с определения таблицы экземпляров организмов. Ее необходимо использовать, даже если нет явных данных об организмах. Тогда следует ввести виртуальные организмы и связать с ними остальные компоненты при помощи промежуточных таблиц. Такую минимальную структуру базы данных можно расширить путем добавления новых полей к существующим таблицам или новых таблиц.

Ниже даны примеры, которые показывают, как из компонентов построить две базы с биологическими данными. Первая база помогает хранить список таксонов. Вторая предназначена для хранения описаний организмов, собранных во время морских экспедиций и депонированных в биологическую коллекцию.

7.1. Список видов, населяющих территорию. Флористические и фаунистические списки перечисляют виды организмов населяющих определенную территорию. В списке обычно присутствует два компонента: названия видов (компонент *что*) и названия местно-

сти (компонент *где*), и нет явных данных про экземпляры организмов и время находки (компонент *когда*).

Простейшим очевидным описанием списка таксонов является база, которая состоит из двух элементарных компонент: таблицы с названием таксонов связанной с таблицей с названием территорий (рис. 12а). Однако, эта структура базы является не оптимальной, так как ее центральный элемент – таблица с названиями таксонов. По этой причине такую базу данных можно дополнить только модулями, которые содержат информацию о таксонах – то есть о группе организмов, а не об отдельных организмах. Однако первичными данными для таксономических списков всегда является информация об экземплярах организмов, а не о таксонах. Следовательно, сохранить эту первичную информацию в данной базе не получится.

Правильное решение заключается в том, чтобы ввести в базу таблицу с *виртуальными экземплярами* и связать с ними все названия таксонов и территорий (рис. 12б). Виртуальные экземпляры – это особи, которые когда-то были найдены в данной местности, но подробности этих находок (и, скорее всего, сами особи) не сохранились. Известны только их таксономические названия. С помощью виртуальных экземпляров мы резервируем место для описания будущих находок и создаем структуру данных, которую впоследствии можно будет дополнить новыми информационными модулями, связанными с организмами. В качестве даты находок виртуальных экземпляров (компонент *когда*) можно использовать дату опубликования списка.



Рис. 12. Структуры баз данных для хранения списка таксонов: а) очевидная, но не оптимальная структура

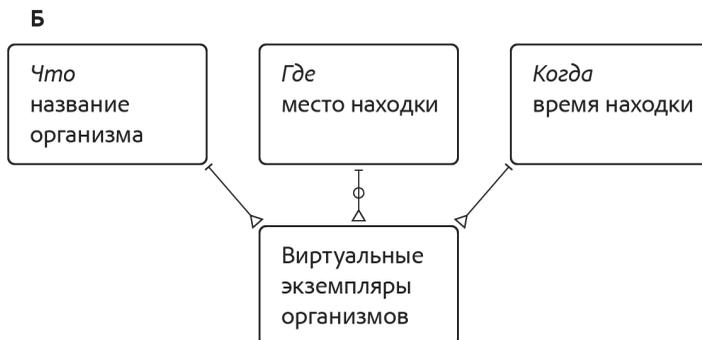


Рис. 12. Структуры баз данных для хранения списка таксонов: б) оптимальная структура с виртуальными экземплярами организмов, которые связаны с остальными компонентами

В некоторых таксономических списках приведены литературные источники, откуда извлечена информация о находке. Это еще один компонент (*откуда*), который также необходимо связать с виртуальными экземплярами. Тогда датой обнаружения организма является дата выхода соответствующей публикации.

Таким образом, любой список таксонов можно описать таблицей с виртуальными экземплярами, к которой присоединены таблицы с элементарными компонентами данных. Такое описание может быть дополнено иными информационными модулями, содержащими данные об организмах.

7.2. Морфологическая и молекулярно-генетическая коллекция организмов, собранных во время морских экспедиций. Как и в предыдущем примере, начинать проектирование структуры базы данных следует с таблицы особей (рис. 2). В данном случае каждая пойманная особь помещена в коллекцию. Следовательно, таблицу особей необходимо связать с таблицей с коллекционными экземплярами, а ее с таблицей с информацией о коллекциях. Для описания коллекционных экземпляров используем стандартный минимальный перечень полей (рис. 11).

Организмы пойманы во время морских экспедиций в конкретных точках. Такие точки в научном флоте называются станциями: у них есть географические координаты и они относятся к определенной акватории. Значит, таблицу особей следует связать с таблицей с данными о станциях, а ее с таблицей с названиями географических мест (рис. 8). В зависимости от способа лова организмы на станциях могут быть собраны с определенной глубины (батометром) или со

слоя глубин (сетию). Эти глубины хранятся в соответствующих полях (*height* на рис. 8). Таким образом, первичная структура базы данных включает таблицу особей и четыре компонента: *что, где, когда и куда* (рис. 13).



Рис. 13. Структура базы для хранения данных об организмах, собранных во время научных рейсов и депонированных в биологическую коллекцию

Морская экспедиция называется рейсом. Рейс имеет номер и связан с научно-исследовательским судном (НИС), на котором проходит экспедиция. Например, 86 рейс НИС «Профессор Водяницкий». Значит, совокупность станций, выполненных в рейсе, необходимо связать с номером рейса, а его – с судном. Учтем, что у каждой станции есть название, чаще всего – порядковый номер. Его следует сохранить в таблице с описанием географической точки в дополнительном поле. В другом поле будет записан идентификатор рейса; в третьем – дана ссылка на методику сбора проб. Таким образом, таблица географических точек (станций) состыкована с модулем данных о рейсах.

Наконец, морфометрические данные об особях (размеры, объемы тела) и молекулярно-генетические последовательности также хранятся в отдельной таблице. Но записи этой таблицы связаны не с особями, а с коллекционными экземплярами. Потому что коллекционные экземпляры – это организмы, специально подготовленные для длительного хранения, которым сопоставлен уникальный коллекционный

номер. Это позволяет использовать их повторно для уточнения и получения новых данных. Тогда как организм, не помещенный в коллекцию, чаще всего теряется, а значит, теряется и вся потенциальная информация о нем. Таким образом, таблица с коллекционными экземплярами используется для присоединения новых информационных модулей, в данном случае – таблицы с морфометрическими и молекулярно-генетическими данными.

Как можно увидеть, использование универсальных компонент помогло последовательно спроектировать базу данных (рис. 13).

8. Заключение. Минимальная структура базы для хранения данных о разнообразии организмов строится из шести универсальных компонент. Каждая из них описывает один из аспектов информации об организме: названии, месте и времени находки; исследователях, которые имеют отношение к обнаружению и анализу организма; литературных источниках, откуда были взяты или где были опубликованы факты об организме; биологической коллекции, куда помещен организм.

Ядром базы является таблица с характеристикой экземпляров организмов (особей), которая соединяется с таблицами компонент. Атрибуты связей между особью и компонентами описывают промежуточные таблицы.

В базе данных могут присутствовать не все компоненты. Состав компонент определяется задачами, для решения которых предназначена база. Минимально возможная структура базы данных состоит всего из двух таблиц: с характеристикой особи и с деревом таксономических названий.

Если стандартных компонент не хватает для описания совокупности данных, то используют дополнительные таблицы. Они присоединяются к промежуточным таблицам и не нарушают фундаментальную структуру базы.

Выделенные компоненты позволяют биологам и программистам использовать общий язык для описания объектов предметной области. Компоненты стандартизируют структуру баз данных. Их применение решает проблему совместимости данных из разных баз и помогает генерировать очевидные метаданные с описанием содержимого базы.

Литература

1. *Байков К.С. и др.* Электронные коллекции и проблемы биоразнообразия // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Вторая Всероссийская науч. конф. 2000. Т. 26. С. 58–65.
2. *Шитиков В.К., Розенберг Г.С.* Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // Количественные методы экологии и гидробиологии 2005. С. 91–129.

3. *Скарлато О.А., Старобогатов Я.И., Лобанов А.Л., Смирнов И.С.* Биоразнообразии и возможности его анализа с применением компьютерных банков данных // Биоразнообразие: Степень таксономической изученности. 1994. С. 20–43.
4. *Запевалин А.А.* Компьютерные структуры данных для решения проблем биоразнообразия // Экология моря. 2001. Вып. 57. С. 103–108.
5. *Seregin A.P.* The largest digital herbarium in Russia is now available online! // *Taxon*. 2018. vol. 67. no. 2. pp. 465–467.
6. *Pugachev O. et al.* Creation of information retrieval system on the unique research collections of the Zoological Institute RAS // *Information Technologies in the Research of Biodiversity*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. pp. 57–65.
7. *Костина Н.В.* Информационная система REGION: 25 лет развития и практического применения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17. № 4-1. С. 15–24.
8. *Лашин С.А. и др.* Информационная система по биоресурсным коллекциям институтов ФАНО России // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. № 22(3). С. 386–393.
9. *Шапков М.П., Чадин И.Ф., Иванова Н.В.* Методические рекомендации по стандартизации данных для публикации через глобальный портал gbif.org и подготовке статьи о данных // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. № 6-5(8). С. 22–35.
10. *Wieczorek J. et al.* Darwin core: an evolving community-developed biodiversity data standard // *PLoS One*. 2012. vol. 7. e29715.
11. *Jones K.E. et al.* PanTHERIA: a species-level database of life history, ecology, and geography of extant and recently extinct mammals // *Ecology*. 2009. vol. 90. no. 9. pp. 2648.
12. *Дмитриева Е.В. др.* Электронная коллекция паразитов рыб Мирового океана Института морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1. № 3. С. 27–31.
13. *Гребенников К.А.* Изучение биоразнообразия заповедников России в цифровой эпохе: опыт и перспективы // *Nature Conservation Research*. Заповедная наука. 2016. Т. 1. № 2. С. 1–10.
14. *Лях А.М.* Структура базы данных для виртуальных биологических коллекций // *Системы контроля окружающей среды*. 2019. № 3 (37). С. 29–34
15. *Schneider F.D. et al.* Towards an ecological trait-data standard // *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. vol. 10. pp. 2006–2019.
16. *Specht A. et al.* A story of data won, data lost and data re-found: the realities of ecological data preservation // *Biodiversity Data Journal*. 2018. vol. 6. e28073.
17. *Blair J. et al.* Towards a catalogue of biodiversity databases: An ontological case study // *Biodiversity Data Journal*. 2020. vol. 8. e32765.
18. *Parr C.S., Guralnik R., Cellinese N., Page R.D.M.* Evolutionary informatics: unifying knowledge about the diversity of life // *Trends in Ecology and Evolution*. 2012. vol. 27. no. 2. pp. 94–103.
19. *La J.S., Williams K.J., Moritz C.* Biodiversity analysis in the digital era // *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 2016. vol. 371. no. 1702. pp. 2150337.
20. *Лях А.М., Лелеков С.Г.* Модульная структура таксономической базы данных // *Электронные информационные системы*. 2018. № 2. С. 59–70.
21. *Лобанов А.Л. и др.* Эволюция стандарта ZOOCOD – концепция отражения зоологических иерархических классификаций в плоских таблицах реляционных баз данных // *Труды 10-й Всероссийской научной конференции «Электронные биб-*

- лиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2008. С. 326–332.
22. *Jackson J.B.C., Johnson K.G.* Measuring past biodiversity // *Science*. 2001. 293. pp. 2401–2404.
 23. *Каменский П.А., Сазонов А.Э., Федянин А.А., Садовничий В.А.* Биологические коллекции: стремление к идеалу // *Acta Naturae*. 2016. Т. 8. № 2(29). С. 6–10.
 24. *Чеченкина Т.В., Сотникова М.В.* Можно ли оценить бесценное? К вопросу о сравнении стоимости научных коллекций // *Управление наукой и наукометрия*. 2019. Т. 14. № 4. 17 p.
 25. *Sabaj M.H.* Standard symbolic codes for institutional resource collections in herpetology and ichthyology: an Online Reference. Version 6.5. URL: asih.org/sites/default/files/documents/symbolic_codes_for_collections_v6.5_2016.pdf (дата обращения: 22.06.2020).
 26. *Лях А.М.* Уникальные семантические номера экземпляров биологических коллекций // *Системы контроля окружающей среды*. 2019. № 2(36). С. 43–50.
 27. *Guntsch A. et al.* Actionable, long-term stable and semantic web compatible identifiers for access to biological collection objects // *Database*. 2017. vol. 2017. 9 p.
 28. *Касаткин М.В., Иванов А.П.* Коллекция костей стеллеровой коровы *Hydrodamalis gigas* в Государственном биологическом музее имени К.А. Тимирязева // *Зоологические исследования*. 2018. № 20. С. 60–66.
 29. *Michener W.K.* Meta-information concepts for ecological data management // *Ecological Informatics*. 2006. vol. 1. no. 1. pp. 3–7.
 30. *Berendsohn W.G., Seltman P.* Using geographical and taxonomic metadata to set priorities in specimen digitization // *Biodiversity Informatics*. 2010. vol. 7. no. 2. pp. 120–129.

Лях Антон Михайлович — канд. биол. наук, старший научный сотрудник, отдел экологической паразитологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБИОМ). Область научных интересов: таксономические информационные системы и базы данных, компьютерные определители организмов, морфологический анализ биологических форм. Число научных публикаций — 50. me@antonlyakh.ru; пр. Нахимова, 2, 299011, Севастополь, Россия; р.т.: +7(8692)55-09-12.

Поддержка исследований. Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБИОМ № АААА-А18-118020890074-2 и при поддержке РФФИ и города Севастополя по проектам № 18-44-920024 и № 20-44-920004.

A. LYAKH
**MINIMAL STRUCTURE OF THE DATABASE FOR STORING
ORGANISMS' BIODIVERSITY DATA**

Lyakh A. Minimal Structure of the Database for Storing Organisms' Biodiversity Data.

Abstract. To date, a huge amount of data on organisms diversity has been accumulated. Databases help to store and use these data for scientific purposes. There exists several dozens of databases for storing biodiversity data that were described in publications. Each has an original structure which badly correlates with the structures of other databases. This complicates data exchange and the formation of big biodiversity data array.

The cause of this situation is the lack of the formal definitions of universal data components, which allow to build the database with any data on the diversity of organisms. The analysis of publications and author's experience show that such universal components are present in the characteristics of any organisms. For example, it is an organism taxonomic name and a location where it was found. There are six such components and they answer to one of the six questions: *what*, where, when, who, where from and where to. *What* determines the name of an organism; *where* determines the location where it was found; *when* indicates the date of finding; *who* enumerates the persons, who found and analyzed an organism; *where* from refers to publications, where data about an organism are extracted or published; *where to* shows in which biological collection an organism is put in.

Each component corresponds to a separate database table. These tables are linked to the table with data about organism (individual) and they are not linked with each other. Attributes of the links between the organism table and the component tables are stored in intermediate tables. They are used, for example, to store bibliographic facts, descriptions of collection items or geographical points. They also act as docking stations to which tables with any other information are attached.

The creation of any database about the diversity of living organisms begins with the definition of the table of organism specimens. It must be used even if there is no explicit data on organisms. In that case virtual organisms should be introduced and the other components should be linked with them by means of intermediate tables. The latter are docked to other data. Minimal structures of all the tables, links between them and examples of databases construction are described in the work.

Keywords: Data Components, Organism Data, Geographical Point, Taxonomic Name, Bibliographic Record, Biological Collection, Collection Item, Metadata.

Lyakh Anton — Ph.D., Senior Researcher, Department of Ecological Parasitology, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (IBSS). Research interests: taxonomical informational systems and databases, computer identification keys, morphological analysis of biological shapes. The number of publications — 50. me@antonlyakh.ru; 2, Nahimova av., 299011, Sevastopol, Russia; office phone: +7(8692)55-09-12.

Acknowledgements. This work was supported by the scientific research theme of the Institute of Biology of the Southern Seas No AAAA-A18-118020890074-2 and by RFBR and Government of the Sevastopol according to the research project No 18-44-920024 and 20-44-920004.

References

1. Baikov K.S. et al. [Electronic collections and biodiversity issues] *Elektronnyye biblioteki: perspektivnyye metody i tehnologii, elektornnyye kollektsii*. Vtoraya Vseross. nauch. konf. [Electronic libraries: advanced methods and technologies, electronic col-

- lections. Second all-Russian scientific conference]. 2000. Issue 26. pp. 58–65. (In Russ.).
2. Shitikov V.K., Rozenberg G.S. *Otsenka bioraznoobraziya: popytka formalnogo obobshcheniya*. [Biodiversity assessment: an attempt of formal generalization]. *Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii* [Quantitative methods of ecology and hydrobiology] 2005. pp. 91–129. (In Russ.).
 3. Skarlato O.A., Starobogatov Ya.I., Lobanov A.L., Smironov I.S. *Bioraznoobrazie I vozmozhnosti ego analiza s primeneniem komputernykh bankov dannykh*. [Biodiversity and the possibilities for its analysis using computer data banks]. *Bioraznoobrazie: Stepen taxonomicheskoy izuchennosti*. 1994. pp. 20–43. (In Russ.).
 4. Zapevalin A.A. [Computer Data Structures for Biodiversity Problems Solving]. *Ecologiya Morya – Ecology of the Sea*. 2001. vol. 57. pp. 103–108. (In Russ.).
 5. Seregin A.P. The largest digital herbarium in Russia is now available online! *Taxon*. 2018. vol. 67. no. 2. pp. 465–467.
 6. Pugachev O. et al. Creation of information retrieval system on the unique research collections of the Zoological Institute RAS. *Information Technologies in the Research of Biodiversity*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. pp. 57–65.
 7. Kostina N.V. [Information system REGION: 25years of development and practical application]. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo centra RAN – News of Samara Scientific Center*. 2015. Issue 17. vol. 4-1. pp. 15–24. (In Russ.).
 8. Lashin S.A. et al. [An integrated information system on bioresource collections of the FASO of Russia]. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii – Vavilov Journal of Genetics and Select*. 2018. vol. 22(3). pp. 386393. (In Russ.).
 9. Shashkov M.P., Chadin I.F., Ivanova N.V. [Guide to best practices on a data standardization for publication via the global portal gbif.org and preparing data paper]. *Trudy Kolskogo Nauchnogo Centra RAN – Proc. of the Kolsky Scientific Center of RAS*. 2017. vol. 6-5(8). pp. 22–35. (In Russ.).
 10. Wicczorek J. et al. Darwin core: an evolving community-developed biodiversity data standard. *PLoS One*. 2012. vol. 7. e29715.
 11. Jones K.E. et al. PanTHERIA: a species-level database of life history, ecology, and geography of extant and recently extinct mammals. *Ecology*. 2009. vol. 90. no. 9. pp. 2648.
 12. Dmitrieva Ye.V. et al. [The electronic collection of the World Ocean fish parasites maintained by Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS]. *Morskoy biologicheskij zhurnal – Marine Biological Journal*. 2016. Issue 1. vol. 3. pp. 27–31. (In Russ.).
 13. Grebennikov K.A. [Study of biodiversity of nature reserves of the Russia in the digital age: experience and perspectives]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka – Nature Conservation Research. Conservation science*. 2016. Issue 1. vol. 2. pp. 1–10. (In Russ.).
 14. Lyakh A.M. [Database structure for virtual biological collections]. *Sistemy Controlya Okruzhayushey Sredy – Environmental Control Systems*. 2019. vol. 3(37). pp. 29–34. (In Russ.)
 15. Schneider F.D. et al. Towards an ecological trait-data standard. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. vol. 10. pp. 2006–2019.
 16. Specht A. et al. A story of data won, data lost and data re-found: the realities of ecological data preservation. *Biodiversity Data Journal*. 2018. vol. 6. e28073.
 17. Blair J. et al. Towards a catalogue of biodiversity databases: An ontological case study. *Biodiversity Data Journal*. 2020. vol. 8. e32765.

18. Parr C.S., Guralnik R., Cellinese N., Page R.D.M. Evolutionary informatics: unifying knowledge about the diversity of life. *Trends in Ecology and Evolution*. 2012. vol. 27. no. 2. pp. 94–103.
19. La J.S., Williams K.J., Moritz C. Biodiversity analysis in the digital era. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 2016. vol. 371. no. 1702. pp. 2150337.
20. Lyakh A.M., Lelekov S.G. [The modular structure of a taxonomic database]. *Elektronnyye Informatsionnyye Sistemy – Electronic Information Systems*. 2018. vol. 2. pp. 59–70. (In Russ.).
21. Lobanov A.L. et al. [ZOOCOD standard evolution – the concept of the reflection of zoological hierarchical classifications in flat tables of relational databases]. *Trudy 10 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii “Elektronnyye biblioteki: perspektivnyye metody i tekhnologii, elektronnyye kolleksii” – RCDL’2008*. [Proc. of 10th all-russian scientific conference “Electronic libraries, innovative methods and technologies, electronic collections”]. 2008. pp. 326–332. (In Russ.).
22. Jackson J.B.C., Johnson K.G. Measuring past biodiversity. *Science*. 2001. vol. 293. pp. 2401–2404.
23. Kamenski P.A., Sazonov A.E., Fedyanin A.A., Sadovnichy V.A. [Biological collections: chasing the ideal]. *Acta Naturae*. 2016. Issue 8. vol. 2(29). pp. 6–10. (In Russ.).
24. Chechenkina T.V., Sotnikova M.V. [Is it possible to estimate the value of invaluable? More on the ranking of scientific collections by value]. *Upravlenie naukoy i naukometriya – Science Governance and Scientometrics*. 2019. Issue 14. vol. 4. (In Russ.).
25. Sabaj M.H. Standard symbolic codes for institutional resource collections in herpetology and ichthyology: an Online Reference. Version 6.5. Available at: asih.org/sites/default/files/documents/symbolic_codes_for_collections_v6.5_2016.pdf (accessed: 22.06.2020).
26. Lyakh A.M. [Unique semantic numbers of biological collection items for databases]. *Sistemy Kontrolya Okruzhayushey Sredy – Environmental Control Systems*. 2019. vol. 2(36). pp. 43–50. (in Russ.).
27. Guntsch A. et al. Actionable, long-term stable and semantic web compatible identifiers for access to biological collection objects. *Database*. 2017. vol. 2017. 9 p.
28. Kasatkin M.V., Ivanov A.P. Collection of bones of Steller’s sea cow *Hydrodamalis gigas* in the Tmiryazev State Biological Museum (Moscow). *Zoologicheskie Issledovaniya – Zoological Studies*. 2018. vol. 20. pp. 60–66. (In Russ.).
29. Michener W.K. Meta-information concepts for ecological data management. *Ecological Informatics*. 2006. vol. 1. no. 1. pp. 3–7.
30. Berendsohn W.G., Seltman P. Using geographical and taxonomic metadata to set priorities in specimen digitization. *Biodiversity Informatics*. 2010. vol. 7. no. 2. pp. 120–129.

М.В. ИВАНОВ, И.В. КАЛАШНИКОВ, М.М. НУРУЛЛАЕВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ СЕТИ
ИНТЕРНЕТ НА ОСНОВЕ МЕТАГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

Иванов М.В., Калашников И.В., Нуруллаев М.М. Исследование структурных свойств сети Интернет на основе метаграфовых моделей.

Аннотация. При исследовании сети Интернет ее структуру разделяют на уровни: уровень автономных систем, уровень точек присутствия операторов связи, уровень оборудования и так далее. На каждом из них глобальная сеть может быть описана в виде графа на основании исходных данных, получаемых из открытых источников. Рассмотрение сети в рамках отдельного уровня упрощает анализ, однако не позволяет системно оценить ее структурные свойства при решении задач обеспечения связности нескольких сегментов сети, относящихся, в частности, к объектам критической информационной инфраструктуры. Для преодоления этого противоречия разработана математическая модель глобальной сети на стыке уровня автономных систем и уровня точек присутствия операторов связи в виде метаграфа, которая учитывает особенности каждого из уровней и позволяет находить «узкие» места как в системе междоменной маршрутизации, так и в топологии внутренних сетей интернет-провайдеров.

На основе предложенной модели описаны некоторые структурные феномены глобальной сети: тупиковые, многоинтерфейсные и транзитные автономные системы, контент-провайдеры. С учетом доступных в открытых источниках данных о структуре сети Интернет предложен способ построения метаграфа. Проведен сравнительный анализ инструментов, автоматизирующих процесс анализа модели сети. Сформулированы ориентированные на практику задачи поиска разрезающего подмножества в метаграфе. Определены направления дальнейших исследований – программная реализация инструментов анализа структуры глобальной сети с использованием общедоступного модуля MGtoolkit на языке Python и оценивание структурных феноменов российского сегмента сети Интернет.

Ключевые слова: сеть Интернет, автономная система, точка присутствия оператора связи, маршрутизация, BGP, метаграф, разрезающее подмножество, Python, MGtoolkit, объекты критической информационной инфраструктуры.

1. Введение. Сеть Интернет представляет собой инфокоммуникационный фундамент современного общества и является объектом исследования специалистов в области связи, информационной безопасности, маркетинга, социологии и других отраслей знаний. Причинами, по которым интерес к глобальной сети не ослабевает, являются ее количественные и качественные изменения. С одной стороны, растет количество пользователей, появляются новые дата-центры и линии связи, изменяется множество телекоммуникационных протоколов (используемый сегодня де-факто стек протоколов с трудом описывается какой бы то ни было эталонной моделью взаимодействия). С другой стороны, появляются новые подходы к оптимизации трафика в глобальной сети, и наряду с уже ставшими привычными пиринговыми сетями и сетями доставки контента (Content Delivery Network, CDN)

появляются новые парадигмы построения глобальной сети: контент-ориентированные сети (Content Centric Networking), сети именованных данных (Named Data Networking), программно-конфигурируемые сети (Software Defined Networks, SDN) и другие.

Настоящая работа может быть охарактеризована как постановочная, ее цель – показать возможность применения математического аппарата метаграфов для построения описательных моделей сети Интернет. Создание таких моделей и изучение их свойств позволит решить задачи структурного анализа существующих сетей на предмет их устойчивости в условиях деструктивных воздействий, а в дальнейшем перейти к созданию прогнозных моделей поведения сетей, в частности, спрогнозировать появление новых связей между интернет-провайдерами.

Для достижения цели необходимо провести анализ текущего состояния области исследования и анализ источников исходных данных, формально описать метаграфовую модель глобальной сети на смежных уровнях, разработать способ построения метаграфа на основе данных из открытых источников и предложить некоторые варианты использования предложенной модели.

2. Текущее состояние области исследования. Структура современной глобальной сети очень сложна и для анализа ее целесообразно декомпозировать на уровни. Как выделить эти уровни? И если рассматривать сеть в виде графа, какие сущности будут описываться вершинами, а какие – ребрами графа на каждом из уровней?

Традиционно сеть рассматривается через призму какой-либо эталонной модели, например OSI или TCP/IP. Это позволяет создавать микромодели глобальной сети, описывающие технические и технологические аспекты взаимодействия сетевых узлов. Для построения макромоделей они не подходят, поскольку не учитывают объективные особенности построения сетей интернет-провайдеров и их взаимодействия.

При выборе средств моделирования и анализа сложной системы рационально отталкиваться не от других ее моделей, а от реальных свойств объекта исследования. Согласно этому утверждению в сети Интернет выделяют четыре взаимосвязанных уровня [1]: уровень межсетевых протоколов (Internet Protocol, IP), уровень маршрутизаторов, уровень точек присутствия (Point of Presence, PoP) и уровень автономных систем (AC, Autonomous System, AS).

Уровень IP (IP Level) описывает глобальную сеть как множество узлов, способных передавать друг другу данные посредством сетевых интерфейсов, идентифицируемых IP-адресами. При решении большинства практически значимых задач используется информация о сети

именно на уровне IP. Поскольку один маршрутизатор может иметь до нескольких сотен интерфейсов, множество вершин на IP Level могут относиться к одному физическому устройству.

На уровне маршрутизаторов (Router Level) сеть представима в виде графа, вершинами которого являются сетевые устройства третьего уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем, осуществляющие продвижение (forwarding) пакетов. К таковым относятся собственно маршрутизаторы и маршрутизирующие коммутаторы. В открытом доступе нет достоверных и полных источников данных о структуре сети на Router Level, поэтому для исследования этого уровня применяются различные методики объединения нескольких IP Level-вершин в одну Router Level-вершину. Множество таких устройств разных провайдеров размещаются на специальных технических площадках – точках присутствия.

Уровень точек присутствия (PoP Level) позволяет осветить вопрос физического размещения сетевых устройств. Именно на этом уровне понятия географический масштаб сети оператора связи и его ниша на рынке телекоммуникационных услуг, однако информация о PoP распространяется операторами связи очень ограниченно. По аналогии с уровнем маршрутизаторов для изучения данного уровня применяются различные методики взаимоувязки Router Level-вершин.

Уровень автономных систем (AS Level) является наиболее общим и позволяет представить сеть не как совокупность устройств и линий связи, а как совокупность провайдеров со своими интересами. Именно на этом уровне, анализируя маршрутную политику, можно попытаться понять весь спектр экономических отношений между ними. Существует несколько актуальных и доступных источников информации о взаимосвязях автономных систем.

Однако рассмотрение структуры сети на отдельно взятом уровне может привести к неверным выводам, поскольку:

- не в полной мере учитываются экономические особенности межпровайдерских отношений, выражающиеся в гибридной (hybrid) маршрутной политике, когда два интернет-провайдера на различных точках присутствия анонсируют друг другу различные множества маршрутов, или префикс-ориентированной (prefix-specific) маршрутной политике, когда маршрут выбирается в зависимости от адреса источника;

- правила выбора глобальных маршрутов не всегда соответствуют описанным в руководящих документах (RFC и прочих), по некоторым оценкам от 14 до 35 % фактически наблюдаемых междоменных маршрутов отличаются от потенциальных маршрутов, рассчитан-

ных только на основе знания структуры глобальной сети на уровне автономных систем [2]. Зачастую сильное влияние оказывают оверлейные сети [3];

– системы управления оптическими транспортными сетями и системы управления качеством обслуживания абонентов (балансировка трафика, traffic engineering) начинают работать согласованно под управлением SDN-контроллеров [4].

С другой стороны, одновременное исследование сети на нескольких уровнях затруднено по следующим причинам:

– неоднозначность взаимного соответствия данных о структуре глобальной сети на IP Level и Router Level [5], а также на AS Level и PoP Level [6-8];

– невысокая полнота и достоверность данных о структуре сетей на PoP Level и Router Level [9, 10];

– большие объемы исходных данных [11].

3. Анализ источников исходных данных. Возможным направлением получения новых знаний о глобальной сети является исследование стыка двух уровней – уровня АС и уровня точек присутствия операторов.

Автономная система – это совокупность маршрутизируемых диапазонов IP-адресов под единым административным управлением с общей, однозначно определенной политикой маршрутизации. Другими словами, АС – это сеть интернет-провайдера (Internet Service Provider, ISP). Деление глобальной сети на АС позволяет разделить глобальную систему маршрутизации на области с четким внутренним контролем и относительно высокой степенью безопасности и на «межоблачное» пространство, основанное на кооперации и взаимодоверии [12].

Каждая АС имеет уникальный номер и управляет как минимум одним диапазоном IP-адресов. Например, AS12389 (здесь и далее перед номером АС будет написана аббревиатура AS) ROSTELECOM управляет 954 диапазонами, а AS34629 ORNRRU – только шестью. В середине 1990-х годов было зарегистрировано около 1000 АС, а по состоянию на июль 2020 года – более 110 000 АС.

На AS Level структура сети известна в рамках системы междоменной маршрутизации, а в качестве источника исходных данных целесообразно использовать системы сбора маршрутной информации (ССМИ) [13-15]. ССМИ предоставляют доступ к собранным ими данным через веб-интерфейс, проприетарные утилиты или в виде файлов, доступных по протоколу File Transfer Protocol (FTP). Файлы делятся на два типа: файлы с «сырыми» маршрутными объявлениями (пакеты типа BGP-Update) и файлы с актуальными таблицами маршрутизации –

результатом обработки пакетов BGP-Update на том или ином пограничном маршрутизаторе (AS Border Router, ASBR). Для анализа данных применяются общедоступные инструменты [16, 17].

В результате анализа исходных данных сеть может быть представлена как граф (далее – АС-граф), вершинами которого являются АС, а ребрами – пары АС, возникающие при объявлениях маршрутов между АС по протоколу BGP [18]. Поскольку система маршрутизации в сетях IP работает от адреса назначения, АС-граф является направленным: направления ребер совпадают с направлением передачи трафика и противоположны направлению объявления маршрутов между АС [19]. На рисунке 1 проиллюстрирован процесс создания АС-графа на основе атрибута AS_PATH из пакета BGP-Update. Поскольку АС-граф формируется в результате рассылки маршрутного объявления до конкретного IP-префикса, количество АС-графов совпадает с количеством анонсируемых в глобальной сети IP-префиксов. В этой ситуации связь между двумя АС может присутствовать в одном АС-графе и отсутствовать в другом. На практике это проявляется либо в форме гибридной, либо в форме префикс-ориентированной маршрутной политики интернет-провайдеров [2].

- ♣ Border Gateway Protocol - UPDATE Message
 - Marker: ffffffffffffffffffffffffffffffffff
 - Length: 118
 - Type: UPDATE Message (2)
 - Withdrawn Routes Length: 0
 - Total Path Attribute Length: 91
 - ♣ Path attributes
 - ▷ Path Attribute - ORIGIN: IGP
 - ▷ Path Attribute - AS_PATH: (3257 3491 20485 28840)
 - ▷ Path Attribute - NEXT_HOP: 188.128.104.51
 - ▷ Path Attribute - MULTI_EXIT_DISC: 0
 - ▷ Path Attribute - LOCAL_PREF: 200
 - ▷ Path Attribute - COMMUNITIES: 3257:8077 3257:30276
 - ▷ Path Attribute - ORIGINATOR_ID: 188.128.104.51
 - ▷ Path Attribute - CLUSTER_LIST: 0.0.2.224
 - ♣ Network Layer Reachability Information (NLRI)
 - ▷ 178.207.32.0/19

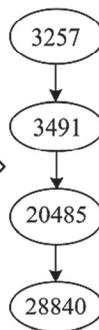


Рис. 1. Использование протокола BGP для синтеза АС-графа

Понятие *точка присутствия* не стандартизовано, но в большинстве случаев под ней понимается географически сосредоточенная совокупность коммутационного оборудования оператора связи, к которому возможно подключение клиентов [20].

На PoP Level ситуация с получением исходных данных для исследования отличается, поскольку обычно у интернет-провайдеров нет необходимости делиться с кем-либо информацией о структуре своей внутренней сети. Несмотря на это, крупные и средние провайдеры, которые проводят открытую или выборочную политику пиринга, размещают в открытом доступе ограниченные сведения о точках присутствия, на которых они технически способны организовывать обмен inter-AS трафиком [21, 22]. В этом случае для каждой точки присутствия известен почтовый адрес и/или географические координаты, однако топология внутренней сети провайдера остается неизвестной. В контексте настоящего исследования будем считать, что все точки присутствия, относящиеся к данной АС, попарно взаимно достижимы.

Неотъемлемой частью современной транспортной инфраструктуры глобальной сети являются точки обмена трафиком (Internet eXchange Point, IXP). IXP зачастую не является «точкой», фактически это совокупность технологических площадок в рамках города или страны, которые соединены высокоскоростными каналами передачи данных [23] и предназначены для организации межсетевого взаимодействия интернет-провайдеров. Внутренняя структура сети IXP скрыта от участников обмена трафиком, поэтому для них она и является «точкой»: имея оборудование лишь на одной PoP точки обмена трафиком, ее участники соединены со всеми другими участниками, которые физически подключены на других PoP.

Анализ указанных выше источников исходных данных позволяет утверждать, что структура глобальной сети на стыке AS Level и PoP Level характеризуется перечисленными ниже особенностями.

Утверждение 1: любая АС имеет как минимум одну PoP, поскольку в противном случае сеть не имеет возможности обмениваться трафиком с другими сетями и не может являться частью глобальной сети. Неполнота знаний внешнего наблюдателя о точках присутствия операторов связи не влияет на их объективное существование.

Утверждение 2: АС-граф является связным, поскольку любая АС имеет BGP-связность как минимум с одной отличной от нее АС.

4. Математическая модель глобальной сети, учитывающая особенности AS Level и PoP Level. Приведенные особенности позволяют утверждать, что глобальная сеть на стыке AS Level и PoP Level является сложной системой, включающей в себя элементы разных типов. Для описания структуры подобной системы предлагается использовать обобщение понятий граф и гиперграф – метаграф.

Использование метаграфовых моделей для описания телекоммуникационных сетей впервые было предложено в работе [24], в кото-

рой вводится понятие *метасеть* при описании интрасетей. Также известны примеры успешного применения метаграфовых моделей в других отраслях знаний: при планировании маршрутов путешествий [25], исследовании социальных взаимосвязей [26], оценивании семантической близости объектов [27].

Поскольку теория метаграфов является не окончательно сформированной и развивается, формальные определения даны согласно [28].

Определение 1. Порождающее множество метаграфа – это множество элементов, которые представляют собой объекты исследования и которые входят в ребра метаграфа:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

Определение 2. Ребро e в метаграфе – это пара $e = \langle V_e, W_e \rangle \in E$ (где E это множество ребер), состоящая из *in*-вершины $V_e \subset X$ и *out*-вершины $W_e \subset X$, каждая из которых может содержать любое количество элементов. Каждый элемент в *in*-вершине (*out*-вершине) является *совходом* (*совыходом*) для других элементов.

Определение 3. Метаграф $S = \langle X, E \rangle$ – это пара, заданная порождающим множеством X и множеством ребер E , которые определены на порождающем множестве.

При исследовании структурных свойств сети Интернет на стыке AS Level и PoP Level определим:

– множество точек присутствия интернет-провайдеров как порождающее множество:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}; \quad (2)$$

– множество АС сети Интернет как множество *in*-вершин (*out*-вершин):

$$A^{AS} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}. \quad (3)$$

Каждая *in*-вершина (*out*-вершина) является подмножеством порождающего множества согласно утверждению 1: $a_m \subset P^{PoP}$;

– множество ребер метаграфа как множество ребер АС-графа:

$$E^{AS} = \{e_1, e_2, \dots, e_i\}. \quad (4)$$

– метаграф $S^{AS_PoP} = \langle P^{PoP}, A^{AS} \rangle$ является связным согласно утверждению 2.

Введем индикаторную функцию, определяющую принадлежность АС к точке присутствия, и функцию отображения АС на множество точек присутствия:

$$\text{is_AS_on_pop}(a_m, p_n) = \begin{cases} 1, & \text{если оборудование } a_m \text{ расположено на } p_n, \\ 0 & \text{- в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{get_pop_of_AS}(a_m) = P^{a_m}, \quad (6)$$

где $P^{a_m} \subset P^{PoP}$ и $\text{is_AS_on_pop}(a_m, p_n) = 1, \forall p_n \in P^{a_m}$.

Поскольку одной из целей работы является оценивание географического расположения АС, введем индикаторную функцию, определяющую принадлежность точки присутствия к стране, и функцию отображения страны на множество точек присутствия:

$$\text{is_pop_in_country}(p_n, c_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } p_n \text{ расположена в стране } c_i, \\ 0 & \text{- в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{get_pop_of_country}(c_i) = P^{c_i}, \quad (8)$$

где $P^{c_i} \subset P^{PoP}$ и $\text{is_pop_in_country}(p_n, c_i) = 1, \forall p_n \in P^{c_i}$.

Для пояснения предложенной математической модели целесообразно описать с помощью нее некоторые феномены структуры сети Интернет в порядке возрастания их сложности [29].

Подключение тупиковой АС к сети Интернет. Тупиковые (stub) АС подключены к единственной вышестоящей (uplink) АС: uplink обеспечивает доставку исходящего трафика из stub в глобальную сеть и входящего трафика из глобальной сети в stub. В предельном случае stub АС имеет единственную точку присутствия (рис. 2) и выражения (2)-(4) примет следующий вид:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\}; \quad E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2\}, \{p_1\}\}\}.$$

Такая модель подключения характерна для мелких организаций, не предъявляющих высоких требований к надежности соединения с сетью Интернет. Такие организации, как правило, не имеют разветвленной локальной сети и географически сосредоточены.

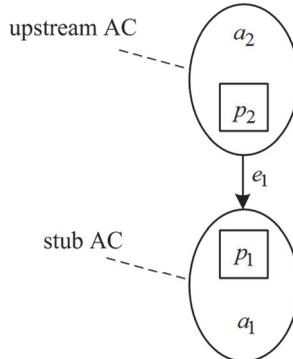


Рис. 2. Метаграф, описывающий подключение тупиковой АС к сети Интернет (вариант с одной PoP)

Если сеть организации развернута в масштабах района или города (что характерно для провайдеров «последней мили») и для нее важна бесперебойная связь с глобальной сетью, используется резервирование соединений с uplink. Возможны следующие варианты резервирования:

– одна точка присутствия stub подключена к нескольким точкам присутствия uplink. Резервируются каналы связи до uplink и оборудование uplink, но не оборудование stub (рис. 3а):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\};$$

$$E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2, p_3\}, \{p_1\}\}\};$$

– несколько точек присутствия stub подключены к одной точке присутствия uplink. Резервируются каналы связи до uplink и оборудование stub, но не оборудование uplink (рис. 3б):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\};$$

$$E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2\}, \{p_1, p_3\}\}\};$$

– несколько точек присутствия stub подключены к нескольким точкам присутствия uplink. Резервируются каналы связи до uplink и оборудование обеих АС (рис. 3в):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2\};$$

$$E^{AS} = \{e_1\} = \{\{\{p_2, p_3\}, \{p_1, p_4\}\}\}.$$

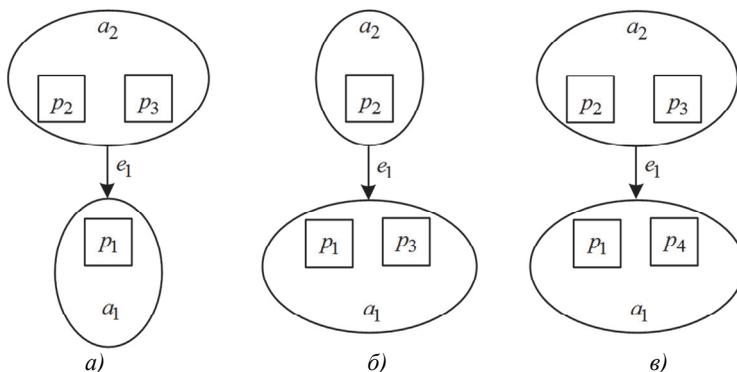


Рис. 3. Метаграф, описывающий подключение тупиковой АС к сети Интернет (вариант с несколькими РоР)

Подключение многоинтерфейсной АС к сети Интернет. Рассмотренный ранее вариант обеспечивает резервирование на уровне линий связи, однако не обеспечивает надежного соединения АС с глобальной сетью в том случае, если деградирует система междоменной маршрутизации в сети uplink. Для решения этой проблемы организуются альтернативные (резервные) подключения к другим вышестоящим uplink АС, и в этом случае АС назначения называется многоинтерфейсной (multihomed). На рисунке 4 изображена модель такого соединения для случая, когда multihomed АС имеет одну точку присутствия:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2, a_3\};$$

$$E^{AS} = \{e_1, e_2\} = \{\{\{p_2\}, \{p_1\}\}, \{\{p_3\}, \{p_1\}\}\}.$$

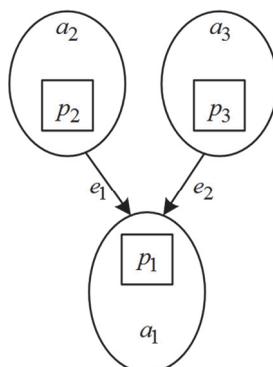


Рис. 4. Метаграф, описывающий подключение многоинтерфейсной АС к сети Интернет (вариант с одной РоР)

Если multihomed АС имеет несколько PoP, резервирование обеспечивается на физическом, канальном и сетевом уровнях. Вариант модели такого подключения представлен на рисунке 5:

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2, a_3, a_4\};$$

$$E^{AS} = \{e_1, e_2, e_3\} = \{\langle\{p_2\}, \{p_1, p_4\}\rangle, \langle\{p_3\}, \{p_1, p_4\}\rangle, \langle\{p_3, p_5\}, \{p_1, p_4\}\rangle\}.$$

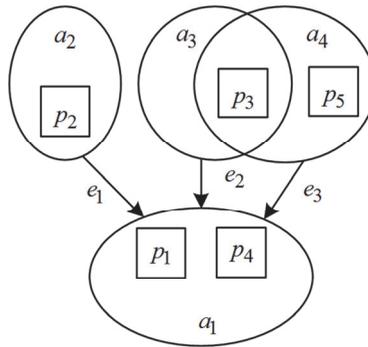


Рис. 5. Метаграф, описывающий подключение многоинтерфейсной АС к сети Интернет (вариант с несколькими PoP)

Модель multihomed АС с несколькими PoP характерна, в частности, для контент-провайдеров: они стремятся сократить задержки при передаче контента и быть «ближе» к клиентам. Чтобы сократить путь трафика от своих серверов до узлов назначения, они проводят, как правило, открытую политику пиринга: имеют BGP-подключения к большому количеству АС (чем больше – тем лучше). Оборудование контент-провайдеров размещается на крупных IXP и соединяется выделенными (собственными или арендованными) высокоскоростными каналами.

Альтернативный подход к сокращению времени передачи трафика клиентам заключается в том, что контент-провайдеры доверяют доставку трафика третьей стороне – CDN, которая имеет географически распределенную высокоскоростную сеть и точки присутствия на крупных IXP.

Оба подхода к оптимизации трафика имеют право на жизнь, поскольку в первом случае контент провайдер стремится приблизить клиентов к данным, а во втором случае – данные к клиентам. Вопрос о преимуществах того или иного решения пока остается открытым [30].

Подключение к сети Интернет транзитной АС. Любая транзитная (transit) АС способна передавать трафик, отправитель и получа-

тель которого расположены за ее пределами. Если транзитная АС является магистральным оператором связи, ее конкурентное преимущество заключается в географически распределенной внутренней сети и способности переносить трафик в масштабах страны, континента или всего мира. Вследствие этого подобные АС имеют более одной точки присутствия (рис. 6):

$$P^{PoP} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\}; \quad A^{AS} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\};$$

$$E^{AS} = \{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \left\{ \left\{ \{p_2\}, \{p_1, p_6, p_7\} \right\}, \left\{ \{p_3\}, \{p_1, p_6, p_7\} \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \{p_1, p_6, p_7\}, \{p_4\} \right\}, \left\{ \{p_1, p_6, p_7\}, \{p_5\} \right\} \right\}.$$

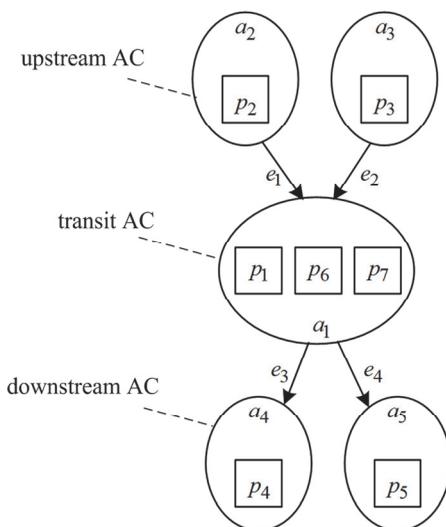


Рис. 6. Метаграф, описывающий подключение транзитной АС к сети Интернет

Существуют транзитные АС, конкурентное преимущество которых определяется не географическим масштабом их внутренней сети, а предоставляемыми услугами. К таким услугам относится, в частности, защита информационных ресурсов от DDoS-атак. Такие АС могут иметь всего одну точку присутствия: на ней трафик из глобальной сети попадает в транзитную АС, фильтруется и на ней же передается в АС назначения.

Изучение структурных свойств глобальной сети на основе метаграфовых моделей требует введения следующих понятий [28]:

Определение 4. Простой путь $h = (x, y)$ из элемента x в элемент y это такая последовательность ребер $\langle e_1, e_2, \dots, e_n \rangle$, для которой

$x \in \text{in-вершине}(e_1)$, $y \in \text{out-вершине}(e_n)$ и для всех $e_i, i = 1, \dots, n-1$, $\text{out-вершина}(e_i) \cap \text{in-вершина}(e_{i+1}) \neq \emptyset$.

Определение 5. В метаграфе $S = \langle X, E \rangle$ *метапуть* $M = \langle B, C \rangle$ из источника $B \subset X$ к цели $C \subset X$ – это множество ребер $E' \subseteq E$, такое, что:

– каждое ребро $e' \in E'$ входит в простой путь из какого-либо элемента $x \in B$ в какой-либо элемент $y \in C$;

– $[\bigcup_{e'} V_{e'} \setminus \bigcup_{e'} W_{e'}] \subseteq B$;

– $C \subseteq \bigcup_{e'} W_{e'}$.

Между простым путем и метапутем существуют следующие различия:

– во-первых, метапуть это множество ребер, а не их последовательность;

– во-вторых, источник и цель метапути это подмножества, а не элементы порождающего множества;

– в-третьих, понятие *совхода* неприменимо для метапути, поскольку множество источников включает все элементы порождающего множества.

В контексте моделирования глобальной сети простой путь – это последовательность АС, через которые передается трафик от РоР отправителя до РоР получателя. Простой путь в метаграфе пригоден для описания фактических маршрутов передачи трафика: пакеты (независимо от наличия альтернативных маршрутов и применяемых правил балансировки трафика) проходят такую последовательность точек присутствия операторов связи, в которой две соседние точки присутствия либо принадлежат одной АС, либо принадлежат таким двум АС, которые соединены ребром в АС-графе.

В свою очередь, метапуть описывает множество альтернативных междоменных маршрутов передачи трафика, возникающее в результате работы протокола BGP. Метапуть пригоден для описания потенциальных маршрутов передачи трафика, поскольку из АС источника трафика до АС получателя трафика в общем случае существует более одного маршрута.

Анализ АС-графа требует введения еще нескольких определений [28].

Определение 6. Даны два множества элементов B и C в метаграфе $S = \langle X, E \rangle$, такие что существует метапуть $M = \langle B, C \rangle$, при этом множество ребер E' является *разрезающим множеством* между

B и C , если не существует метапути из B в C в метаграфе $S' = \langle X, E \setminus E' \rangle$; кроме того, не существует подмножества E' , которое также является разрезающим множеством между B и C .

Определение 7. Разрезающее множество единичной мощности между двумя множествами элементов B и C является *мостом* между ними.

Разрезающие множества и мосты позволяют выявить «узкие» места в различных системах. При анализе структуры сети Интернет это относится прежде всего к связности АС друг с другом для обеспечения попарной взаимной доступности всех узлов. Несмотря на то, что система междоменной маршрутизации децентрализована и ее работоспособность нарушить не просто, известны инциденты, вследствие которых некоторые ресурсы становились недоступными для большей части глобальной сети [31]. Аналогично сегмент сети Интернет в масштабе страны (например, Рунет – российский сегмент сети Интернет) может быть разделен на несколько множеств АС, не имеющих связи между собой [32].

5. Способ построения метаграфа, описывающего структуру сети Интернет. ССМИ RIPE RIS [13] предоставляет доступ к маршрутным таблицам маршрутизаторов в формате Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) [33], для парсинга которых применялся Python-модуль `mrtparse` [17]. БД PeeringDB [21] доступна в виде локальной копии, доступ к которой осуществлялся посредством Python-модуля `peeringdb` [34]. Метаграф формируется в результате выполнения следующих последовательности шагов:

1) сформировать порождающее множество P^{PoP} на основе множества точек присутствия (таблица `peeringdb_facility` БД PeeringDB);

2) сформировать из элементов множества P^{PoP} множества *in*- и *out*-вершин A^{AS} на основе привязки точек присутствия и АС (таблицы `peeringdb_network` и `peeringdb_network_facility`);

3) сформировать множество ребер метаграфа E^{AS} на основе результата парсинга MRT-файла. Отбираются только маршруты до АС из множества A^{pop_rus} . Из атрибута `AS_PATH` формируются элементы множества E^{AS} в соответствии со следующими правилами:

– атрибут `AS_PATH` анализируется слева направо в виде пар АС – левой a^{left} и правой a^{right} . Перед анализом первой пары специальная переменная a^{left*} равна 0;

– если $a^{left*} \neq 0$ и $a^{left} \in A^{AS}$, то добавляется ребро $\langle a^{left*}, a^{left} \rangle$

и значение переменной a^{left*} устанавливается 0;

- если $a^{left*} \neq 0$ и $a^{right} \in A^{AS}$, то добавляется ребро $\langle a^{left*}, a^{right} \rangle$ и значение переменной a^{left*} устанавливается 0;
 - если $a^{left} \in A^{AS}$ и $a^{right} \in A^{AS}$, то добавляется ребро $\langle a^{left}, a^{right} \rangle$;
 - если $a^{left} \in A^{AS}$, а $a^{right} \notin A^{AS}$, то $a^{left*} = a^{left}$ для добавления ребра метаграфа при анализе последующих пар АС;
- 4) сформировать метаграф $S^{AS_PoP} = \langle P^{PoP}, A^{AS} \rangle$.

Процесс создания метаграфа из исходных данных проиллюстрирован на рисунке 7.

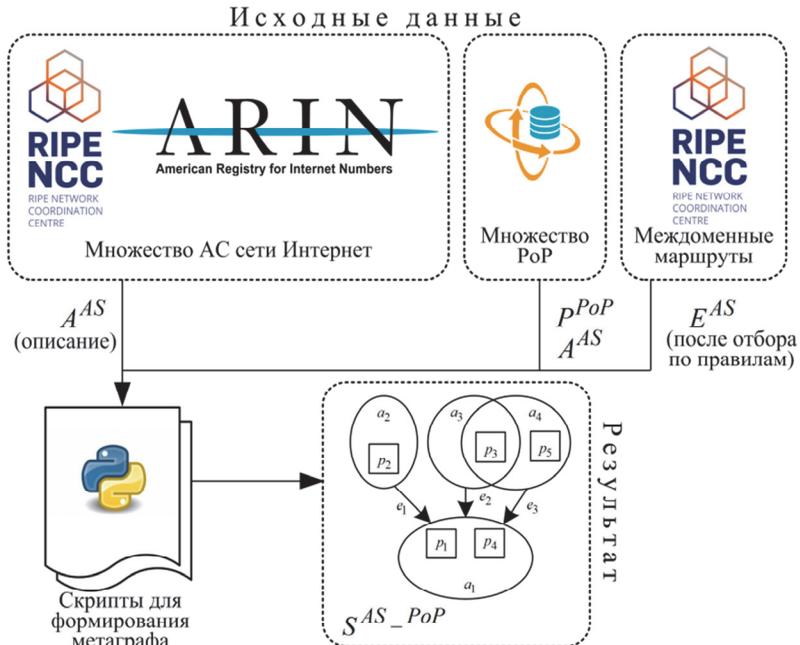


Рис. 7. Процесс создания метаграфа

С учетом масштаба модели сети S^{AS_PoP} ее анализ вручную не представляется возможным. Результат поиска автоматизированных инструментов для анализа метаграфов и средств их отображения представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ инструментов для работы с метаграфами

Название	Тип	Возможности
MGtoolkit [35]	Модуль для языка программирования Python	Создание и модификация метаграфа, анализ связности, трансформация метаграфа, назначение атрибутов элементам метаграфа (т.н. conditional metagraphs)
https://charmwiz.com	Онлайн конструктор	Создание метаграфов в графическом конструкторе, создание случайных метаграфов

Выбор инструментов невелик и для решения поставленной задачи целесообразно использовать модуль MGtoolkit для Python. Используемая в MGtoolkit модель данных (рис. 8) обеспечивает эффективный доступ к элементам метаграфа и имеет развитые средства его анализа: функцию поиска разрезающего подмножества между заданными вершинами `get_minimal_cutset(source, target)`, функцию получения всех метапутей между двумя вершинами `get_all_metapaths_from(source, target)` и другие [36].

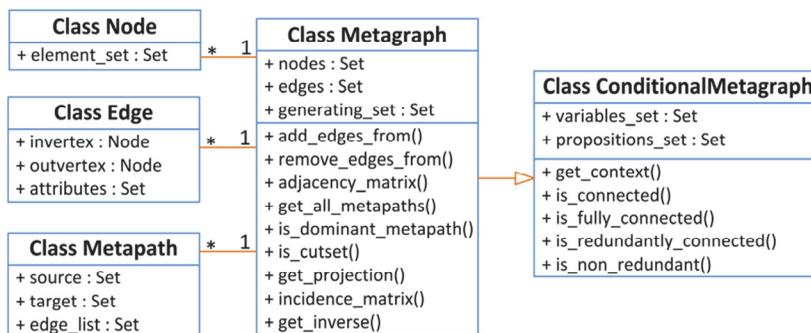


Рис. 8. Модель данных для описания метаграфа

Ограничения, налагаемые исходными данными (по состоянию на июнь 2020 года):

- множество точек присутствия АС ограничено техническими площадками, описанными в общедоступной базе данных (БД) PeeringDB, всего описано более 3700 PoP;

- множество АС описано в БД интернет-регистраторов RIPE, ARIN, LACNIC, APNIC и AfrINIC. Всего более 110000 АС [37];

– множество ребер АС-графа ограничено данными, получаемыми из ССМИ RIPE RIS с точки обмена трафиком MSK-IX [38]. При этом в АС-граф попадают только те ребра, обе вершины которых имеют хотя бы одну известную РоР. В БД PeeringDB привязку к точкам присутствия имеют 19159 АС, что составляет около 17%. В феврале 2019 года такую привязку имели 14% АС.

6. Проблемно-ориентированное использование предложенной модели. С помощью предложенной модели структуры глобальной сети в виде метаграфа предлагается решать следующие ориентированные на практику задачи:

– поиск множества АС сети Интернет, разрыв связности с которыми может привести к изоляции национального сегмента сети от глобальной сети;

– поиск множества АС сети Интернет, разрыв связности с которыми может привести к разделению национального сегмента сети на части, обмен трафиком между которыми возможен только через зарубежные точки присутствия.

Решение указанных задач является направлением дальнейших исследований, однако их формальная постановка представлена ниже.

6.1. Изоляция национального сегмента глобальной сети (на примере России).

Дано:

– множество АС A^{pop_rus} , которые имеют точки присутствия только на территории России. С учетом (5)-(8) имеем:

$$\begin{aligned} \text{get_pop_of_AS}(a) &= P^a, \quad \forall a \in A^{pop_rus}, \\ \text{is_pop_in_country}(p, "RU") &= 1, \quad \forall p \in P^a; \end{aligned}$$

– множество АС A^{pop_global} , которые имеют точки присутствия как на территории России, так и за ее пределами. Каждая АС $a \in A^{pop_global}$ обеспечивает связность части Рунета с глобальной сетью, при этом не накладывается ограничений на национальную принадлежность точек присутствия АС из A^{pop_global} :

$$\begin{aligned} \text{get_pop_of_AS}(a) &= P^a, \quad \forall a \in A^{pop_global}, \\ \exists p \in P^a : \text{is_pop_in_country}(p, "RU") &= 1, \\ \exists p \in P^a : \text{is_pop_in_country}(p, "RU") &= 0. \end{aligned}$$

Найти: подмножество $A^{pop_rus} \cup A^{pop_global}$ минимальной мощности, удаление которых из АС-графа приведет к отделению рос-

сийского сегмента сети Интернет от глобальной сети. Частным случаем этой задачи является отделение части российского сегмента.

Решение может быть получено последовательным удалением *некоторых* АС из АС-графа и проверкой на связность множеств A^{pop_rus} и A^{pop_global} после каждой процедуры удаления. Эта процедура позволит найти разрезающее множество между A^{pop_rus} и A^{pop_global} поскольку данные множества являются множествами *in-вершин* (*out-вершин*) согласно (3). Множество удаленных АС будет разрезающим множеством согласно определению 6.

Слово *некоторых* подразумевает различные способы выбора АС, которые следует удалить: случайный выбор, удаление АС с максимальной связностью и тому подобное.

6.2. Разделение национального сегмента глобальной сети (на примере России).

Дано:

– множество АС A^{pop_rus} , которые имеют точки присутствия только на территории России (аналогично задаче 5.1).

– множество АС A^{pop_global} , которые имеют точки присутствия как на территории России, так и за ее пределами (аналогично задаче 5.1).

Найти: подмножество $A^{pop_rus} \cup A^{pop_global}$ минимальной мощности, удаление которых приведет к разделению АС-графа российского сегмента сети Интернет на два подмножества АС, между которыми не будет метапутей, и обмен трафиком будет возможен только через АС из множества A^{pop_global} .

Решение может быть получено последовательным удалением *некоторых* АС из АС-графа и проверкой на связность множества A^{pop_rus} после каждой процедуры удаления. Эта процедура позволит найти те АС, связность которых с остальной частью Рунета критически важна.

Слово *некоторых* подразумевает различные способы выбора АС, которые следует удалить: случайный выбор АС из Рунета, удаление АС с максимальной связностью в Рунете и тому подобное.

7. Заключение. Декомпозиция структуры сети Интернет на уровне широко используется в задачах оценивания устойчивости сети и безопасности передаваемых в ней данных. Решение таких задач требует комплексного подхода: сбора данных о сетевых сущностях, создания математических моделей анализа взаимосвязей элементов системы на двух и более уровнях, разработки программных средств и их внедрения в деятельность интернет-провайдеров и регулирующих органов.

Предложенная модель структуры глобальной сети может быть использована в существующих системах обнаружения отказов на уровне АС или точек присутствия операторов связи [6, 39] при исследовании надежности связи заданного множества АС с глобальной сетью [40] и при обеспечении связности с национальным сегментом сети Интернет тех сервисов, которые не должны передавать трафик через зарубежные точки присутствия.

Направлениями дальнейших исследований являются:

- программная реализация инструментов анализа структуры глобальной сети на основе предложенной модели;
- создание моделей деструктивных воздействий на AS Level (удаление вершин и ребер из АС-графа) и на PoP Level (удаление элементов порождающего множества);
- оценивание структурных феноменов российского сегмента сети Интернет с целью поиска «узких мест», деструктивные воздействия на которые могут привести к частичной или полной недоступности сетевых сервисов для абонентов.

Решение этих задач позволит отнести ряд интернет-провайдеров и точки их присутствия к объектам критической информационной инфраструктуры и сформировать технически обоснованные требования к их связности.

Литература

1. *Huffaker B.* Autonomous Systems (AS) Introduction and Topology. URL: www.caida.org/publications/presentations/2016/as_intro_topology_wind/as_intro_topology_wind.pdf (дата обращения: 26.03.2019).
2. *Anwar R. et al.* Investigating Interdomain Routing Policies in the Wild. URL: <http://conferences2.sigcomm.org/imc/2015/papers/p71.pdf> (дата обращения: 16.08.2019).
3. *McDonald A. et al.* 403 Forbidden: A Global View of CDN Geoblocking // 2018 Internet Measurement Conference. URL: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278552/p218-McDonald.pdf> (дата обращения: 26.06.2019).
4. *Filer M.* Elastic Optical Networking in the Microsoft Cloud // Optical Society of America. 2016. vol. 8. no. 7. URL: https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/07/JOCN_Microsoft_EONs_2016_published.pdf (дата обращения: 15.08.2019).
5. *Luckie M. et al.* bdrmap: Inference of Borders Between IP Networks // 2016 Internet Measurement Conference. URL: <https://www.caida.org/publications/papers/2016/bdrmap/bdrmap.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).
6. *Giotsas V. et al.* Detecting Peering Infrastructure Outages in the Wild // Proceedings of SIGCOMM '17. URL: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/123508/1/SIGCOMM2017.pdf> (дата обращения: 21.01.2019).

7. *Magharei N., Rejaie R., Rasti A.* Eyeball ASes: From Geography to Connectivity // 2011 Internet Measurement Conference. URL: conferences.sigcomm.org/imc/2010/papers/p192.pdf (дата обращения: 21.01.2019).
8. *Feldman D., Shavitt Y., Zilberman N.* A Structural Approach for PoP Geo-Location // 2010 INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops. 2010. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Structural-Approach-for-PoP-Geo-Location-Feldman-Shavitt/030e9d38121227b89523e063f241e52b472d5909> (дата обращения: 26.03.2019).
9. *Smaragdakis G., Huffaker B., Giotsas V.* Mapping Peering Interconnections to a Facility // Proceedings of the 11th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. 2015. URL: caida.org/publications/papers/2015/mapping_peering_interconnections/mapping_peering_interconnections.pdf (дата обращения: 26.03.2019).
10. *Shavitt Y., Zilberman N.* Improving IP geolocation by crawling the internet PoP level graph // 2013 IFIP Networking Conference. 2013 URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-IP-geolocation-by-crawling-the-internet-Shavitt-Zilberman/0277fca9f0e80438ac298cd78ffb0f883781f249> (дата обращения: 26.03.2019).
11. 2018 Global Internet Phenomena Report. URL: <https://www.sandvine.com/2018-internet-phenomena-report> (дата обращения: 26.03.2019).
12. *Робачевский А.М.* Интернет изнутри // М.: Альпина Паблишер. 2015. 223 с.
13. Официальный сайт Routing Information Service. URL: www.ripe.net/projects/ris/docs/index.html (дата обращения: 26.03.2019).
14. Официальный сайт University of Oregon Route Views Project. URL: www.routeviews.org (дата обращения: 26.03.2019).
15. Официальный сайт Packet Clearing House. URL: www.pch.net/home/index.php (дата обращения: 26.03.2019).
16. *Ardelean D.* libBGPDump. URL: <https://bitbucket.org/ripence/bgpdump/wiki/Home> (дата обращения: 06.04.2019).
17. *Yamauchi Y., Kiso N.I.T.* MRT format data parser. URL: <https://github.com/t2mune/mrtparse> (дата обращения: 06.04.2019).
18. *Иванов М.В., Филлимонов П.А.* Модель сети Интернет на уровне автономных систем в виде безмасштабного графа // Телекоммуникации: Наука и технология. 2016. № 11. С. 22–26.
19. Официальный сайт проекта об IT linkmeup. URL: <http://linkmeup.ru/blog/65.html> (дата обращения: 26.03.2019).
20. *Roughan M., Willinger W.* Internet Topology Research Redux // Recent Advances in Networking. 2013. URL: sigcomm.org/education/ebook/SIGCOMM-Book2013v1_chapter1.pdf (дата обращения: 26.09.2018).
21. Официальный сайт проекта PeeringDB. URL: peeringdb.com (дата обращения: 26.03.2019).
22. *Zilberman N.* The Internet PoP Level Graph : PhD thesis / Tel-Aviv University, 2013. URL: cl.cam.ac.uk/~nz247/publications/zilber-man_PhDThesis.pdf (дата обращения: 06.01.2020).
23. Официальный сайт MSK-IX. Города и адреса узлов. URL: <https://kb.msk-ix.ru/ix/locations> (дата обращения: 12.08.2019).
24. *Gaur D., Shastri A., Biswas R.* Introducing 'Meta-Network': A New Concept in Network Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/263638974_Introducing_'Meta-Network'_A_New_Concept_in_Network_Technology (дата обращения: 26.03.2019).
25. *Nykl J., Hrnčir J., Jakob M.* Achieving Full Plan Multimodality by Integrating Multiple Incomplete Journey Planners // IEEE 18th International Conference on Intelligent

- Transportation Systems (ITSC). 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/283495853_Achieving_Full_Plan_Multimodality_by_Integrating_Multiple_Incomplete_Journey_Planners (дата обращения: 22.07.2019).
26. *Papadopoulos S., Kompatsiaris Y., Vakali A., Spyridonos P.* Community detection in Social Media // *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/233790771_Community_detection_in_Social_Media (дата обращения: 22.07.2019).
27. *Fang Y. et al.* Semantic Proximity Search on Graphs with Metagraph-based Learning // *IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE)*. 2016. URL: https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=5063&context=sis_research (дата обращения: 26.03.2019).
28. *Basu A., Blanning R.W.* Metagraphs and their applications // *Springer Science & Business Media*. 2007. 172 с.
29. *Dovrolis A., Dhamdhere C.* Twelve Years in the Evolution of the Internet Ecosystem // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011. vol. 19. no. 5. pp. 1420–1433. URL: caida.org/publications/papers/2011/twelve_years_evolution/twelve_years_evolution.pdf (дата обращения: 26.03.2019).
30. *Huston G.* The Death of Transit? URL: <http://www.potaroo.net/ispcol/2016-10/xtransit.html> (дата обращения: 26.11.2018).
31. *Дробышев Е.* деПИР во имя статус-кво CDN платежей: Comcast против Level3. URL: <https://nag.ru/articles/article/19954/depir-vo-imya-status-kvo-cdn-platejey-comcast-protiv-level3.html> (дата обращения: 26.03.2018).
32. *Кунчатов А.* Магистральный Интернет транзит России 2009, часть I. URL: <https://nag.ru/articles/blogs/17525/magistralnyiy-internet-tranzit-rossii-2009-chast-i.html> (дата обращения: 26.10.2017).
33. *Blunk L., Karir M., Labovitz C.* Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) Routing Information Export Format // *Internet Engineering Task Force (IETF)*. 2011. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6396> (дата обращения: 26.03.2019).
34. Официальный сайт исходных кодов проекта PeeringDB. URL: <https://github.com/peeringdb/peeringdb> (дата обращения: 06.06.2020).
35. Официальный сайт проекта mgtoolkit. URL: <https://github.com/dinesharanathunga/mgtoolkit> (дата обращения: 26.03.2019).
36. *Ranathunga D., Nguyen H., Roughan M.* MGtoolkit: A python package for implementing metagraphs // *SoftwareX*. 2017. vol. 6. pp. 91–93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.04.001> (дата обращения: 26.11.2019).
37. *Huston G.* The 32-bit AS Number Report. URL: www.potaroo.net/tools/asn32 (дата обращения: 06.06.2020).
38. Официальный сайт Routing Information Service. RIS Raw Data. URL: data.ris.ripe.net/risc13 (дата обращения: 06.06.2020).
39. *Richter P et ap.* Advancing the Art of Internet Edge Outage Detection // *In 2018 Internet Measurement Conference*. URL: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278563/p350-Richter.pdf> (дата обращения: 26.11.2019).
40. Федеральный закон от 01.05.2019 № 90-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О связи» и Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905010025> (дата обращения: 20.05.2020).

Иванов Максим Владимирович — канд. техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: представление и обработка данных в виде графов, методы описания иерархических сетей, применение методов дискретной оптимизации, технологии разработки распределенных программных комплексов. Число научных публикаций — 21. maximivanov@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: +7 (4862) 54-96-15.

Калашиков Иван Витальевич — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: применение методов математического моделирования для исследования телекоммуникационных сетей, технологии разработки web-приложений. Число научных публикаций — 0. pro100vaness@gmail.com; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орёл, Россия; р.т.: +7 (4862) 54-96-15.

Нуруллаев Мехран Мирзожонович — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: применение методов математического моделирования для исследования телекоммуникационных сетей, технологии разработки программных комплексов с СУБД. Число научных публикаций — 1. nur-mehran@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орёл, Россия; р.т.: +7 (4862) 54-96-15.

M. IVANOV, I. KALASHNIKOV, M. NURULLAEV
**STUDY OF INTERNET STRUCTURE PROPERTIES BASED ON
METAGRAPH MODELS**

Ivanov M., Kalashnikov I., Nurullaev M. Study of Internet Structure Properties based on Metagraph Models.

Abstract. Studying the Internet its structure is usually divided into levels: Autonomous Systems Level (AS), Point of Presence Level (PoP), Router Level, etc. The global network can be represented on each of them as a graph based on the initial data obtained from open sources. Consideration of a network within the framework of a separate level facilitates analysis, but does not allow to systematically assess its structural properties when providing the connectivity between several segments of the network related, particularly, to the objects of critical information infrastructure. To overcome this contradiction, a mathematical model of the global network in the form of a metagraph was developed at the interface between AS-level and PoP-level that takes into account the characteristics of each level and allows to find bottlenecks both in the interdomain routing system and in the topology of internal networks of Internet providers.

Based on the proposed model some structural phenomena of the global network are described: stub, multihomed and transit autonomous systems, content providers. Taking into account available data from open sources about Internet structure, a method for constructing a metagraph is proposed. A comparative analysis of tools that automate the process of analyzing a network model is carried out. The practice-oriented problems of finding a cutting subset in a metagraph were set. Certain areas of further research are software implementation of the models using module MGtoolkit in Python and the assessment of structural phenomena of Russian segments of the Internet.

Keywords: Internet, Autonomous System, Point of Presence, Routing, BGP, Metagraph, Cutting Subset, Python, MGtoolkit, Objects of Critical Information Infrastructure.

Ivanov Maxim — Ph.D., Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph models, hierarchical networks, discrete optimization, distributed software. The number of publications — 21. maximivanov@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7 (4862) 54-96-15.

Kalashnikov Ivan — Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: mathematic models of the computer networks, web applications developing. The number of publications — 0. pro100vaness@gmail.com; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7 (4862) 54-96-15.

Nurullaev Mekhran — Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: mathematic models of the computer networks, big-data applications developing. The number of publications — 1. nur-mehran@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7 (4862) 54-96-15.

References

1. Huffaker B. Autonomous Systems (AS) Introduction and Topology. Available at: www.caida.org/publications/presentations/2016/as_intro_topology_wind/as_intro_topology_wind.pdf (accessed: 26.03.2019).
2. Anwar R. et al. Investigating Interdomain Routing Policies in the Wild. Available at: <http://conferences2.sigcomm.org/imc/2015/papers/p71.pdf> (accessed: 16.08.2019).

3. McDonald A. et al. 403 Forbidden: A Global View of CDN Geoblocking. 2018 Internet Measurement Conference. Available at: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278552/p218-McDonald.pdf> (accessed: 26.06.2019).
4. Filer M. et al. Elastic Optical Networking in the Microsoft Cloud. Optical Society of America. 2016. vol. 8. no. 7. Available at: https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/07/JOCN_Microsoft_EONs_2016_published.pdf (accessed: 15.08.2019).
5. Luckie M. et al. bdrmap: Inference of Borders Between IP Networks. 2016 Internet Measurement Conference. Available at: <https://www.caida.org/publications/papers/2016/bdrmap/bdrmap.pdf> (accessed: 26.03.2019).
6. Giotsas V., Dietzel P., Smaragdakis G., Feldmann A., Berger A., Aben E. Detecting Peering Infrastructure Outages in the Wild. Proceedings of SIGCOMM '17. 2017. Available at: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/123508/1/SIGCOMM2017.pdf> (accessed: 21.01.2019).
7. Magharei N., Rejaie R., Rasti A. Eyeball ASes: From Geography to Connectivity. 2011 Internet Measurement Conference (IMC '11, 2011). Available at: conferences.sigcomm.org/imc/2010/papers/p192.pdf (accessed: 21.01.2019).
8. Feldman D., Shavitt Y., Zilberman N. A Structural Approach for PoP Geo-Location. 2010 INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops. 2010. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Structural-Approach-for-PoP-Geo-Location-Feldman-Shavitt/030c9d38121227b89523e063f241e52b472d5909> (accessed: 26.03.2019).
9. Smaragdakis G., Huffaker B., Giotsas V. Mapping Peering Interconnections to a Facility. Proceedings of the 11th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. 2015. Available at: caida.org/publications/papers/2015/mapping_peering_interconnections/mapping_peering_interconnections.pdf (accessed: 26.03.2019).
10. Shavitt Y., Zilberman N. Improving IP geolocation by crawling the internet PoP level graph. 2013 IFIP Networking Conference. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-IP-geolocation-by-crawling-the-internet-Shavitt-Zilberman/0277fca9f0e80438ac298cd78ff0f883781f249> (accessed: 26.03.2019).
11. 2018 Global Internet Phenomena Report. Available at: <https://www.sandvine.com/2018-internet-phenomena-report> (accessed: 26.03.2019).
12. Robachevskij A.M. *Internet iznutri* [Internet from inside]. M.: Alpina Publisher. 2015. 223 p. (In Russ.).
13. Official web site Routing Information Service. Available at: www.ripe.net/projects/ris/docs/index.html (accessed: 26.03.2019).
14. Official web site University of Oregon Route Views Project. Available at: www.routeviews.org (accessed: 26.03.2019).
15. Official web site Packet Clearing House. Available at: www.pch.net/home/index.php (accessed: 26.03.2019).
16. Ardelean D. libBGPDump. Available at: <https://bitbucket.org/ripence/bgpdump/wiki/Home> (accessed: 06.04.2019).
17. Yamauchi Y., Kiso N.I.T. MRT format data parser. Available at: <https://github.com/t2mune/mrtparse> (accessed: 06.04.2019).
18. Ivanov M.V., Filimonov P.A. [Model of the Internet at the Autonomous systems level as scale-free graph]. *Telekommunikacii: Nauka i tehnologija – Telecommunications: The Science and the Technology*. 2016. vol. 11. pp. 22–26. (In Russ.).

19. Oficial'nyj sajt proekta ob IT linkmeup [Official site of the project about IT linkmeup]. Available at: <http://linkmeup.ru/blog/65.html> (accessed: 26.03.2019). (In Russ.).
20. Roughan M., Willinger W. Internet Topology Research Redux. *Recent Advances in Networking*. 2013. Available at: sigcomm.org/education/ebook/SIGCOMM-Book2013v1_chapter1.pdf (accessed: 26.09.2018).
21. Oficial'nyj sajt proekta PeeringDB. [Official site of the PeeringDB project]. Available at: peeringdb.com (accessed: 26.03.2019). (In Russ.).
22. Zilberman N. The Internet PoP Level Graph : PhD thesis. Tel-Aviv University, 2013. Available at: cl.cam.ac.uk/~nz247/publications/zilber-man_PhDThesis.pdf (accessed: 06.01.2020).
23. Oficial'nyj sajt MSK-IX. Goroda i adresa uzlov. [Official site of the MSK-IX. Cities and addresses of hosts]. Available at: <https://kb.msk-ix.ru/ix/locations> (accessed: 12.08.2019). (In Russ.).
24. Gaur D., Shastri A., Biswas R. Introducing 'Meta-Network': A New Concept in Network Technology. Available at: https://www.researchgate.net/publication/263638974_Introducing_'Meta-Network'_A_New_Concept_in_Network_Technology (accessed: 26.03.2019).
25. Nykl J., Hrnčíř J., Jakob M. Achieving Full Plan Multimodality by Integrating Multiple Incomplete Journey Planners. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/283495853_Achieving_Full_Plan_Multimodality_by_Integrating_Multiple_Incomplete_Journey_Planners (accessed: 22.07.2019).
26. Papadopoulos S., Kompatsiaris Y., Vakali A., Spyridonos P. Community detection in Social Media. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/233790771_Community_detection_in_Social_Media (accessed: 22.07.2019).
27. Fang Y. et al. Semantic Proximity Search on Graphs with Metagraph-based Learning. IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE). 2016. Available at: https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=5063&context=sis_research (accessed: 26.03.2019).
28. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs and their applications. Springer Science & Business Media. 2007. 172 p.
29. Dovrolis A., Dhamdhere P. Twelve Years in the Evolution of the Internet Ecosystem. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2011. vol. 19. no. 5. pp. 1420–1433. Available at: caida.org/publications/papers/2011/twelve_years_evolution/twelve_years_evolution.pdf (accessed: 26.03.2019).
30. Huston G. The Death of Transit? Available at: <http://www.potaroo.net/ispcol/2016-10/xtransit.html> (accessed: 26.11.2018).
31. Drobyshev E. Drobyshev E. dePIR vo imja status-kvo CDN platezhej: Comcast protiv Level3. [dePeer to maintain the current status quo of CDN payments: Comcast against Level3.] Available at: <https://nag.ru/articles/article/19954/depir-vo-imya-status-kvo-cdn-platejey-comcast-protiv-level3.html> (accessed: 26.03.2018). (In Russ.).
32. Kipchatov A. Magistral'nyj Internet tranzit Rossii. [Internet backbone transit of Russian]. 2009. Available at: <https://nag.ru/articles/blogs/17525/magistralnyiy-internet-tranzit-rossii-2009-chast-i.html> (accessed: 26.10.2017). (In Russ.).
33. Blunk L., Karir M., Labovitz P. Multi-Threaded Routing Toolkit (MRT) Routing Information Export Format. Internet Engineering Task Force (IETF). 2011. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc6396> (accessed: 26.03.2019).
34. Oficial'nyj sajt ishodnyh kodov proekta. [Official site of the source codes of the PeeringDB project.]. Available at: <https://github.com/peeringdb/peeringdb> (accessed: 06.06.2020). (In Russ.).

35. Official'nyj sajt proekta mgtoolkit [Official site of the mgtoolkit project]. Available at: <https://github.com/dinesharanathunga/mgtoolkit> (accessed: 26.03.2019). (In Russ.).
36. Ranathunga D., Nguyen H., Roughan M. MGtoolkit: A python package for implementing metagraphs. SoftwareX. 2017. vol. 6. pp. 91–93. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.04.001> (accessed: 26.11.2019).
37. Huston G. The 32-bit AS Number Report. Available at: www.potaroo.net/tools/asn32 (accessed: 06.06.2020).
38. Official web site Routing Information Service. RIS Raw Data. Available at: data.ris.ripe.net/rrc13 (accessed: 06.06.2020).
39. Richter P. et al. Advancing the Art of Internet Edge Outage Detection. 2018 Internet Measurement Conference (IMC '18, Boston, MA, USA. ACM, New York, NY, USA. 31, October - 2, November, 2018). Available at: <http://delivery.acm.org/10.1145/3280000/3278563/p350-Richter.pdf> (accessed: 26.11.2018).
40. Federal law No. 90 at 01.05.2019. [About amendments to the Federal law "About communications" and the Federal law "About information, information technologies and information protection"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905010025> (accessed: 20.05.2020). (In Russ.).

Signed to print 16.07.2020

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications
and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 г.
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

Подписано к печати 16.07.2020. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 11,62. Заказ № 293.

Тираж 150 экз., цена свободная.

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций,
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.

Подписной индекс П5513 по каталогу «Почта России»

РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 20 до 30 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

AUTHOR GUIDELINES

Interaction between each potential author and the Editorial board is realized through the personal account on the website of the journal "SPIIRAS Proceedings" <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. At the registration the authors are requested to fill out all data fields in the proposed form.

The submissions should be prepared using MS Word 2007 text editor or higher versions, at that, only manuscripts in *.docx format will be considered. The text of the paper in the main part of it should be from 20 – 30 pages of A5 size that is 210 X 148 mm; orientation – portrait; all margins – 20 mm. The font of the main paper text is Times New Roman of 10 pt font size. The pages' headers and footers should be empty; indentation – 10 mm; line spacing – single; pages are not numbered; hyphenations are allowed.

Certain figures, tables, listings and formulas are allowed in the main section, and their typography is considered by the paper template in more detail in journal web.

ISSN 2078-9181



9 772078 918785 >

