

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4/2020

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

С. Н. Васильев, академик РАН,
И. А. Каляев, академик РАН,
В. А. Левин, академик РАН,
Н. А. Махутов, чл.-корр. РАН,
Е. А. Микрин, академик РАН,

П. П. Пархоменко, чл.-корр. РАН,
А. Ф. Резчиков, чл.-корр. РАН,
Е. А. Федосов, академик РАН

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф. Т. Алескеров, д-р техн. наук,
В. Н. Афанасьев, д-р техн. наук,
Н. Н. Бахтадзе, д-р техн. наук,
Л. П. Боровских, канд. техн. наук
(зам. гл. редактора),
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,
В. М. Вишневский, д-р техн. наук,
М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
В. В. Клочков, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
В. В. Кульба, д-р техн. наук,
А. Г. Кушнер, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Лазарев, д-р физ.-мат. наук,
В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
В. Е. Лепский, д-р психол. наук,
А. С. Мандель, д-р техн. наук,
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук,
А. И. Михальский, д-р биол. наук,
Д. А. Новиков, чл.-корр. РАН
(гл. редактор),
Б. В. Павлов, д-р техн. наук,
Ф. Ф. Пашченко, д-р техн. наук
(зам. гл. редактора),
Л. Б. Рапопорт, д-р физ.-мат. наук,
С. В. Ратнер, д-р экон. наук,
Е. Я. Рубинович, д-р техн. наук,
В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. наук,
П. Ю. Чеботарёв, д-р физ.-мат. наук,
И. Б. Ядыкин, д-р техн. наук

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ

Владивосток – О. В. Абрамов, д-р техн. наук,
Волгоград – А. А. Воронин, д-р техн. наук,
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,
д-р техн. наук,
Самара – В. Г. Засканов, д-р техн. наук,
Саратов – В. А. Твердохлебов, д-р техн. наук,
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук

ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, Academician of RAS¹,
I. A. Kalyaev, Academician of RAS,
V. A. Levin, Academician of RAS,
N. A. Makhutov, Corr. Member of RAS,
E. A. Mikrin, Academician of RAS,

P. P. Parkhomenko, Corr. Member of RAS,
A. F. Rezchikov, Corr. Member of RAS,
S. N. Vassilev, Academician of RAS

EDITORIAL BOARD

V. N. Afanasev, D. Sc. (Tech.),
F. T. Aleskerov, D. Sc. (Tech.),
N. N. Bakhtadze, D. Sc. (Tech.),
L. P. Borovskikh, Ph. D. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
V. N. Burkov, D. Sc. (Tech.),
P. Yu. Chebotarev, D. Sc. (Phys.-Math.),
M. I. Geraskin, D. Sc. (Econ.),
V. V. Klochkov, D. Sc. (Econ.),
M. V. Khlebnikov, D. Sc. (Phys.-Math.),
S. A. Krasnova, D. Sc. (Tech.),
V. V. Kulba, D. Sc. (Tech.),
A. G. Kushner, D. Sc. (Phys.-Math.),
O. P. Kuznetsov, D. Sc. (Tech.),
A. A. Lazarev, D. Sc. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, D. Sc. (Tech.),
V. E. Lepskiy, D. Sc. (Psych.),
A. S. Mandel, D. Sc. (Tech.),
R. V. Meshcheryakov, D. Sc. (Tech.),
A. I. Michalski, D. Sc. (Biol.),
D. A. Novikov, Corr. Member of RAS,
Editor-in-Chief,
F. F. Pashchenko, D. Sc. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
B. V. Pavlov, D. Sc. (Tech.),
L. B. Rapoport, D. Sc. (Phys.-Math.),
S. V. Ratner, D. Sc. (Econ.),
E. Ya. Rubinovich, D. Sc. (Tech.),
V. Yu. Rutkovskii, D. Sc. (Tech.),
A. D. Tsvirkun, D. Sc. (Tech.),
V. M. Vishnevsky, D. Sc. (Tech.),
I. B. Yadykin, D. Sc. (Tech.)

LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Kursk – S. G. Emelyanov, D. Sc. (Tech.),
Lipetsk – A. K. Pogodaev, D. Sc. (Tech.),
Perm – V. Yu. Stolbov, D. Sc. (Tech.),
Rostov-na-Donu, G. A. Ougolnitsky –
D. Sc. (Tech.),
Samara – V. G. Zaskanov, D. Sc. (Tech.),
Saratov – V. A. Tverdokhlebov, D. Sc. (Tech.),
Ufa – B. G. Ilyasov, D. Sc. (Tech.)
Vladivostok – O. V. Abramov, D. Sc. (Tech.),
Volgograd – A. A. Voronin, D. Sc. (Phys.-Math.),
Voronezh – S. A. Barkalov, D. Sc. (Tech.)

¹ Russian Academy of Sciences.



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
чл.-корр. РАН

Д.А. Новиков

Заместители главного
редактора

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пащенко

Ответственный секретарь

Н.Е. Максимова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «Сенсидат-Плюс»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00
E-mail: pu@ipu.ru
Интернет: http://pu.mtas.ru

Оригинал-макет и электронная версия
подготовлены
ИП Кишенкова Т. В.

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабикова

Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз»
Заказ № РВ420

Подписано в печать
14.07.2020 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в RSCI на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ).
На сайте Научной электронной
библиотеки (www.elibrary.ru) доступны
полные тексты статей.

Подписные индексы:
80508 и **81708** в каталоге Роспечати;
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4.2020

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

Перушина Н.А., Хакимова А.Н. Разработка математических моделей нечетких регуляторов с настройкой генетическим алгоритмом для стабилизации динамического объекта 3

Управление в социально-экономических системах

Бызов Л.Г., Губанов Д.А., Козицин И.В., Чхартишвили А.Г. Идеальный политик для социальной сети: подход к анализу идеологических предпочтений пользователей 15

Еремин В.В., Бауэр В.П., Райков А.Н. Управление конкурентоспособностью в системе цифровых платформ 27

Корепанов В.О. Константное поведение в деловых играх распределения ресурса: устойчивость к дизайну игр и модель 41

Информационные технологии в управлении

Ефанов Д.В. Троичные коды с суммированием для контроля цифровых схем 52

Стецюра Г.Г. Компьютерные кластеры с быстрым аппаратным выполнением синхронизации сообщений и распределенных вычислений сетевыми средствами 61

Управление техническими системами и технологическими процессами

Мартынова Л.А. Киселев И.В., Безрук Г.Г. Эффективное управление гибридной системой генерации и распределения электроэнергии при движении автономного необитаемого подводного аппарата 70



CONTROL SCIENCES

Scientific Technical Journal

6 issues per year

ISSN 1819-3161

Published since 2003

FOUNDER

V. A. Trapeznikov Institute
of Control Sciences
of Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

D. A. Novikov, Corr. Member of RAS

Deputy Editors-in-Chief

L. P. Borovskikh, F. F. Pashchenko

Executive Editor-in-Chief

N. E. Maksimova

Editor

L. V. Petrakova

Publisher Sensidat-Plus LLC

Editorial address

65 Profsoyuznaya st., office 410,

Moscow 117997, Russia

☎/📠 +7 (495) 334-92-00

✉ pu@ipu.ru

URL: <http://pu.mtas.ru>

Design layout and electronic version

prepared by SP Kishenkova T. V.

Printed by Advanced Solutions LLC

Order No. PB420

Approved for print on 14.07.2020

The Journal is registered by the Ministry
of Press, Broadcasting and Mass Media
of the Russian Federation

Registration certificate of

ПИ № ФС 77-49203 of 30 March 2012

The Journal is included in RSCI
(Russian Science Citation Index)
on the platform Web of Science
and in the list of peer-reviewed
scientific publications of the HAC

On the website of the Scientific electronic
library (www.elibrary.ru) full texts of articles
are available.

Subscription indexes:

80508 and **81708** in the catalogue
of Rospechat;

38006 in the joint catalogue
«Press of Russia»

Free price

© V. A. Trapeznikov Institute of Control
Sciences of Russian Academy of Sciences

CONTROL SCIENCES

4.2020

CONTENTS

Analysis and Synthesis of Control Systems

- Pervushina, N.A., Khakimova, A.N.** Development of Mathematical
Models of Fuzzy Controllers Set by Genetic Algorithm to Stabilize
Dynamic Object 3

Control in Social and Economic Systems

- Byzov, L.G., Gubanov, D.A., Kozitsin, I.V., Chkhartishvili, A.G.**
Perfect Politician for Social Network: An Approach to Analysis
of Ideological Preferences of Users 15

- Eremin, V.V., Bauer, V.P., Raikov, A.N.** Competitiveness Management
in the Digital Platform System 27

- Korepanov, V.O.** Constant Behavior in Resource Allocation Games:
Resistance to the Game Design, and the Model 41

Information Technologies in Control

- Efanov, D.V.** Ternary Sum Codes for the Digital Circuit Testing 52

- Stetsyura, G.G.** The Computer Clusters with Fast Synchronization
of Messages and with Fast Distributed Computing by the Network
Hardware 61

Control of Complex Technological Processes and Productions

- Martynova, L.A., Kiselev, N.K., Bezruk, G.G.** Effective Control
of a Hybrid System of Generation and Distribution of Electricity
for a Moving Autonomous Underwater Vehicle 70

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ С НАСТРОЙКОЙ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Н.А. Первушина, А.Н. Хакимова

Аннотация. Представлен результат разработки математических моделей двух нечетких регуляторов различных по структуре и принципу действия с настройкой генетическим алгоритмом для стабилизации динамического объекта на примере статически неустойчивого летательного аппарата в канале тангажа. Один из них разработан на основе обучающей выборки, другой — на основе правил нечеткой арифметики. Приведены результаты разработки алгоритмов синтеза предложенных математических моделей регуляторов. Представлены структура и принцип действия генетического алгоритма для настройки параметров нечетких регуляторов обоих типов. Выполнено тестирование разработанного генетического алгоритма при различных режимах, и определены лучшие сочетания настроек параметров регуляторов. Получены результаты математического моделирования работы системы стабилизации с предложенными типами регуляторов после их настройки при наличии случайных возмущений на объект управления. Результаты работы системы стабилизации с разработанными регуляторами показали высокое быстродействие в сравнении с классическим способом управления. Предложенный в статье подход к построению нечетких регуляторов рекомендован при решении задачи стабилизации нелинейного неустойчивого динамического объекта с переключением режимов управления.

Ключевые слова: динамический объект, нечеткий регулятор, генетический алгоритм, система стабилизации, канал тангажа, статически неустойчивый летательный аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задачи стабилизации динамических объектов в современных системах управления (СУ) все чаще применяются различные интеллектуальные методы. Повышенным интересом пользуются нечеткие регуляторы (НР), в основном благодаря способности работать в условиях наличия НЕ-факторов (нечеткости, неполноты, неточности и др.). Нечеткие регуляторы сохраняют работоспособность при наличии помех и погрешностей измерения, а также быстро подстраиваются под меняющиеся условия эксплуатации при настройке и обучении [1–9]. Среди достоинств систем управления с НР выделяют [1]: малую чувствительность к изменению параметров объекта управления (ОУ),

а также высокое быстродействие и точное позиционирование ОУ.

В данной работе в качестве динамического объекта рассматривается беспилотный управляемый летательный аппарат (ЛА) статически неустойчивый в продольном направлении, СУ которого имеет три канала: канал крена, канал тангажа и канал рыскания [10–13]. Далее проведены исследования СУ в канале тангажа, быстродействие которого требуется обеспечить при сохранении требований по качеству и устойчивости. Классическим способом высокое быстродействие этой СУ обеспечить не удастся. Уменьшение желаемого времени переходного процесса приводит к росту перерегулирования и потере качества работы. Обеспечить требование по быстродействию необходимо, так как во время работы СУ происходит ступенчатое пере-

ключение управляющих режимов вследствие подачи потребного значения нормальной перегрузки на траектории полета ЛА. В настоящее время задача синтеза системы управления ЛА с классической формой сигналов управления [10–12, 14] решается, и авторами настоящей статьи в том числе, с помощью метода «замороженных коэффициентов» и построением линеаризованной модели ОУ для каждого из режимов полета с последующей аппроксимацией полученных коэффициентов в зависимости от уровня скоростного напора. Сигнал управления в канале тангажа формируется рассогласованием по перегрузке, интегралом от рассогласования и сигналом, пропорциональным угловой скорости тангажа (демпфером). Для решения задач стабилизации ЛА могут также применяться и классические ПИД-регуляторы [15, 16].

Существуют нечеткие варианты ПИД-регуляторов [3, 9, 17]. Эффективность работы подобных регуляторов авторами статьи [17] аргументировано ставится под сомнение. А также указывается недостаток алгоритмов нечеткого регулирования — сложность в сравнении с традиционными четкими алгоритмами. Однако существует множество примеров работы НР, улучшающих качество работы СУ. В статье [9] приводится пример успешной работы алгоритма нелинейного нечеткого логического регулятора ПИД-типа, где настройка в каждом из каналов управления осуществляется с помощью желаемой управляющей кривой. Нечеткий регулятор, предложенный в работе [18] для дистанционно пилотируемого ЛА со статической продольной неустойчивостью, по результатам математического моделирования показал успешное применение, как и нечеткие логические модели в исследованиях других авторов, например, [19, 20].

В настоящей статье предпринята попытка разработки и применения в рамках компьютерного моделирования математических моделей НР в системе стабилизации беспилотного ЛА. Нечеткое управление в данном случае рассматривается как альтернативный способ управления, обладающий важным достоинством — быстродействием.

Предлагаются математические модели двух нечетких регуляторов. Структуры НР отличаются от нечетких ПИД-регуляторов тем, что управление формируется не в каждом из каналов (пропорциональном, интегральном и дифференциальном) на основе работы базы правил конкретного канала [17], а в зависимости от всех входных переменных сразу. В работе предлагаются математические модели двух различных по структуре и принципу действия регуляторов в целях анализа работоспособности положенных в их основу нечетких моделей, а также для заключения о возможности их применения в рассматриваемом контуре СУ.

Что касается сложности описания нечетких моделей, то для НР она в основном определяется числом входов u , а также числом нечетких переменных (термов) для описания каждого входа x [1]. Число правил в базе правил НР определяется как x^y . Сокращать число термов x при описании входов и выхода НР нецелесообразно, так как пострадает качество работы. Уменьшение же числа входов u вполне возможно, что при правильно подобранной структуре НР, базе правил и механизме вывода не снизит качество. Поэтому есть смысл минимизировать именно значение u , например, сократить число входных переменных с трех (как у ПИД-регулятора) до двух. В связи с чем авторами статьи предлагаются математические модели с двумя входными переменными. Первый НР построен на основе обучающей выборки [21], а второй — с применением нечеткой арифметики [1]. Настройка параметров предлагаемых НР выполняется с помощью эвристического метода моделирования — генетического алгоритма (ГА) [2, 3].

Представленные в статье результаты получены путем компьютерного моделирования. В качестве ОУ рассматривается статически неустойчивый ЛА в канале тангажа. Полет ЛА в атмосфере Земли описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от параметров набегающего потока.

В статье представлены результаты последовательного решения задач:

- разработка математических моделей систем стабилизации с нечеткими регуляторами двух предложенных типов;
- разработка структуры и принципа действия каждого из нечетких регуляторов;
- создание ГА для настройки параметров нечетких регуляторов;
- проведение тестирования работы генетического алгоритма;
- получение результатов работы системы стабилизации (СС) с нечеткими регуляторами после их настройки с помощью ГА при наличии случайных возмущений.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При разработке математических моделей систем управления с НР за основу была взята классическая структура системы стабилизации (рис. 1). Сигнал управления в канале тангажа соответственно имеет вид [12]:

$$\sigma_{\text{в}} = K_i \int_{t_0}^t \Delta n_y dt + K_n \Delta n_y - K_{\omega_z} \omega_z. \quad (1)$$

Обозначения на рис. 1 и в формуле (1): ОУ — объект управления; РП — рулевой привод; $n_{y \text{ зад}}$ —

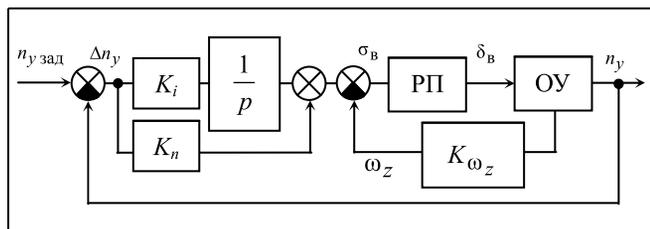


Рис. 1. Классическая структура системы стабилизации летательного аппарата в канале тангажа

заданное значение нормальной перегрузки; n_y — выходное значение СС; Δn_y — значение рассогласования $\Delta n_y = n_{y \text{ зад}} - n_y$; $\sigma_{\text{в}}$ — сигнал управления рулями высоты, град.; $\delta_{\text{в}}$ — угол отклонения рулей высоты, град.; K_p , K_n и K_{ω_z} — известные коэффициенты усиления соответствующей размерности; ω_z — угловая скорость тангажа, град./с; p — переменная преобразования Лапласа.

Объект управления описывается нелинейной математической моделью в связанной с ЛА системе координат [13]:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{m_z q S L}{I_{zz}} \cdot \frac{180}{\pi}, \\ \frac{d\alpha}{dt} = \left(\frac{g \cos \vartheta}{V} - \frac{c_y q S}{m V} \right) \cdot \frac{180}{\pi} + \omega_z; \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z, \end{cases} \quad (2)$$

где ω_z — угловая скорость тангажа, град./с; α — угол атаки, град.; ϑ — угол тангажа, град.; $m_z = m_z(M, \alpha, \delta_{\text{в}}, \dots)$ — аэродинамический коэффициент момента тангажа, нелинейно зависящий от параметров набегающего потока, угла отклонения рулей высоты и др., безразмерная величина; $c_y = c_y(M, \alpha, \delta_{\text{в}}, \dots)$ — аэродинамический коэффициент подъемной силы, нелинейно зависящий от параметров набегающего потока, угла отклонения рулей высоты и др., безразмерная величина; M — число Маха; q — скоростной напор, Па; S — площадь миделя, м^2 ; L — характерный линейный размер ЛА, м; m — масса ЛА, кг; V — воздушная скорость ЛА, м/с; $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Математическая модель РП в настоящей задаче принята линейной.

Требования к качеству работы СС:

- время отработки $t_{\text{пер}}$ заданного управляющего ступенчатого воздействия на уровне 0,95 от установившегося значения должно быть минимально возможным;
- перерегулирование σ в переходном процессе сигнала на выходе СС должно быть минимально на этапе синтеза и не превышать 30 %;
- уровень сигнала управления $\sigma_{\text{в}}$ должен быть ограничен: $\pm 20^\circ$.

В соответствии с перечисленными требованиями был выполнен синтез СС (см. рис. 1) методом логарифмических амплитудных характеристик [15]. Минимально возможное время переходного процесса в линеаризованной СС составляет $t_{\text{пер}} = 1,5 \text{ с}$ при $\sigma = 30 \%$, исходя из аэродинамических и массово-центровочных характеристик рассматриваемого ЛА. Повысить быстродействие СС со структурой, представленной на рис. 1, не удалось вследствие того, что значение σ уже принимает предельное значение, а уменьшение времени $t_{\text{пер}}$ приведет только к росту перерегулирования. Работа СС в канале тангажа с сигналом управления (1) приведена на рис. 10 (серая линия). В связи с вышеизложенным, целесообразно использовать свойства нечеткого управления для улучшения качества работы, рассматриваемой СС.

2. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Предлагаются два типа НР, входными переменными которых служат Δn_y (Δn_y^*) и ω_z , а выходной переменной — сигнал управления НР $\sigma_{\text{НР}}$. На рис. 2 представлены функциональные схемы СС в канале тангажа с двумя нечеткими регуляторами, которые отличаются по структуре и принципу действия. Схема СС с НР на основе обучающей выборки приведена на рис. 2, а, схема СС с НР, построенным с применением нечеткой арифметики показана на рис. 2, б.

Статическая ошибка в предлагаемых схемах СС компенсируется с помощью интеграла рассогласования $\int \Delta n_y dt$. Далее рассмотрим структуру каждого из предложенных нечетких регуляторов.

2.1. Структура и принцип работы НР₁

На основе математической модели СС (см. рис. 1) с сигналом управления (1), коэффициенты которого известны, получена обучающая выборка при моделировании работы СС с различной амплитудой ступенчатого входного воздействия $n_{y \text{ зад}} \cdot 1(t)$, где $1(t)$ — единичная ступенчатая функ-

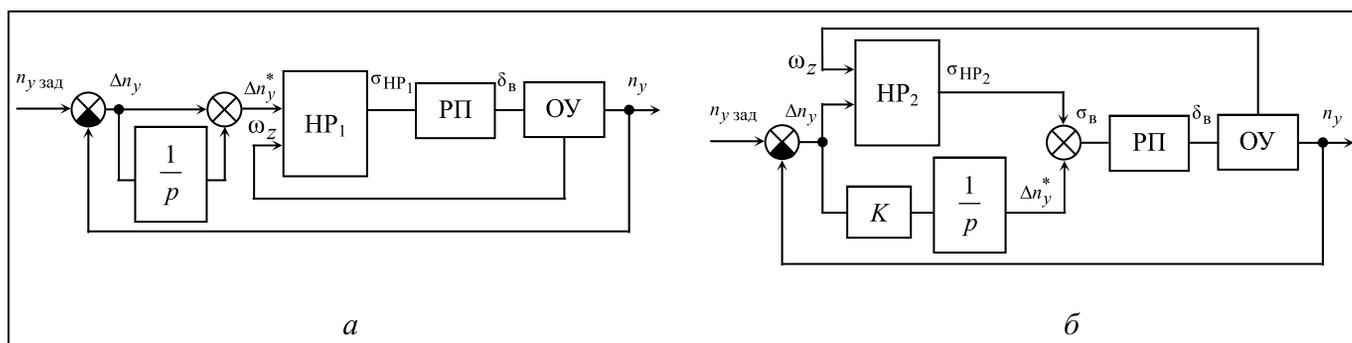


Рис. 2. Функциональные схемы СС с предлагаемыми НР: а — на основе обучающей выборки (НР_1); б — на основе нечеткой арифметики (НР_2), K — коэффициент усиления

ция [15, 16]. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Построение НР_1 предлагается выполнять в рамках структуры рис. 2, а. Первый вход НР обозначен Δn_y^* , сигнал которого складывается из рассогласования Δn_y и интеграла рассогласования $\int \Delta n_y dt$. Второй вход формируется уровнем угловой скоро-

сти тангажа ω_z . Выходом НР_1 служит сигнал управления $\sigma_{\text{НР}_1}$, который одновременно является сигналом управления в канале тангажа σ_v .

Параметры НР_1 имеют терм-множества, представленные на рис. 3. Число термов n взято достаточно большим для повышения точности [1] формирования выходного сигнала $\sigma_{\text{НР}_1}$. При двух

Обучающая выборка для синтеза НР_1

Таблица 1

$n_{y \text{ зад}}$	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5
Δn_y^{max}	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5
ω_z^{max} , град./с	-24	-22	-18	-13	-9	-4,5	2,5	7	12	16	18	24
σ_v^{max} , град.	20	20	15	10	5	1	-5	-10	-15	-20	-20	-20

База правил НР_1

Таблица 2

ω_z	Δn_y^*										
	ОБ	О ₄	О ₃	О ₂	О ₁	Н	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	ПБ
ОБ	ПБ ¹	ПБ ²	ПБ ³	П ₄ ⁴	П ₄ ⁵	П ₃ ⁶	П ₃ ⁷	П ₂ ⁸	П ₂ ⁹	П ₁ ¹⁰	Н ¹¹
О ₄	ПБ ¹²	ПБ ¹³	П ₄ ¹⁰	П ₄ ¹⁵	П ₃ ¹⁶	П ₃ ¹⁷	П ₂ ¹⁸	П ₂ ¹⁹	П ₁ ²⁰	Н ²¹	О ₁ ²²
О ₃	ПБ ²³	П ₄ ²⁴	П ₄ ²⁵	П ₃ ²⁶	П ₃ ²⁷	П ₂ ²⁸	П ₂ ²⁹	П ₁ ³⁰	Н ³¹	О ₁ ³²	О ₂ ³³
О ₂	П ₄ ³⁴	П ₄ ³⁵	П ₃ ³⁶	П ₃ ³⁷	П ₂ ³⁸	П ₂ ³⁹	П ₁ ⁴⁰	Н ⁴¹	О ₁ ⁴²	О ₂ ⁴³	О ₂ ⁴⁴
О ₁	П ₄ ⁴⁵	П ₃ ⁴⁶	П ₃ ⁴⁷	П ₂ ⁴⁸	П ₂ ⁴⁹	П ₁ ⁵⁰	Н ⁵¹	О ₁ ⁵²	О ₂ ⁵³	О ₂ ⁵⁴	О ₃ ⁵⁵
Н	П ₃ ⁵⁶	П ₃ ⁵⁷	П ₂ ⁵⁸	П ₂ ⁵⁹	П ₁ ⁶⁰	Н ⁶¹	О ₁ ⁶²	О ₂ ⁶³	О ₂ ⁶⁴	О ₃ ⁶⁵	О ₃ ⁶⁶
П ₁	П ₃ ⁶⁷	П ₂ ⁶⁸	П ₂ ⁶⁹	П ₁ ⁷⁰	Н ⁷¹	О ₁ ⁷²	О ₂ ⁷³	О ₂ ⁷⁴	О ₃ ⁷⁵	О ₃ ⁷⁶	О ₄ ⁷⁷
П ₂	П ₂ ⁷⁸	П ₂ ⁷⁹	П ₁ ⁸⁰	Н ⁸¹	О ₁ ⁸²	О ₂ ⁸³	О ₂ ⁸⁴	О ₃ ⁸⁵	О ₃ ⁸⁶	О ₄ ⁸⁷	О ₄ ⁸⁸
П ₃	П ₂ ⁸⁹	П ₁ ⁹⁰	Н ⁹¹	О ₁ ⁹²	О ₂ ⁹³	О ₂ ⁹⁴	О ₃ ⁹⁵	О ₃ ⁹⁶	О ₄ ⁹⁷	О ₄ ⁹⁸	ОБ ⁹⁹
П ₄	П ₁ ¹⁰⁰	Н ¹⁰¹	О ₁ ¹⁰²	О ₂ ¹⁰³	О ₂ ¹⁰⁴	О ₃ ¹⁰⁵	О ₃ ¹⁰⁶	О ₄ ¹⁰⁷	О ₄ ¹⁰⁸	ОБ ¹⁰⁹	ОБ ¹¹⁰
ПБ	Н ¹¹¹	О ₁ ¹¹²	О ₂ ¹¹³	О ₂ ¹¹⁴	О ₃ ¹¹⁵	О ₃ ¹¹⁶	О ₄ ¹¹⁷	О ₄ ¹¹⁸	ОБ ¹¹⁹	ОБ ¹²⁰	ОБ ¹²¹

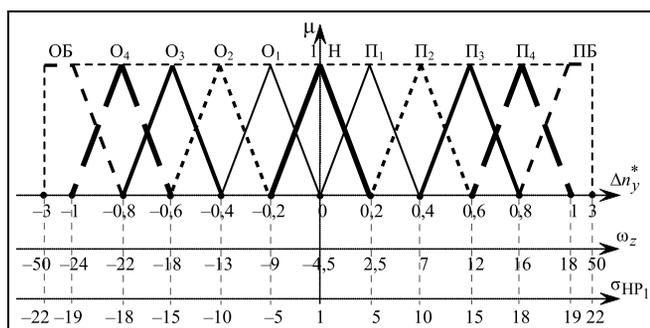


Рис. 3. Терм-множества для NP_1

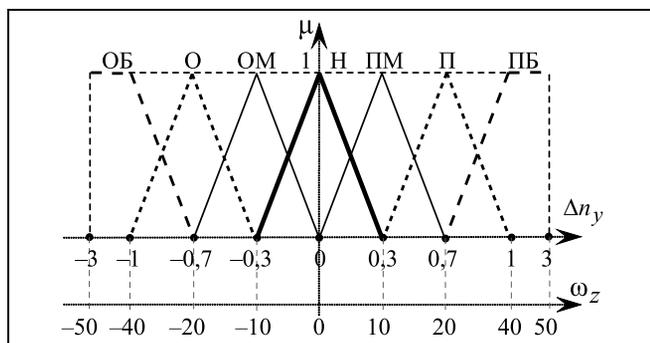


Рис. 4. Терм-множества для NP_2

входных параметрах ($y = 2$) и одиннадцати термах ($x = 11$) общее число правил равно $11^2 = 121$.

Обозначения термов на рис. 3: О — «отрицательный», П — «положительный», ОБ — «отрицательный большой», ПБ — «положительный большой», Н — «нулевой». При описании параметров NP_1 выбраны многоугольные функции принадлежности [1] в силу того, что именно они чаще всего применяются на практике и их существенное преимущество состоит в том, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями объем информации, который ограничивается данными об угловых точках, что важно при моделировании систем с НЕ-факторами.

Схематично база правил NP_1 приведена в табл. 2, где верхний индекс каждого элемента таблицы указывает номер правила в базе. Пример логического правила:

«Если Δn_y^* является ОБ и ω_z является ОБ, то σ_{NP_1} является ПБ».

В механизме вывода NP_1 для операции агрегирования (логическая связка И) применяется оператор минимума (MIN). Для построения промежуточного вывода по каждому из активированных правил применяется оператор умножения (PROD), а при построении результирующего вывода (объ-

единения промежуточных выводов) — оператор максимума (MAX) [1]. Это схема Ларсена. Отличие такой схемы вывода от наиболее часто применяемого механизма вывода Мамдани в том, что применяется оператор PROD вместо оператора MIN. Это позволяет учесть влияние на результат двух параметров, а не только одного, соответствующего минимуму.

2.2. Структура и принцип работы NP_2

Для удобства синтеза NP_2 преобразуем классическое управляющее воздействие (1) таким образом:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= K \int_{t_0}^t (n_{y \text{ зад}} - n_y) dt + [Kc_1(n_{y \text{ зад}} - n_y) + c_2(-\omega_z)] = \\ &= K \int_{t_0}^t (n_{y \text{ зад}} - n_y) dt + \sigma_{NP_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где K — настраиваемый коэффициент усиления, соизмеримый с коэффициентом K_i из выражения (1); c_1 — настраиваемый коэффициент пропорциональности из интервала (0, 1], определяющий соотношение коэффициентов сигнала управления K_n к коэффициенту K_i из выражения (1); c_2 — постоянный коэффициент, определяемый максимальным уровнем возмущения в начальный момент времени в виде угловой скорости тангажа ω_z ($c_2 = K_{\omega_z}$).

В структуре NP_2 также, как в структуре NP_1 , два входа и один выход. На первый вход подается рассогласование Δn_y . Второй вход формируется значением угловой скорости тангажа ω_z . Выходом NP_2 служит сигнал управления σ_{NP_2} , который входит в состав управляющего воздействия (3).

Два входных параметра Δn_y и ω_z описаны термножествами, представленными на рис. 4. Число

Таблица 3

База правил NP_2

ω_z	Δn_y						
	ОБ	О	ОМ	Н	ПМ	П	ПБ
ОБ	$S_{ОБ}^1$	S_3^2	S_3^3	S_3^4	S_3^5	S_3^6	S_4^7
О	S_3^8	S_1^9	S_1^{10}	S_1^{11}	S_1^{12}	S_1^{13}	S_2^{14}
ОМ	S_3^{15}	S_1^{16}	S_1^{17}	S_1^{18}	S_1^{19}	S_1^{20}	S_2^{21}
Н	S_3^{22}	S_1^{23}	S_1^{24}	S_1^{25}	S_1^{26}	S_1^{27}	S_2^{28}
ПМ	S_3^{29}	S_1^{30}	S_1^{31}	S_1^{32}	S_1^{33}	S_1^{34}	S_2^{35}
П	S_3^{36}	S_1^{37}	S_1^{38}	S_1^{39}	S_1^{40}	S_1^{41}	S_2^{42}
ПБ	S_4^{43}	S_2^{44}	S_2^{45}	S_2^{46}	S_2^{47}	S_2^{48}	$S_{ПБ}^{49}$

термов при описании параметров для $НР_2$ взято меньше, чем для $НР_1$, поскольку выходной сигнал в $НР_2$ не назначается, а формируется для каждой комбинации входных параметров по правилам сложения нечетких чисел в LR-форме [1]. При двух входных параметрах ($y = 2$) и семи термах ($x = 7$) общее число правил в базе правил $НР_2$ составило 49. Схематично база правил $НР_2$ приведена в табл. 3, где S — обозначение результата сложения соответствующих нечетких чисел, а номер правила в базе указывает верхний индекс каждого элемента

таблицы. Схема механизма вывода такая же, как в $НР_1$ — алгоритм Ларсена. На рис. 4 обозначения соответствуют рис. 3, ОМ — «отрицательный маленький», ПМ — «положительный маленький».

3. СТРУКТУРА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Для настройки параметров обоих НР был разработан ГА, порядок работы которого схематично приведен в табл. 4. Структура ГА принята типовой

Таблица 4

Порядок работы генетического алгоритма

Этапы	НР	
	$НР_1$	$НР_2$
Начальные данные	Тип нечеткого регулятора NR : $NR = 1$ $NR = 2$ Режим работы алгоритма: вероятностный или детерминированный Группы генов и диапазоны с указанием верхних (2) и нижних (1) границ: a_1 — массив границ терма Δn_y^* из $[\Delta n_y^1, \Delta n_y^2]$ b_1 — коэффициент из $[K^1, K^2]$ a_2 — массив границ терма ω_z из $[\omega_z^1, \omega_z^2]$ b_2 — коэффициент из $[c_1^1, c_1^2]$ a_3 — массив границ терма $\sigma_{НР1}$ из $[\sigma^1, \sigma^2]$ b_3 — коэффициент из $[c_2^1, c_2^2]$ b_4 — массив границ терма Δn_y из $[n_y^1, n_y^2]$ b_5 — массив границ терма ω_z из $[\omega_z^1, \omega_z^2]$ Число групп генов n в хромосоме: $n = 3$ $n = 5$ Число хромосом для кроссинговера m — натуральное число ≥ 2 Число шагов до оптимального решения: k Стартовое значение функции ¹ пригодности по формуле (4): IKO_0	
Работа генетического алгоритма	Формирование начальной популяции (результат мутации) $m = 2$: $H_1 = \{a_1, a_2, a_3\}$ $H_2 = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ $H'_1 = \{a'_1, a'_2, a'_3\}$ $H'_2 = \{b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5\}$ Выполнение кроссинговера (перемешивание групп генов): число хромосом в популяции $S = m^n$ $S = 2^3 = 8$: $S = 2^5 = 32$: $\{a_1, a_2, a_3\}$ $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ $\{a_1, a_2, , a'_3\}$ $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b'_5\}$ $\{a_1, a'_2, a_3\}$ $\{b_1, b_2, b_3, b'_4, b_5\}$ $\{a'_1, a'_2, a'_3\}$ $\{b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5\}$ Оценка степени пригодности хромосом текущей популяции: по значениям ФП для каждой из хромосом популяции определяется процент выживаемости и выбирается лучшая хромосома ² Проверка условия останова ³ алгоритма Получение оптимальных ⁴ параметров НР $H_{1\text{ опт}} = \{a_1, a_2, a_3\}$ $H_{2\text{ опт}} = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	
Примечания. ¹ В вероятностном режиме значение IKO_0 соответствует первой сгенерированной хромосоме, которая обеспечивает перерегулирование в СС менее 30 %. ² В случае отсутствия лучшей хромосомы заново выполняется этап формирования начальной популяции. ³ Число отобранных хромосом должно быть равно k , если условие не выполняется, то продолжает формироваться начальная популяция. ⁴ Оптимальные параметры НР соответствуют лучшей из k отобранных хромосом.		

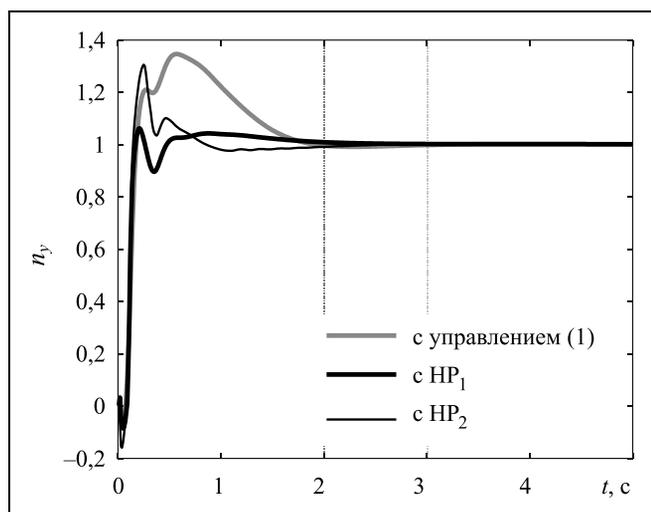


Рис. 5. Предварительные результаты работы СС с разными типами регуляторов

[3], ГА подобной структуры разрабатывался авторами ранее и был успешно практически применен в рамках модельной задачи стабилизации неустойчивого ОУ [21].

Детерминированный режим работы ГА предполагает, что начальная популяция содержит одну стартовую хромосому, а следующие хромосомы строятся из имеющейся с помощью мутации генов — замены нескольких значений генов случайными числами из соответствующих диапазонов. Вероятностный режим работы ГА применяется в том случае, если стартовая хромосома отсутствует. Тогда начальная популяция генерируется случайным образом в рамках заданных диапазонов.

Функция пригодности (ФП) ГА может быть выражена в виде интегральной оценки качества работы СС. В данном ГА предлагается воспользоваться интегральным критерием качества ИКО (интеграл квадрата ошибки) [15, 21]:

$$ИКО = \int_{t_0}^t \Delta n_y^2 dt. \quad (4)$$

Работа ГА осуществляется в рамках СС канала тангажа ЛА (рис. 2) в зависимости от типа настраиваемого НР (НР₁ или НР₂).

Компьютерное моделирование работы ГА выполнялось для нелинейной математической модели динамики полета неустойчивого беспилотного ЛА в канале тангажа в соответствии со структурными схемами (см. рис. 2). Перед запуском ГА задается число шагов k последовательного приближения к оптимальному решению, которое должно выбираться разумно, исходя из возможностей вычислительной техники и времени решения пос-

тавленной задачи. Под оптимальным решением понимается результат последовательного подбора генетическим алгоритмом параметров НР по минимуму критерия (4) за k шагов.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

На начальном этапе разработки коэффициенты НР₁ и НР₂ были подобраны вручную, опираясь на обучающую выборку (см. табл. 1). Математические модели нечетких регуляторов реализованы на языке программирования Си. Моделирование работы СС выполнялось в стандартной среде программирования и инженерных расчетов. Результат моделирования работы СС с разными типами регуляторов при $t = 5$ с представлен на рис. 5.

Время переходного процесса во всех случаях не превышает 1,5 с. Однако системы стабилизации с управлением (1) и с НР₂ после ручной настройки его параметров работают с предельно допустимым перегулированием около 30 %. Система стабилизации с НР₁ работает удовлетворительно с перегулированием 6 %.

Качество переходного процесса в СС с НР₁ и НР₂ может быть улучшено с помощью настройки коэффициентов НР посредством разработанного ГА (см. далее § 5).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ГА ПРИ НАСТРОЙКЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Для подтверждения работоспособности ГА при настройке коэффициентов НР было выполнено тестирование двух типов регуляторов (НР₁ и НР₂) в двух режимах работы (детерминированный и вероятностный). В результате было сформировано 4 тестовых режима.

Для каждого из режимов работы ГА условия проведения тестирования были выбраны одинаковыми: $m = 2$, $k = 10$, $t = 3$ с. Число запусков ГА N принято равным 30, чтобы обеспечить объем малой выборки для статистического анализа результатов [22].

На рис. 6, а для примера приведен результат подбора параметров НР₁ в одном из запусков ГА в детерминированном режиме. Тонкой линией показаны результаты работы на 9-ти промежуточных итерациях при отборе лучшей хромосомы. Лучший результат $H_{1\text{ опт}}$ получен на 10-м шаге подбора и выделен жирной линией. На рис. 6, б приведен результат подбора параметров НР₂ в одном из запусков ГА в вероятностном режиме. Тонкой линией также показан результат работы СС с НР₂ на 9-ти

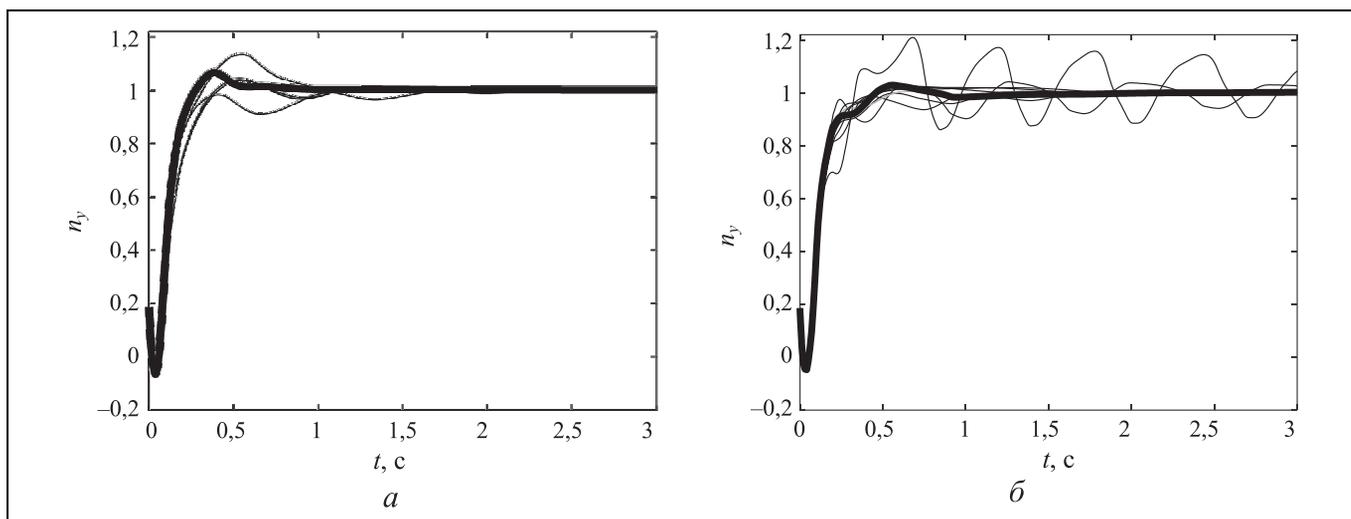


Рис. 6. Подбор параметров нечетких регуляторов: *a* — для $НР_1$ в детерминированном режиме; *b* — для $НР_2$ в вероятностном режиме

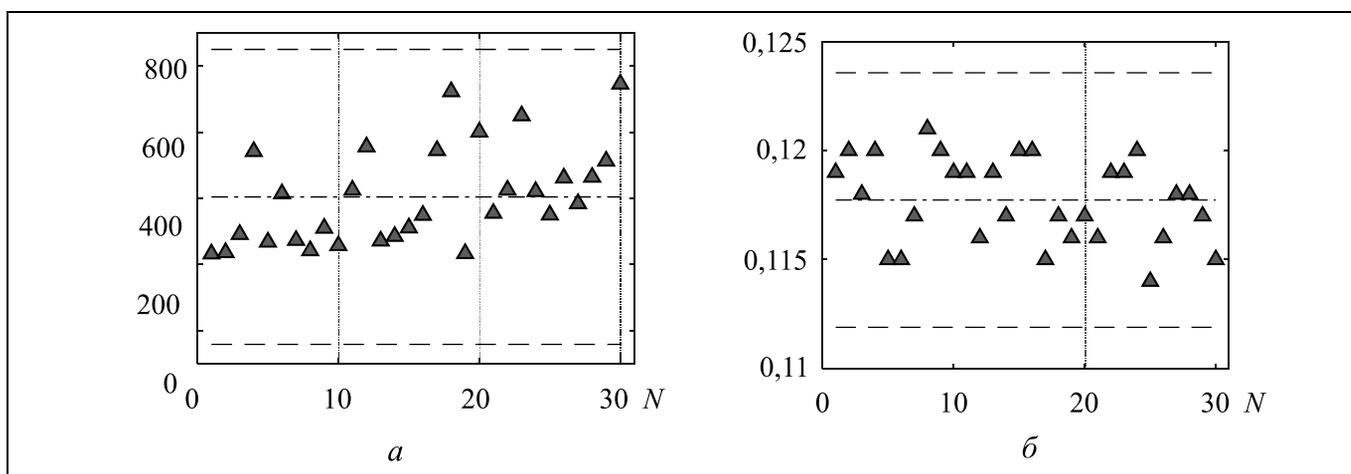


Рис. 7. Данные при настройке параметров $НР_1$ в детерминированном режиме: *a* — число итераций ГА; *b* — значения ФП

промежуточных итерациях одного из запусков ГА, а также жирно выделен конечный результат, соответствующий H_{2opt} .

На рис. 7 изображены статистические данные по числу итераций и значению ФП (ИКО) в зависимости от запуска ГА при настройке параметров $НР_1$ в детерминированном режиме. Отмечены средние значения и интервалы в ЗСКО. Видно, что данные расположены в хаотичном порядке, группируются относительно среднего значения и не выходят за границы интервала ЗСКО, что служит качественным подтверждением того, что анализируемые параметры имеют нормальное распределение, т. е. не зависят от номера запуска и не коррелированы между собой.

На рис. 8 изображены аналогичные статистические данные, полученные при настройке параметров $НР_2$ в вероятностном режиме.

Данные расположены в хаотичном порядке, группируются относительно среднего значения, но имеют резко выделяющиеся значения (РВЗ) в разных запусках. Нормальность распределения подтвердить имеющейся малой выборкой нельзя. Отметим, что число итераций в вероятностном режиме при поиске оптимального решения по результатам тестирования имеет большой разброс: от 10 до 500 значений. Иногда случается, что начальная хромосома генерируется не самым удачным образом и последующие 10 шагов ее оптимизации не приводят к надлежащему результату, хотя в сво-

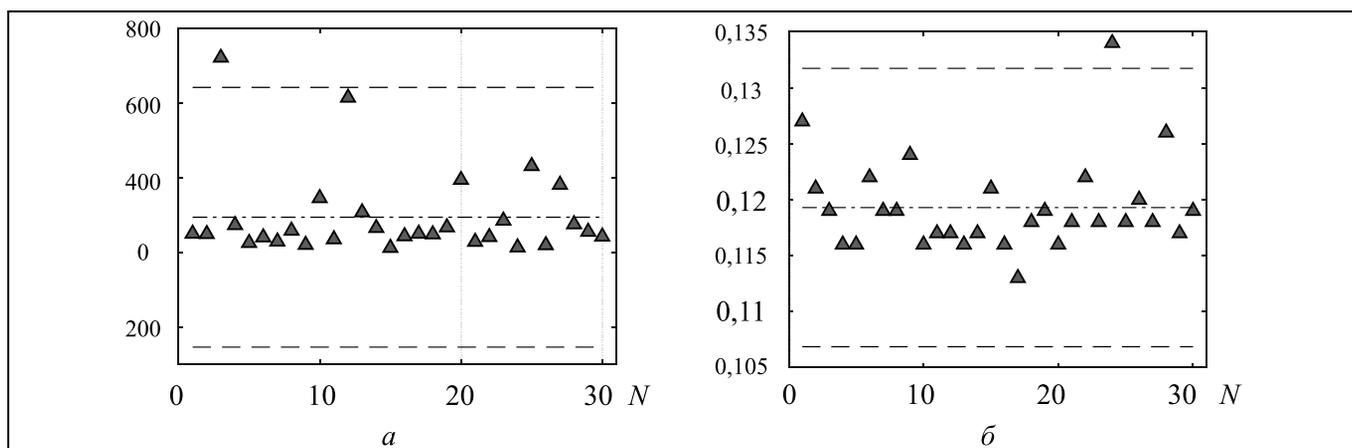


Рис. 8. Данные при настройке параметров НР₂ в вероятностном режиме: *a* — число итераций ГА; *б* — значения ФП

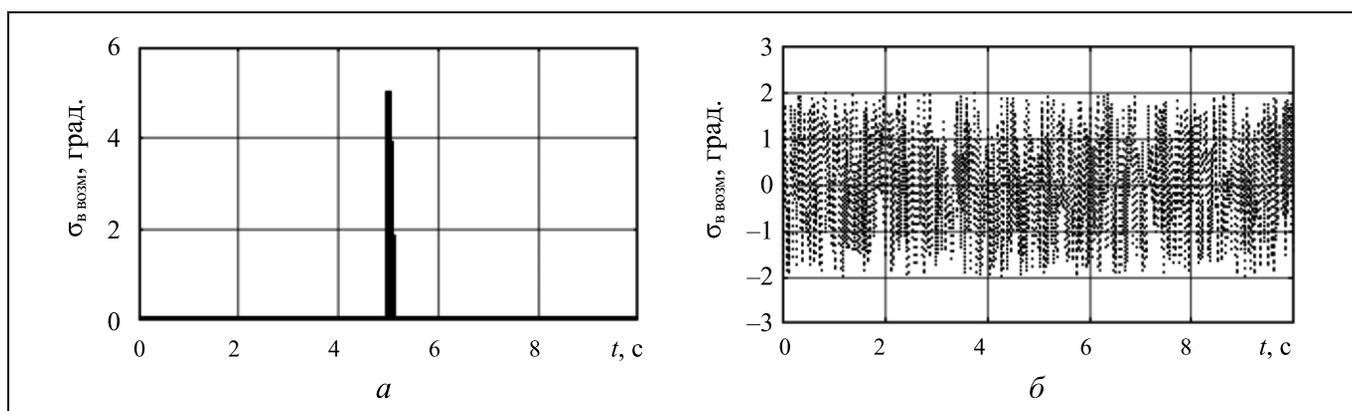


Рис. 9. Виды возмущений: *a* — одиночный импульс; *б* — помеха типа «белый шум»

ем запуске этот результат является лучшим. Перечисленные особенности работы ГА могут являться причинами появления РВЗ.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Тестирование работы СС неустойчивого ОУ с предложенными типами НР после настройки ГА было выполнено в целях оценки работоспособности СС в условиях наличия случайных возмущений на ОУ в виде дополнительного управляющего воздействия $\sigma_{в\,возм}$.

Для подтверждения работоспособности СС с НР были выбраны 3 тестовых режима при наличии:

- случайного возмущения в виде одиночного импульса (рис. 9, *a*);
- возмущения в момент включения СС;
- помехи типа «белый шум» (рис. 9, *б*).

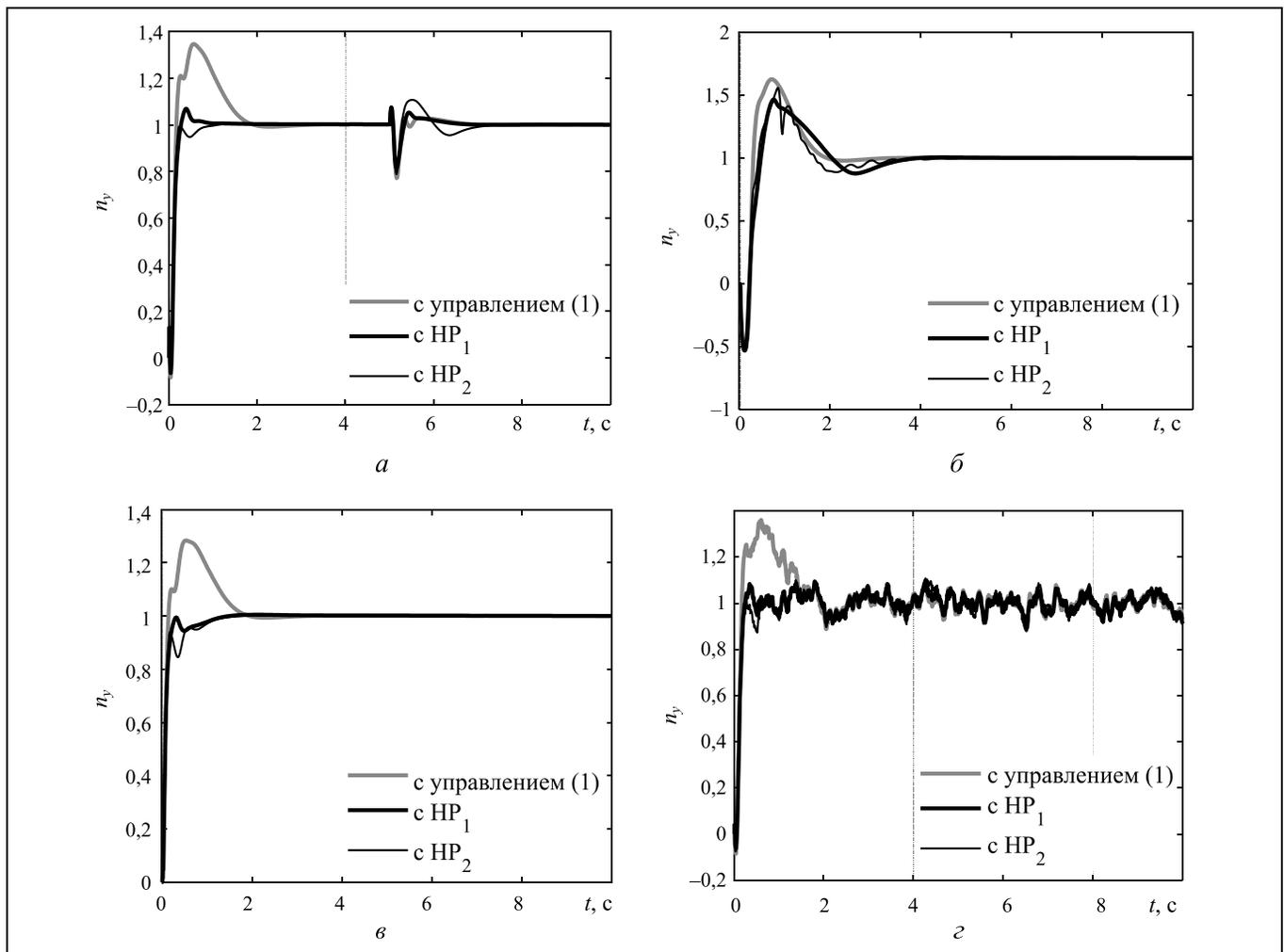
Системы стабилизации с НР обладают высоким быстродействием, что подтвердилось в проведенных тестах при $t = 10$ с (рис. 10). Для сравнения, время переходного процесса $t_{пер}$ и перерегулирование σ в СС при отсутствии возмущений (см. рис. 10, *a* при $t = 0...5$ с) приведено в табл. 5.

Из результатов компьютерного моделирования следует вывод о том, что применение НР после их

Таблица 5

Значения показателей качества переходного процесса

СС	Показатель	
	Время переходного процесса $t_{пер}$, с	Перерегулирование σ , %
с НР ₁	0,45	7
с НР ₂	0,50	0
с управлением (1)	1,50	35


 Рис. 10. Результаты моделирования работы СС с НР₁ и НР₂ с оптимальными параметрами (пояснения в тексте)

настройки с помощью ГА в рассматриваемой СС позволило увеличить быстродействие системы в 3 раза и уменьшить перерегулирование в 5 раз и более.

Исключение составил результат тестирования, представленный на рис. 10, б. Здесь качество работы СС соизмеримо с классической схемой стабилизации. Детерминированный режим работы ГА позволил подобрать лучшие сочетания параметров

как для НР₁, так и для НР₂; НР₁ обеспечивает лучшее качество работы СС по критерию ИКО при наличии случайных возмущений практически во всех тестовых режимах (табл. 6). Система стабилизации с нечеткими регуляторами не обладает фильтрующими свойствами при случайном входном воздействии типа «белый шум» и реагирует на данное воздействие также, как при классическом способе стабилизации.

Таблица 6

Значения критерия ИКО для СС в каждом из тестовых режимов за 10 с

СС	Режим			
	Одиночный импульс	Возмущение в момент включения		Помеха типа «белый шум»
		$\omega_{z t_0} = -30$, градус/с	$\omega_{z t_0} = 15$, град./с	
с НР ₁	0,120	0,612	0,063	0,127
с НР ₂	0,124	0,586	0,067	0,133
с управлением (1)	0,200	0,702	0,116	0,203



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен результат разработки математических моделей различных по структуре и принципу действия нечетких регуляторов в системе стабилизации динамического объекта на примере статически неустойчивого летательного аппарата (ЛА) в канале тангажа. Настройка коэффициентов регуляторов выполнена с помощью разработанного генетического алгоритма (ГА). Тестирование работы ГА проведено в объеме малой выборки с целью получения статистических оценок для базовых параметров. По результатам тестирования выбраны лучшие сочетания настроек параметров для каждого нечеткого регулятора (НР). Подтверждена работоспособность ГА.

Работоспособность математических моделей НР подтверждена в ходе тестирования работы системы стабилизации (СС) при ступенчатом входном воздействии и наличии случайных возмущений. Результаты тестов показали, что детерминированный режим работы ГА позволил подобрать лучшее сочетание параметров нечетких регуляторов в сравнении с вероятностным режимом, и в большинстве тестов СС с НР показала лучшее качество работы по интегральному критерию качества. Рассмотренная система стабилизации с НР имеет высокое быстродействие, однако не обладает фильтрующими свойствами по отношению к случайным возмущениям.

Реализация математических моделей НР автоматами выполнена в виде программного кода, что позволяет осуществлять компьютерное моделирование работы СС. Предложенные математические модели НР с настройкой параметров ГА по результатам моделирования позволяют повысить быстродействие СС в 3 раза без ухудшения качества работы по интегральному критерию. Техническая реализация данных алгоритмов при испытаниях на реальном объекте управления и в реальной СС требует дальнейшей проработки.

Предложенный подход к построению НР может быть рекомендован для решения задачи стабилизации нелинейного неустойчивого динамического объекта с переключением режимов управления, если необходимо значительно повысить быстродействие без ухудшения качества работы СС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. А.Г. Подвесовского, Ю.В. Тюменцева. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 798 с. [*Piegat, A.* Nechetkoe modelirovanie i upravlenie / Per. s angl.: A.G. Podvesovskogo, Yu.V. Tyumentseva. — М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. — 798 s. (In Russian)]
2. *Васильев В.И., Ильясов Б.Г.* Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. — М.: Радиотехника, 2009. — 392 с. [*Vasil'ev, V.I., Ilyasov, B.G.* Intellektual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika: uchebnoe posobie. — М.: Radiotekhnika, 2009. — 392 s. (In Russian)]
3. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горная линия. Телеком, 2004. — 452 с. [*Rutkovskaya, D., Pili'nskii, M., Rutkovskii, L.* Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: Per. s pol'sk.: I.D. Rudinskogo. — М.: Goryachaya liniya. Telekom, 2004. — 452 s. (In Russian)]
4. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебн. / под ред. Н.Д. Егупова.* М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с. [*Metody robastnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya: uchebnik / pod. red. N.D. Egupova.* — М.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. — 744 s. (In Russian)]
5. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 736 с. [*Leonenkov, A.V.* Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. — SPb.: BKHV-Peterburg, 2003. — 736 s. (In Russian)]
6. *Васильев С.Н., Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф.* и др. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. Ч. 1. Нечеткие модели, логико-лингвистические и аналитические регуляторы // Датчики и системы. — 2017. — № 1. — С. 4—19. [*Vasil'ev, S.N., Kudinov, Yu.I., Pashchenko, F.F., et al.* Intellektual'nye sistemy upravleniya i nechetkie regulatory. Ch. 1. Nechetkie modeli, logiko-lingvisticheskie i analiticheskie regulatory // Datchiki i sistemy. — 2017. — No. 1. — S. 4—19. (In Russian)]
7. *Васильев С.Н., Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф.* и др. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. Ч. 2. Обучаемые нечеткие регуляторы, нечеткие ПИД-регуляторы // Ibid. — № 2. — С. 3—12. [*Vasil'ev, S.N., Kudinov, Yu.I., Pashchenko, F.F., et al.* Intellektual'nye sistemy upravleniya i nechetkie regulatory. Ch. 2. Obuchaemye nechetkie regulatory, nechetkie PID-regulatory // Ibid. — No. 2. — S. 3—12. (In Russian)]
8. *Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н.* Нейронно-нечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины ТВД на базе ANFIS-сети // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 10. — С. 20—23. [*Titov, Yu.K., Filippenkov, R.G., Khizhnyakov, Yu.N.* Neironechetkii regulatoryator chastoty vrashcheniya silovoi turbiny TVD na baze ANFIS-seti // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. — 2013. — No. 10. — S. 20—23. (In Russian)]
9. *Бураков М.В., Яковец О.Б.* Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. — 2015. — Т. 58, № 10. — С. 804—808. [*Burakov, M.V., Yakovets, O.B.* Nechetkoe upravlenie silovym giroskopicheskim priborom // Izv. vuzov. Priborostroenie. — 2015. — Vol. 58, no. 10. — S. 804—808. (In Russian)]
10. *Боднер В.А.* Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1973. — 506 с. [*Bodner, V.A.* Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami. — М.: Mashinostroenie, 1973. — 506 s. (In Russian)]
11. *Остославский И.В., Стразева И.В.* Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1969. — 499 с. [*Ostoslavskii, I.V., Strazheva, I.V.* Dinamika poleta. Traektorii letatel'nykh apparatov. — 2-e izd., pererab. i dop. — М.: Mashinostroenie, 1969. — 499 s. (In Russian)]
12. *Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чукулаев М.С.* Системы автоматического управления самолетом — М.: Машиностроение, 1987. — 240 с. [*Mikhalev, I.A., Okoemov, B.N., Chikulaev, M.S.* Sistemy avtomaticheskogo upravleniya samoletom. — М.: Mashinostroenie, 1987. — 240 s. (In Russian)]
13. *Лебедев А.А., Карабанов В.А.* Динамика систем управления беспилотных летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1965. — 528 с. [*Lebedev, A.A., Karabanov, V.A.* Dinamika sistem upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami. — М.: Mashinostroenie, 1965. — 528 s. (In Russian)]
14. *Обносов В.Б., Воронов Е.М.* и др. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1965. — 240 с. [*Obnosov, V.B., Voronov, E.M., et al.* Stabilizatsiya, navedeniye, gruppovoye upravleniye i sistemnoye modelirovaniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov. — М.: Mashinostroenie, 1965. — 240 s. (In Russian)]

- лотных летательных аппаратов. Современные подходы и методы: в 2 т. / под ред. Е.М. Воронова, Е.А. Микрина, Б.В. Обносова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 464 с. [Obnosov, V.B., Voronov, E.M., et al. Stabilizatsiya, navedeniye, gruppovoye upravleniye i sistemnoye modelirovaniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Sovremennyye podkhody i metody: 2 t. / pod red. E.M. Voronova, E.A. Mikrina, B.V. Obnosova. — М.: Izdatel'stvo MG TU im. N.E. Bauman, 2018. — 464 s. (In Russian)]
15. Бесекиерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2007. — 752 с. [Besekierskii, V.A., Popov, E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. — 4-e izd., pererab i dop. — SPb.: Professiya, 2007. — 752 s. (In Russian)]
 16. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. — 832 с. [Dorf, R. Sovremennyye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop; Per. s angl.: B.I. Kopylova. — М.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2004. — 832 s. (In Russian)]
 17. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2018. — Т. 19, № 12. — С. 762—769. [Filimonov, A.B., Filimonov, N.B. Nekotorye problemnyye aspekty nechetkogo PID regulirovaniya // Me-khatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. — 2018. — Vol. 19, no. 12. — P. 762—769. (In Russian)]
 18. Лысенко Л.Н., Кыонг Н.Д., Чыонг Ф.В. Моделирование движения дистанционно пилотируемого ЛА с модифицированным нечетким регулятором в контуре управления полетом // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. — 2013. — № 2. — С. 24—30. [Lysenko, L.N., Kyong, N.D., Chyong, F.V. Modelirovanie dvizheniya distantsionno pilotiruemogo LA s modifitsirovannym nechetkim regulyatorom v konture upravleniya poletom // Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal. — 2013. — No. 2. — P. 24—30. (In Russian)]
 19. Ульянов Г.Н., Иванов С.А., Владыко А.Г. Модель канала управления беспилотного летательного аппарата с нечетким контроллером // Информационно-управляющие системы. — 2012. — № 4. — С. 70—73. [Ul'yanov, G.N., Ivanov, S.A., Vladyko, A.G. Model' kanala upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata s nechetkim kontrollerom // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. — 2012. — No. 4. — S. 70—73. (In Russian)]
 20. Матвеев Е.Н., Глинчиков В.А. Нечеткий логический вывод в системе управления беспилотного летательного аппарата // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. — 2011. — № 4. — С. 79—91. [Matveev, E.N., Glinchikov, V.A. Nchetkii logicheskii vyvod v sisteme upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. — 2011. — No. 4. — S. 79—91. (In Russian)]
 21. Первушина Н.А., Доновский Д.Е., Хакимова А.Н. Разработка методики синтеза нейро-нечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом // Вестник концерна ВКО «Алмаз — Антей». — 2018. — № 4. — С. 82—90. [Pervushina, N.A., Donovskii, D.E., Khakimova, A.N. Razrabotka metodiki sinteza neuro-nechetkogo regulyatora s nastroykoi geneticheskim algoritmom // Vestnik Kontserna VKO «Almaz — Antei». — 2018. — No. 4. — S. 82—90. (In Russian)]
 22. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. — 10-е изд., стереотип. — М.: Академия, 2005. — 576 с. [Venttsel', E.S. Teoriya veroyatnostei: uchebnik dlya vuzov. — 10-e izd., stereotip. — М.: Akademiya, 2005. — 576 s. (In Russian)]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Ф. Пащенко.
- Поступила в редакцию 1.10.2019, после доработки 3.06.2020.
Принята к публикации 15.06.2020.
- Первушина Наталья Александровна — канд. физ.-мат. наук,
✉ p-n-a100678@yandex.ru,
Хакимова Алиса Наилевна — инженер-исследователь,
✉ alice_hakimova@mail.ru,
Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF FUZZY CONTROLLERS SET BY GENETIC ALGORITHM TO STABILIZE DYNAMIC OBJECT

N.A. Pervushina¹, A.N. Khakimova²

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

¹✉ p-n-a100678@yandex.ru, ²✉ alice_hakimova@mail.ru

Abstract. The paper presents mathematical models of two fuzzy controllers used to stabilize a dynamic object (e.g. statically unstable aircraft in the pitch channel). The controllers are different in structure and operating principle. They are set by using the genetic algorithm. The first controller is based on the training set, the second one — on the rules of fuzzy arithmetic. The design algorithms and mathematical models of the controllers are provided. The structure and operating principle of the genetic algorithm used to set the parameters of the fuzzy controllers of both types are described. The tests were conducted to study the behavior of the developed genetic algorithm in various modes; the best combinations of the controller parameters values were determined. The work also covers the results of mathematical modeling of the attitude control system operation with the proposed types of fuzzy controllers after their setting is performed, for the case when the aircraft is affected by random perturbations. The attitude control system equipped with the designed controllers showed better speed of response compared to the conventional control system. The approach proposed to design fuzzy controllers is recommended for solving the problems of stabilizing the non-linear unstable dynamic object with switching control modes.

Keywords: dynamic object, fuzzy controller, PID controller, genetic algorithm, stabilization system, pitch channel, statically unstable aircraft.

ИДЕАЛЬНЫЙ ПОЛИТИК ДЛЯ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ: ПОДХОД К АНАЛИЗУ ИДЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ¹

Л.Г. Бызов, Д.А. Губанов, И.В. Козицин, А.Г. Чхартишвили

Аннотация. Рассмотрена задача определения идейно-политических предпочтений пользователей онлайн-социальных сетей. Предложена модель, позволяющая оценивать идейно-политические предпочтения пользователей онлайн-социальной сети ВКонтакте на основе информации из их аккаунтов и учитывающая основные идеологические направления в современной России (ДЛС-модель). В основе метода оценки лежит обучение с учителем, при помощи которого выявление предпочтений сводится к задаче многоклассовой классификации и расчету апостериорных вероятностей принадлежности классам. Для реализации данного метода создана база размеченных анонимизированных данных, проведен ее анализ, разработаны соответствующие алгоритм и комплекс программ. Далее сформулирована и решена задача выбора политическим деятелем стратегии идеологического позиционирования в модели стохастических предпочтений (частным случаем которой является ДЛС-модель), которая потенциально позволит получить наибольшую поддержку рассматриваемого множества пользователей. На основании решения этой задачи и с помощью анализа данных получены стратегии позиционирования для некоторых популярных сетевых сообществ.

Ключевые слова: онлайн-социальная сеть, идейно-политические взгляды, ДЛС-модель, большие данные, задача поиска оптимальной идеологической позиции.

ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи определения идейно-политических предпочтений пользователей онлайн-социальных сетей имеет огромную важность в теориях информационного управления и информационной войны [1–4]. Знание, какую позицию занимает тот или иной пользователь, какие идейно-политические ценности имеют для него большое значение, а какие несущественны, позволяет политикам, анализирующим подобную информацию, корректировать свои действия в зависимости от конкретных целей.

К настоящему моменту предложено множество методов для решения этой задачи [5–7]. В рамках данной работы мы предлагаем подход, позволяющий не только оценивать идейные предпочте-

ния пользователей онлайн-социальной сети (на примере сети ВКонтакте), но и использовать полученную оценку для выбора политическим деятелем той стратегии идеологического позиционирования, которая потенциально позволит получить наибольшую поддержку в рамках рассматриваемого множества пользователей. Ключевую роль здесь играет базис (набор основных идеологических направлений), в котором рассматриваются идейно-политические взгляды.

Отметим, что в данной работе мы не рассматриваем вопрос предпочтений пользователей в аспекте выбора между различными политическими деятелями (этот выбор зависит от ряда факторов, включая интенсивность политической рекламы, ораторское мастерство политика и др.). Предмет нашего рассмотрения — идейные (идейно-политические) предпочтения индивидов [8].

Далее в § 1 дан краткий обзор известных классификаций идейно-политических направлений и введена новая классификация, используемая в дан-

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 18-29-22042).

ной работе. В § 2 описывается подход к определению идеологических предпочтений пользователей онлайн-социальной сети ВКонтакте (этот подход является развитием методологии, описанной в [9, 10]). В § 3 поставлена и решена задача поиска оптимальной идеологической позиции, минимизирующей сумму расстояний до позиций пользователей, а также приведены примеры расчета «идеальной» позиции. В Заключении приведены основные выводы и намечены направления дальнейших исследований.

1. ОСНОВНЫЕ ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

Поиск основания для классификации респондентов по ценностям, идеологическим направлениям, идейно-политическим взглядам давно представляет собой актуальную задачу социологических и политологических исследований. Одна из первых классификаций предложена М. Рокичем в книге «Природа человеческих ценностей» [11]. Рокич выдвигает идею о том, что содержание главных четырех идеологических течений XX в. — социализма, коммунизма, фашизма и капитализма — можно представить в виде двумерной шкалы, образованной системами координат двух ценностей: свободы и равенства. Эта модель содержит четыре ячейки, образованные высоким и низким положением каждой из этих ценностей. Социализм соответствует ячейке с высокой степенью свободы и равенства, фашизм — положению с низкой степенью свободы и равенства, коммунизм занимает кластер с высокой степенью равенства и малой свободой, а при капитализме равенства нет, зато свобода велика. Для проверки этой модели Рокич в 1973 г. провел контент-анализ ключевых теоретических работ каждой из четырех идеологий, что позволило оценить позитивные и негативные упоминания свободы и равенства.

Теория Рокича вызвала ряд нареканий, заключающихся в том, что «...значимость таких ценностей, как свобода и равенство, может изменяться от одной среды к другой» [12, с. 266]. Отмечалось, что свобода и равенство воспринимаются неодинаково людьми из разных общественных групп и культур, что делает эти категории неоднозначными эталонами для систематизации всего спектра человеческих ценностей. «Для капиталиста свобода — это отсутствие принуждения, особенно от органов власти. Для социалиста свобода означает способность достичь своих целей, а это предполагает усилия органов власти по устранению проблем, например, бедности и расизма. Следовательно, сторонники этих идеологий могут оценить свободу только в их собственном понимании» [12, с. 266].

Схожим образом строит модель ценностей Р. Инглхарт [13, 14]. Он исходит из принципа, близкого концепции «пирамиды А. Маслоу», когда провозглашается иерархия ценностей, идущая от биологических к социальным потребностям высшего порядка. В основе ее лежит разделение ценностей на четыре составляющих: поддержание порядка в государстве, наделение людей большим влиянием на решение правительства, борьба с растущими ценами, защита свободы слова. Первая и третья составляющие в теории Инглхарта отнесены к материалистическим потребностям, вторая и четвертая — к постматериалистическим.

В статье [8] была предложена классификация, состоящая из шести политических направлений: социал-государственники, социал-демократы, радикальные националисты, державники, радикальные рыночники, западники.

В статье [15] рассмотрены шесть типов идеологических сторонников: националисты, сторонники стабильности, интернационалисты, неуверенные, рыночники и гуманисты. В той же статье были предложены четыре типа политических ценностей: рыночные, демократические, социалистические и державнические.

Далее идейно-политические взгляды россиян предлагается рассматривать как смесь трех ярко выраженных базисных установок: Державник-Либерал-Социалист [16]. Компонента «Державник» описывает, насколько индивид привержен идее о едином, сильном и независимом государстве. Компонента «Либерал» выражает важность для индивида уважения со стороны государства его (индивида) личных прав и свобод (в первую очередь политических и экономических). Компонента «Социалист» отвечает за стремление индивида к социально-экономической справедливости.

В 2018 г. Институт социологии РАН провел опрос [17], в котором респондентам предлагалось определить ценности, на которых должно строиться будущее России. Наибольшей поддержкой пользуются «Социальная справедливость» (59 %), «Права человека демократия, свобода самовыражения личности» (37 %), «Россия должна стать великой державой» (32 %). Нетрудно видеть, что эти ценности хорошо соответствуют трем базисным установкам, упомянутым выше: Социалист, Либерал, Державник соответственно.

Взгляды отдельного индивида (российского гражданина) в рамках предлагаемой в данной работе модели, которую будем далее называть *ДЛС-моделью*, представим в виде *ДЛС-вектора* (вектора-строки) из трех неотрицательных компонент, в сумме равных единице:

$$p = (p_1, p_2, p_3), \quad p_1, p_2, p_3 \geq 0, \quad p_1 + p_2 + p_3 = 1.$$



Например, индивид, описываемый ДЛС-вектором $(1, 0, 0)$, является чистым державником, которому не близки ценности либералов и социалистов. Напротив, индивид, характеризуемый ДЛС-вектором $(0, 1/2, 1/2)$, отвергает идеологию державников, разделяя при этом воззрения либералов и социалистов примерно в равной пропорции. Случай $(1/3, 1/3, 1/3)$ соответствует индивиду, не отдающему предпочтения ни одному из трех идеологических направлений.

В заключение § 1 отметим, что конкретный набор базисных взглядов, актуальный для нынешнего российского идейно-политического ландшафта, со временем может потребовать корректировки. Однако, как будет видно далее, предлагаемые в данной работе методы достаточно универсальные в том смысле, что их можно применить и по от-

ношению к другому базисному набору (в том числе к набору с числом базисных взглядов, отличным от трех).

2. ВЫЯВЛЕНИЕ ИДЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ ВКОНТАКТЕ

2.1. Маркерные аккаунты

Отправной точкой для выявления предпочтений пользователей онлайн-социальной сети ВКонтакте служит экспертное определение маркерных аккаунтов (учетных записей) — тех аккаунтов сети ВКонтакте, контент которых может быть однозначно отнесен ровно к одному из трех идеологических направлений. Далее предполагается, что эти аккаунты характеризуются единич-

Таблица 1

Маркерные аккаунты

Наименование аккаунта	Идеологическое направление	URL
Проханов Александр Андреевич — творчество Александр Дугин Сергей Марков Наталья Нарочницкая Никита Михалков Наталья Поклонская Стрелков Игорь Иванович Новороссия / Игорь Стрелков Андрей Николаевич Савельев	Державники	https://vk.com/alexandr_prohanov https://vk.com/public2789767 https://vk.com/id382620481 https://vk.com/narochnitskaia https://vk.com/public26662151 https://vk.com/public333999 https://vk.com/public129997795 https://vk.com/public50414414 https://vk.com/id21503935
Николай Подосокорский Григорий Явлинский Явлинский. Группа сторонников Команда Явлинского Борис Вишневский Борис Вишневский Интернет-приемная Андрей Кураев Профессор богословия, протоиерей Андрей Кураев Станислав Белковский Владимир Кара-Мурза Борис Надеждин Илья Яшин	Либералы	https://vk.com/id2008214 https://vk.com/id146037120 https://vk.com/public30071970 https://vk.com/yavlinsky_yabloko https://vk.com/id2480895 https://vk.com/public40181447 https://vk.com/public22797031 https://vk.com/diak_kuraev https://vk.com/public30873220 https://vk.com/id263391319 https://vk.com/id40143548 https://vk.com/id3686745
Максим Шевченко Сергей Шаргунов СЕРГЕЙ ШАРГУНОВ Сергей Удальцов Сергей Удальцов Сергей Глазьев Сергей Глазьев Сергей Глазьев Анатолий Вассерман (фан-страница) Михаил Хазин Михаил Хазин ФЭИ Михаил Делягин Михаил Делягин (официальная страница)	Социалисты	https://vk.com/public28029604 https://vk.com/id5355252 https://vk.com/shargunoff https://vk.com/id43050243 https://vk.com/public39238475 https://vk.com/glazevs https://vk.com/public75299666 https://vk.com/club258208 https://vk.com/awasvk https://vk.com/id45286626 https://vk.com/m_khazin https://vk.com/id95640814 https://vk.com/public52638381

ными базисными ДЛС-векторами: $e_1 = (1, 0, 0)$ (чистый державник), $e_2 = (0, 1, 0)$ (чистый либерал) и $e_3 = (0, 0, 1)$ (чистый социалист).

Список маркерных аккаунтов с экспертной оценкой их идеологических направлений приведен в табл. 1.

2.2. Формирование перечня пользователей

После определения перечня маркерных аккаунтов был зафиксирован перечень пользователей, являющихся их друзьями (в случае, если маркерный аккаунт относится к типу «пользователь») или подписчиками. При этом отбирались только пользователи, удовлетворяющие следующим критериям:

- пользователь не удален и не заблокирован;
- пользователь посещал социальную сеть ВКонтакте хотя бы раз за последний месяц;
- аккаунт пользователя не был скрыт настройками приватности.

Для каждого из этих пользователей были выгружены такие данные его аккаунта:

- пол;
- возраст;
- политические предпочтения (далее — ПП), выбранные пользователем из списка, предоставляемого функционалом сети ВКонтакте (коммунистические, социалистические, умеренные, либеральные, консервативные, монархические, ультраконсервативные, индифферентные, либертарианские);
- паблики (тип аккаунта «page»), группы (тип аккаунта «group»), события (тип аккаунта «event») и блогеры (обладатели более 1000 подписчиков, тип аккаунта «profile»), на которые подписан пользователь;
- аккаунты друзей пользователя.

Отдельно рассматривались пользователи, связанные одновременно с несколькими маркерными аккаунтами, характеризующимися различными ДЛС-векторами (кросс-идеологические пользователи). В результате была сформирована выборка I , состо-

Таблица 2

Кросс-идеологические пересечения

Множество идеологических направлений маркерных аккаунтов, на которые подписан пользователь	Число пользователей
{Д}	64 139
{Л}	59 951
{С}	53 614
{Д, Л}	3179
{Д, С}	7671
{Л, С}	4205
{Д, Л, С}	1915
Всего пользователей	194 674

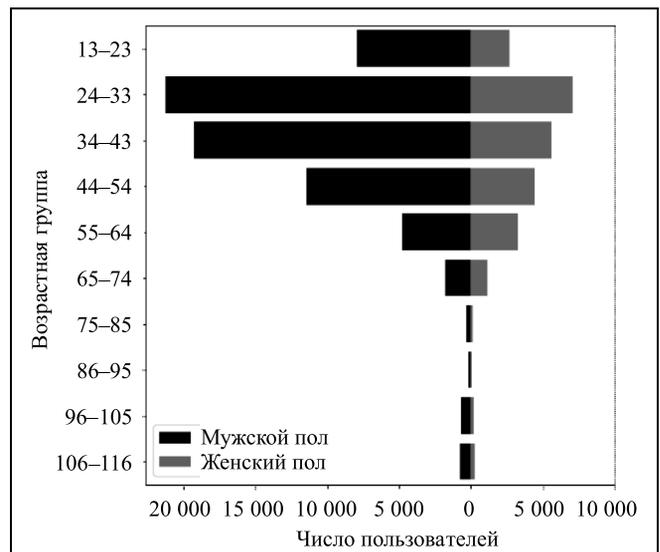


Рис. 1. Половозрастная структура пользователей (тех, кто указал свой пол и возраст): число пользователей, у которых не указан пол, 115, возраст — 119 235; минимальный указанный возраст 13 лет, максимальный — 116

ящая из 194 674 пользователей. Информация по кросс-идеологическим пересечениям в рассматриваемой выборке приведена в табл. 2. Отметим, что в выборку I попали некоторые маркерные аккаунты, поскольку они, будучи страницами пользователей (тип аккаунта «profile»), были друзьями других маркерных аккаунтов или были подписаны на них.

2.3. Разведочный анализ

Половозрастная структура пользователей выборки I приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, большую часть выборки формируют аккаунты пользователей, указавших при регистрации мужской пол. Кроме того, наблюдается смещение по возрасту в сторону более молодых пользователей. Распределение пользователей относительно ПП представлено на рис. 2.

Описательная статистика числа подписок пользователей на паблики, группы, аккаунты событий и блогеров приведена в табл. 3, на рис. 3 представлены соответствующие гистограммы.

2.4. Анализ связей дружбы

Для анализа связей дружбы между пользователями выборки были выполнены следующие операции. Для каждого пользователя $i \in I$ был определен список тех его друзей V_i , которые также принадлежат множеству I . Данная информация была представлена в виде квадратной матрицы смежности $A = (a_{ij})$ (ее размерность совпадает с числом пользователей), в которой $a_{ij} \in \{0, 1\}$, при этом ра-

венство $a_{ij} = 1$ выполнено тогда и только тогда, когда $j \in V_i$.

Далее матрица \mathbf{A} была симметризована: для каждой пары (i, j) , $i \neq j$, если хотя бы один из симметричных относительно главной диагонали элементов a_{ij} и a_{ji} равен 1, второй также полагался равным 1. Данный шаг позволил заполнить некоторые пропуски в данных, связанные с настройками приватности (когда из двух пользователей, соединенных связью дружбы, только у одного эта связь наблюдаема). Полученная в результате матрица (для удобства также будем обозначать ее \mathbf{A}) была симметричной: $\mathbf{A} = \mathbf{A}^T$. Таким образом, пользователи $i \in I$, для которых соответствующая строка матрицы \mathbf{A} оказалась нулевой (что соответствует отсутствию у пользователя i друзей среди пользователей I), далее не рассматривались.

В результате были сформированы множество $J \subset I$, $|J| = 156\,514$ (через $|X|$ здесь и далее обозначено число элементов в множестве X) и квадратная матрица $\mathbf{B} \in \{0, 1\}^{|J| \times |J|}$, являющаяся симметричной подматрицей матрицы \mathbf{A} со строго положительными строчными (и, следовательно, столбцовыми) суммами. С помощью матрицы \mathbf{B} , рассматривая ее как матрицу смежности, был построен граф $G[\mathbf{B}]$, фиксирующий связь дружбы между пользователями из множества J . Распределение степеней вершин этого графа представлено на рис. 4.

Для графа $G[\mathbf{B}]$ тремя различными способами был рассчитан коэффициент ассортативности [18]. (Напомним, что коэффициент ассортативности лежит в отрезке $[-1, 1]$ и показывает, насколько значения некоторого признака вершин графа коррелируют для соседних вершин (в данном случае число значений признака равно 3). Если этот коэффициент близок к нулю, то корреляции нет; если положителен, то соседние вершины чаще имеют одинаковые метки; если отрицателен, то соседние вершины чаще имеют разные метки).

Таблица 3

Дескриптивная статистика подписок пользователей

	Число подписок на:			
	паблики	группы	события	блогеров
Среднее	167,77	34,45	5,37	40,6
Стандартное отклонение	322,05	91,82	32,55	140,12
Минимум, %	0	0	0	0
25	11	0	0	0
50	66	1	0	3
75	180	15	0	13
Максимум	4894	955	962	1000

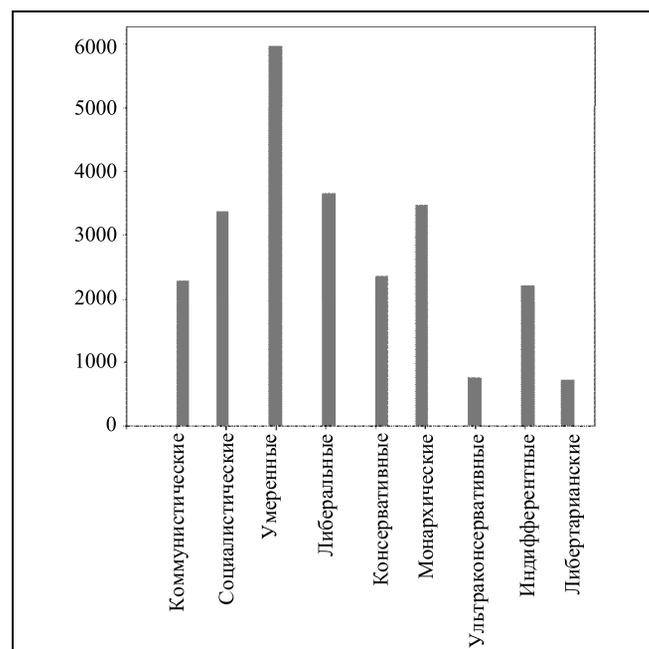


Рис. 2. Распределение пользователей относительно ПП для тех, у кого они указаны: доля пользователей, у которых ПП не указаны, составляет 0,87

В первом случае метки вершин были сгенерированы в соответствии с табл. 2: всего было семь типов меток, каждая соответствовала одной из семи возможных комбинаций подписок пользователей на маркерные аккаунты. Полученный коэффициент ассортативности оказался равным 0,14. Во втором случае рассматривались только четыре типа меток: все кросс-идеологические пользователи ассоциировались с одним и тем же типом меток. Коэффициент ассортативности при таком способе раздачи меток равен 0,15. В третьем случае кросс-идеологические пользователи не рассматривались вообще. Коэффициент ассортативности в этом случае равен 0,35.

Полученные результаты свидетельствуют о присутствии эффекта гомофилии в рассматриваемом графе: подписчики маркерных аккаунтов предпочитают иметь в друзьях подписчиков маркерных аккаунтов того же идеологического направления. При этом для кросс-идеологических пользователей данный эффект менее выражен. На рис. 5 (см. третью страницу обложки) изображена часть графа $G[\mathbf{B}]$, соответствующая третьему способу раздачи меток и наглядно демонстрирующая указанную тенденцию.

2.5. Оценивание ДЛС-векторов

Задача оценивания ДЛС-вектора российского пользователя сети ВКонтакте может быть сведена

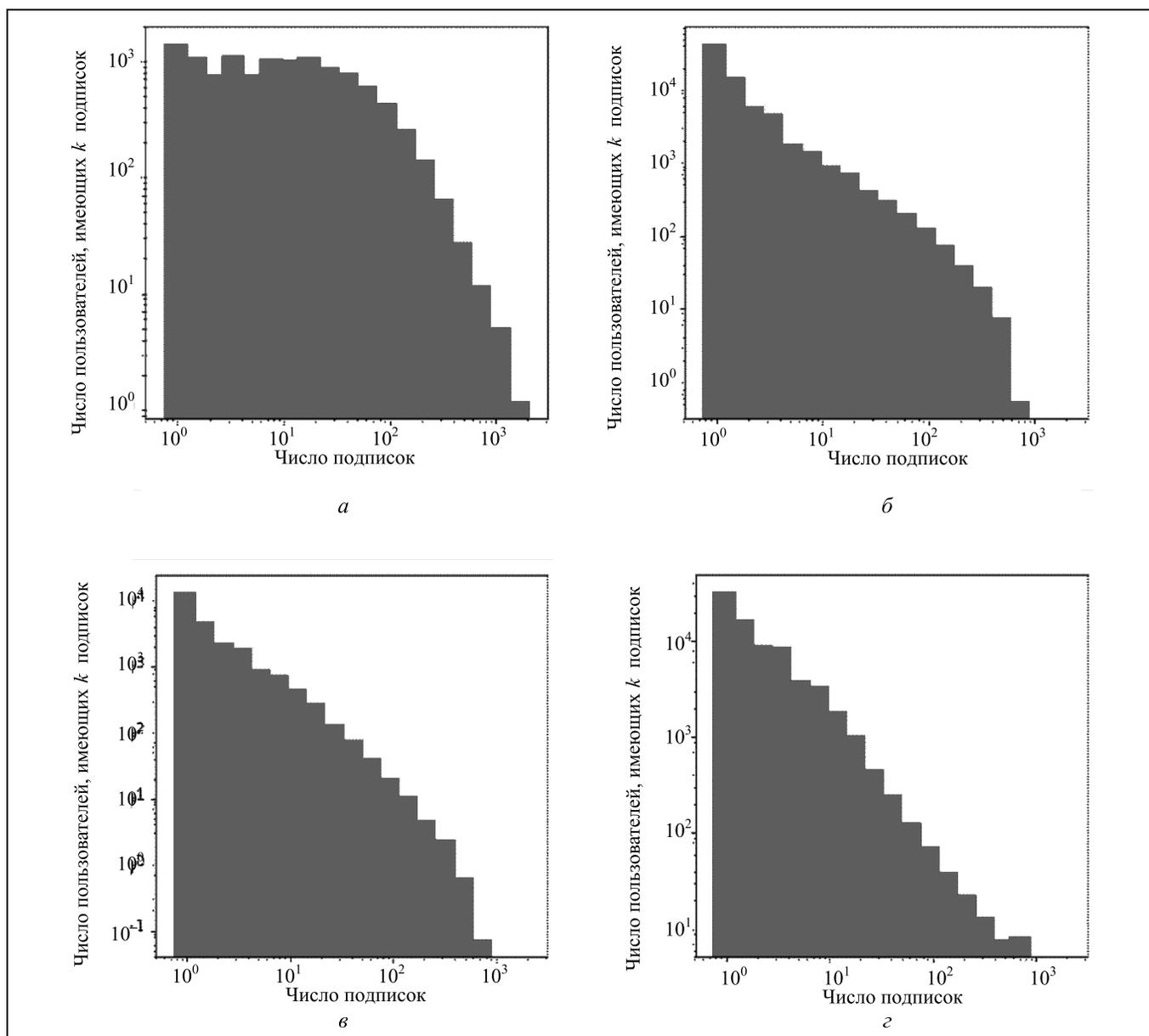


Рис. 3. Гистограммы распределений числа подписок пользователей на паблики (*a*), группы (*б*), блогеров (*в*) и события (*г*)

к задаче трехклассовой классификации. Рассматриваются классы: державники (класс Д), либералы (класс Л) и социалисты (класс С). Множество пользователей, не входящих в кросс-идеологические пересечения, обозначим через $I_* \subset I$. Число элементов множества I_* обозначим через N , $N = |I_*| = 177\,704$. Каждый пользователь из множества I_* может быть однозначно отнесен к одному из трех классов. Далее под словосочетанием «размеченные данные» будем понимать данные аккаунтов (см. п. 2.2), а также метки классов пользователей множества I_* . В соответствии с табл. 2 численности классов составляют 64 139, 59 951 и

53 614 соответственно. В качестве признаков (независимых переменных) принимались ПП пользователей, а также их подписки на паблики, группы, страницы событий и блогеров. Признаки были формализованы с помощью one-hot кодирования (унитарный код) [19]. В результате каждому пользователю ставился в соответствие вектор из нулей и единиц, размерность которого совпадала с числом значений всех признаков, а единица на соответствующей позиции означала, что данный признак для данного пользователя принимает именно это значение. Формально это можно описать таким образом: была сформирована матрица объек-

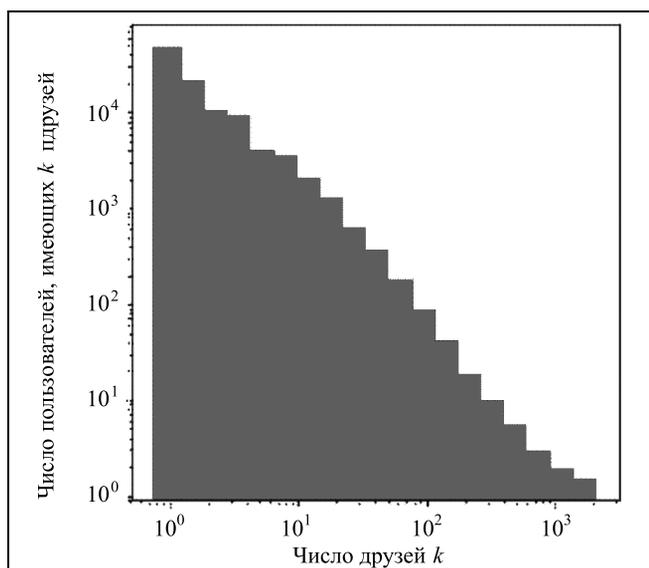


Рис. 4. Распределение числа степеней вершин графа $G[B]$: оси абсцисс и ординат представлены в логарифмическом масштабе

ты-признаки $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub}) \in \{0, 1\}^{N \times 4\,917\,363}$. Соответствующий ей вектор классов обозначим через $\mathbf{y} \in \{1, 2, 3\}^N$. Матрица $\mathbf{X}_{PP} \in \{0, 1\}^{N \times 11}$ формализует ПП пользователей, число 11 — это число значений признака ПП (включая случай, когда пользователь не указал ПП). В свою очередь, матрица $\mathbf{X}_{Sub} \in \{0, 1\}^{N \times 4\,917\,352}$ фиксирует подписки пользователей, число столбцов этой матрицы соответствует числу уникальных пабликов, групп, страниц событий и аккаунтов блогеров, на которых подписаны пользователи I_* . В силу построения каждый столбец матрицы \mathbf{X}_{Sub} имеет хотя бы один ненулевой элемент. Каждая строка матрицы \mathbf{X}_{PP} также содержит хотя бы одну единицу.

В ходе экспериментов было выявлено, что аккаунты пользователей, у которых менее 11 и более 300 подписок, значительно снижают качество классификации (данные числа были определены опытным путем как максимизирующие точность классификации). Поэтому было принято решение не включать их ни в обучающую, ни в тестовую выборки.

Далее каждый аккаунт был «клонирован», т. е. был добавлен новый аккаунт (будем называть новые аккаунты *синтетическими*), отличающийся от исходного тем, что были обнулены компоненты в one-hot представлении, соответствующие подпискам на маркерные аккаунты. Данная мера позволяла провести более беспристрастную оценку качества классификации, поскольку в противном случае классификатор переобучился бы на маркерных аккаунтах и демонстрировал бы близкую к

единице верность классификации. Метки классов синтетических аккаунтов оставались неизменными. «Клонирование» изменило матрицу объектно-признаки $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub})$ и вектор классов \mathbf{y} (формально, это уже не те матрицы, что были введены ранее, поскольку, как уже было сказано, в результате отсеивания аномалий часть строк этих матриц была удалена, однако для удобства мы оставим те же обозначения) таким образом: матрица, описывающая реальных пользователей, была дополнена по строкам матрицей $\mathbf{X}_{trunc} = (\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub_trunc})$, а вектором \mathbf{y} был дополнен таким же (т. е. продублирован). Матрицы \mathbf{X}_{Sub} и \mathbf{X}_{Sub_trunc} имеют одинаковую размерность и единственное различие между ними состоит в том, что у последней в столбцах, соответствующих маркерным аккаунтам, расположены только нули.

С помощью одного и того случайного зерна $random_state = 42$ (которое дается на вход генератору псевдослучайных чисел) каждая из матриц $(\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{trunc} | \mathbf{y})$ и $(\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub_trunc} | \mathbf{y})$ была разбита на две подматрицы псевдослучайным образом в пропорции 2:1. Две трети строк каждой из матриц $(\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub} | \mathbf{y})$ и $(\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub_trunc} | \mathbf{y})$ были выбраны случайным образом — сгруппированы в матрицы $(\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub}^1 | \mathbf{y}^1)$ и $(\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^1 | \mathbf{y}^1)$, а оставшиеся строки каждой из матриц были сгруппированы в матрицы $(\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub}^2 | \mathbf{y}^2)$ и $(\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^2 | \mathbf{y}^2)$:

$$(\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub} | \mathbf{y}) \rightarrow (\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub}^1 | \mathbf{y}^1), (\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub}^2 | \mathbf{y}^2);$$

$$(\mathbf{X}_{PP} \mathbf{X}_{Sub_trunc} | \mathbf{y}) \rightarrow$$

$$\rightarrow (\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^1 | \mathbf{y}^1), (\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^2 | \mathbf{y}^2).$$

Применение совпадающих зерен для генерации разбиений гарантировало, что матрицы $(\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub}^1 | \mathbf{y}^1)$ и $(\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^1 | \mathbf{y}^1)$, а также матрицы $(\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub}^2 | \mathbf{y}^2)$ и $(\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^2 | \mathbf{y}^2)$ «соответствовали» друг другу в том смысле, что в каждой из этих двух пар i -я строка каждой из матриц соответствовала одному и тому же пользователю: для матриц $(\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub}^1 | \mathbf{y}^1)$ и $(\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub}^2 | \mathbf{y}^2)$ — «натуральному», а для матриц $(\mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^1 | \mathbf{y}^1)$ и $(\mathbf{X}_{PP}^2 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^2 | \mathbf{y}^2)$ — синтетическому.

В качестве обучающей выборки принимались данные

$$(\mathbf{X}_{train} | \mathbf{y}_{train}) = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub}^1 | \mathbf{y}^1 \\ \mathbf{X}_{PP}^1 \mathbf{X}_{Sub_trunc}^1 | \mathbf{y}^1 \end{pmatrix},$$

Рисунок к статье [Л.Г. Бызова](#), Д.А. Губанова, И.В. Козицина, А.Г. Чхартишвили
**«ИДЕАЛЬНЫЙ ПОЛИТИК ДЛЯ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ:
ПОДХОД К АНАЛИЗУ ИДЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ»**
(с. 15–26)

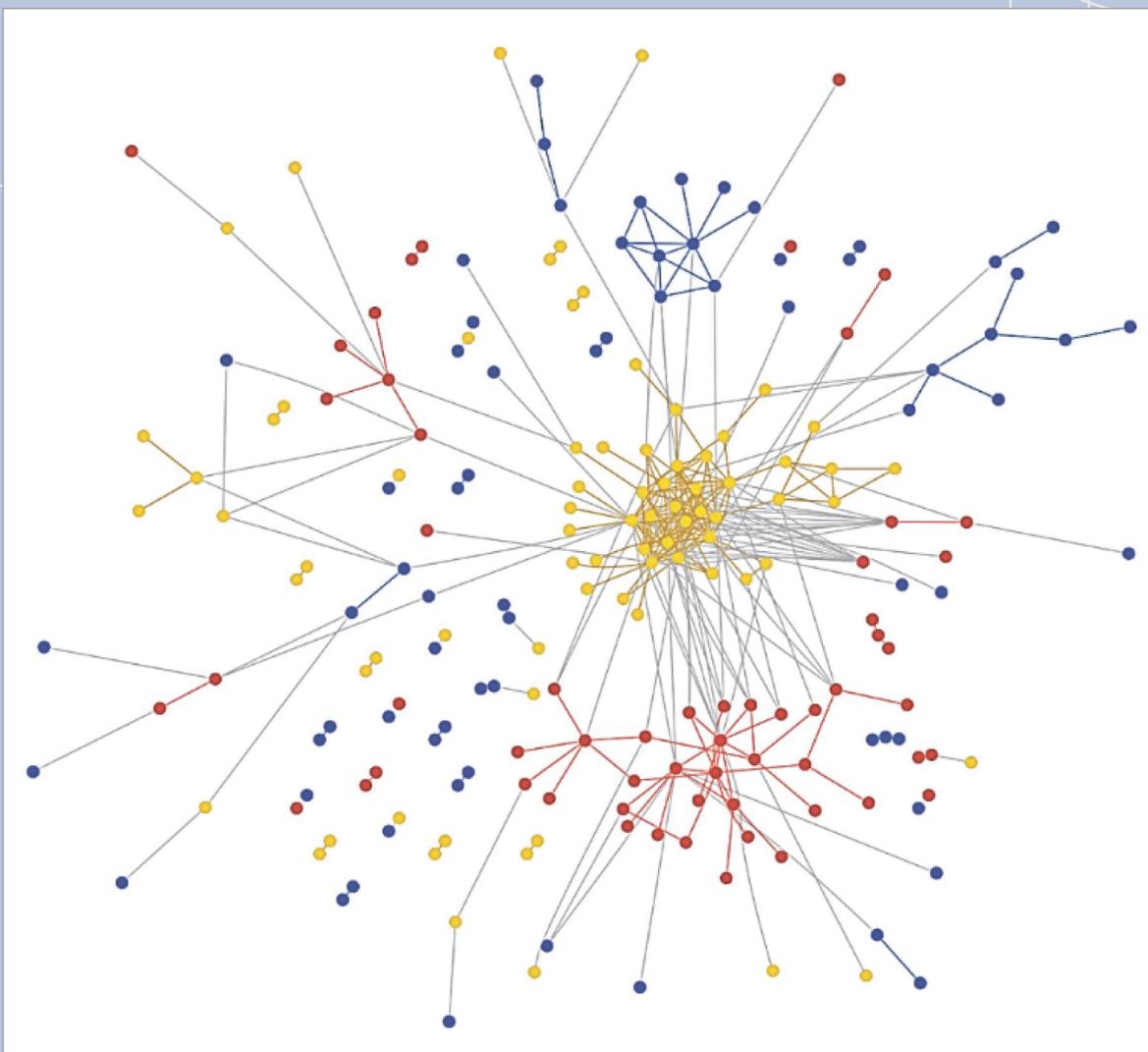


Рис. 5. Подграф графа $G[V]$, полученный отбрасыванием кросс-идеологических пересечений и случайным выбором вершин последнего. Число пользователей в подграфе 206. Желтый цвет соответствует пользователям, подписанным только на маркерные аккаунты державников, синий – либералов, красный – социалистов. Коэффициент ассортативности для подграфа 0,37

а в качестве тестовой — данные

$$(\mathbf{X}_{\text{test}} | \mathbf{y}_{\text{test}}) = (\mathbf{X}_{\text{PP}}^2 \mathbf{X}_{\text{sub_trunc}}^2 | \mathbf{y}^2).$$

В результате, качество классификации проверялось на синтетических пользователях, которые не были представлены в обучающей выборке ни в каком виде.

Матрица объекты-признаки обучающей выборки $\mathbf{X}_{\text{train}}$ применялась для обучения декомпозитора пространства (принадлежащего к классу TruncatedSVD, в качестве метода решения применялся алгоритм ARPACK), снижающий размерность последнего до 350 компонент (это число также было определено опытным путем как максимизирующее точность классификации). Далее обученный декомпозитор трансформировал матрицы $\mathbf{X}_{\text{train}}$ и \mathbf{X}_{test} , после чего эти матрицы вместе с векторами классов $\mathbf{y}_{\text{train}}$ и \mathbf{y}_{test} использовались для обучения и тестирования классификатора. Наилучшее качество показал классификатор, основанный на статистической модели логистической регрессии с коэффициентом $C = 0,5$ L2-регуляризации, который применялся к задаче трехклассовой классификации по схеме one-versus-rest. Для решения проблемы несбалансированности классов каждому из классов был поставлен в соответствие вес (веса подбирались эмпирически: $D \rightarrow 1,5$, $L \rightarrow 1$, $S \rightarrow 1,1$), что в итоге снизило риск переобучения классификатора на мажоритарном классе.

Для оценивания качества классификации мы пользуемся показателем «средняя полнота». (Напомним, что полнота класса — это доля верно классифицированных представителей этого класса, средняя полнота — это значение показателя полноты класса, усредненное по всем классам.) Класс оцененного ДЛС-вектора (p_1, p_2, p_3) соот-

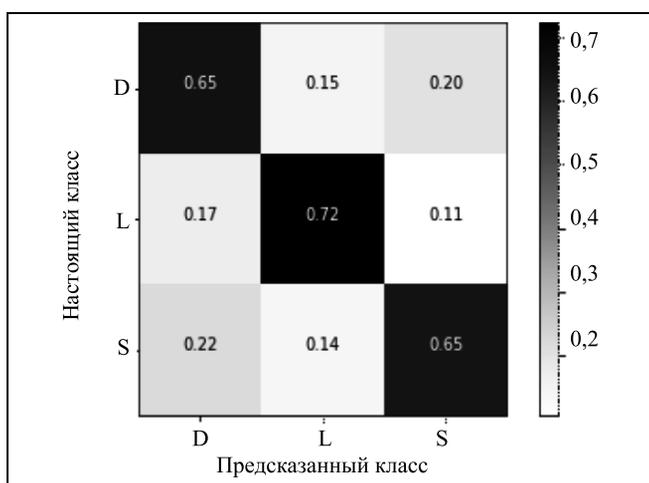


Рис. 6. Матрица ошибок, визуализирующая качество классификации обученной предсказательной модели: средняя полнота 0,674

ветствует тому значению $i \in \{1, 2, 3\}$, для которого соответствующая компонента p_i принимает наибольшее значение из трех (если два наибольших значения одинаковы либо все три значения одинаковы, выбираем одно из них с равной вероятностью).

Матрица ошибок, демонстрирующая качество работы классификатора на тестовой выборке, представлена на рис. 6. Средняя полнота классификации составляет 0,674, что более, чем в два раза превышает точность при случайной классификации (с учетом несбалансированности классов).

3. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ИДЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЗИЦИИ

3.1. Постановка и решение оптимизационной задачи

В предыдущих разделах было показано, как можно оценить идейно-политические предпочтения пользователей сети ВКонтакте. Понятно, что эту информацию можно использовать для различных целей. В данной работе мы остановимся на одной из возможных: рассмотрим ситуацию, когда политик (или политическая партия) хочет занять идеологическую позицию, максимально близкую к позициям некоторого подмножества пользователей. Для случая двух политических направлений эта задача была исследована в классической работе Даунса [20]. В настоящей статье мы в основном рассматриваем случай трех направлений, однако предложенный в данном пункте метод может быть применен и в случае произвольного числа направлений k .

Для формализации задачи нахождения «идеальной» идеологической позиции требуется для начала уточнить, что понимается под расстоянием между двумя идеологическими позициями, задаваемыми стохастическими векторами $p_1 = (p_{11}, \dots, p_{1k})$ и $p_2 = (p_{21}, \dots, p_{2k})$. Мы будем пользоваться следующим расстоянием (см. [16, 21]):

$$d(p_1, p_2) = 1 - \sum_{j=1}^k \min(p_{1j}, p_{2j}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k |p_{1j} - p_{2j}|. \quad (1)$$

Отметим, что справедливость второго равенства в выражении (1) для стохастических векторов легко показать:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k |p_{1j} - p_{2j}| &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k (\max(p_{1j}, p_{2j}) - \min(p_{1j}, p_{2j})) \\ &= \frac{1}{2} \left(2 - \sum_{j=1}^k \min(p_{1j}, p_{2j}) - \sum_{j=1}^k \min(p_{1j}, p_{2j}) \right) = \\ &= 1 - \sum_{j=1}^k \min(p_{1j}, p_{2j}). \end{aligned}$$



Метрика (1) является частным случаем хорошо известного в теории вероятностей расстояния общей вариации. Рассмотрим на примере вопрос, в чем ее преимущество в предлагаемой модели по сравнению с более традиционной для расчетов в конечномерных пространствах евклидовой метрикой

$$d_E(p_1, p_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (p_{1j} - p_{2j})^2}.$$

Предположим, что имеются четыре вектора взглядов (принадлежащим четырем индивидам — первому, второму, третьему и четвертому соответственно): $p_1 = (1, 0, 0, 0)$, $p_2 = (0, 1, 0, 0)$, $p_3 = (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$, $p_4 = (0, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$. Первый индивид полностью отдает приоритет ценностям, отраженным первой компонентой вектора (равной 1); ценности, отраженные в прочих компонентах, для него неважны. Поэтому второй, третий и четвертый индивиды одинаково далеки от него, поскольку для них, наоборот, неважны ценности первой компоненты. Это соответствует соотношению $d(p_1, p_2) = d(p_1, p_3) = d(p_1, p_4)$, в справедливости которого легко убедиться. Поэтому метрика (1) представляется более адекватной, чем евклидова метрика, в которой расстояния между этими же векторами попарно различны.

Сформулируем задачу поиска оптимальной идеологической позиции $a = (a_1, \dots, a_k)$ для заданного множества k -мерных векторов p_1, \dots, p_n :

$$L(a_1, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^n d(p_i, a) \xrightarrow{a} \min, \quad (2)$$

$$a_j \geq 0, \quad j \in K, \quad \sum_{j=1}^k a_j = 1.$$

Отметим, что задача (2) — это, по сути, задача нахождения многомерной медианы множества точек (точнее говоря, одной из многомерных медиан — см. статью [22]). В случае евклидовой метрики эта задача довольно сложная и поддается лишь численному решению [23]. Однако для метрики (1), как будет показано далее, существует алгоритм получения точного решения.

Для решения задачи (2) сначала переупорядочим по неубыванию числа p_{ij} , $i \in N = \{1, \dots, n\}$, для каждого $j \in K = \{1, \dots, k\}$. Переобозначим эти числа через x_{ij} :

$$\forall j \in K \quad x_{1j} \leq \dots \leq x_{nj}. \quad (3)$$

Задачу (2) можно переписать в эквивалентном виде:

$$L(a_1, \dots, a_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k |x_{ij} - a_j| \xrightarrow{a} \min, \quad (4)$$

$$a_j \geq 0, \quad j \in K, \quad \sum_{j=1}^k a_j = 1. \quad (5)$$

Решение задачи (4) (и, значит, задачи (2)) существует в силу непрерывности функции $L(a_1, \dots, a_k)$ и компактности множества (5). Его можно получить, опираясь на следующие два утверждения.

Утверждение 1. Пусть для чисел a_q и a_r выполнены условия

$$x_{iq} \leq a_q < x_{i+1, q}, \quad (6)$$

$$x_{mr} < a_r \leq x_{m+1, r}, \quad (7)$$

для некоторых $i, m \in N$, $i < m$. Тогда содержащий компоненты a_q и a_r вектор a не может быть решением задачи (4), (5).

Доказательство. Пусть оптимальным вектором — решением задачи (4), (5) является вектор a , удовлетворяющий условиям (5) и содержащий компоненты a_q и a_r , удовлетворяющие условиям (6), (7). Обозначим через $L_1 = L(a)$ значение целевой функции задачи (4) на этом векторе.

Увеличим a_q на величину $\Delta > 0$, а a_r уменьшим на ту же величину Δ , притом выберем Δ достаточно малым для того, чтобы числа $a_q + \Delta$ и $a_r - \Delta$ не вышли за границы интервалов (6) и (7) соответственно (для определенности можно взять $\Delta = 0,5 \min\{x_{i+1, q} - a_q, a_r - x_{mr}\}$). В результате получим новый вектор (удовлетворяющий ограничениям (5)) и новое значение целевой функции, которое обозначим через L_2 .

Посчитаем (для удобства удвоенную) разность $L_2 - L_1$ с учетом неравенств

$$x_{1q} \leq \dots \leq x_{iq} \leq a_q < a_q + \Delta < x_{i+1, q} \leq \dots \leq x_{nq},$$

$$x_{1r} \leq \dots \leq x_{mr} < a_r - \Delta < a_r \leq x_{m+1, r} \leq \dots \leq x_{nr},$$

а также того факта, что в двойной сумме в выражении (4) изменились только слагаемые, содержащие компоненты a_q и a_r :

$$\begin{aligned} 2(L_2 - L_1) &= \sum_{j=1}^n (|x_{jq} - (a_q + \Delta)| + |x_{jr} - (a_r - \Delta)|) - \\ &- \sum_{j=1}^n (|x_{jq} - a_q| + |x_{jr} - a_r|) = \sum_{j=1}^i ((-x_{jq} + a_q + \Delta) - \\ &- (-x_{jq} - a_q)) + \sum_{j=i+1}^n ((x_{jq} - a_q - \Delta) - (x_{jq} - a_q)) + \\ &+ \sum_{j=1}^m ((-x_{jr} + a_r - \Delta) - (-x_{jr} + a_r)) + \\ &+ \sum_{j=m+1}^n ((x_{jr} - a_r + \Delta) - (x_{jr} - a_r)) = \\ &= i\Delta - (n-i)\Delta - m\Delta + (n-m)\Delta = 2(i-m)\Delta < 0. \end{aligned}$$

Таким образом, в результате изменения аргумента целевая функция задачи (4) уменьшилась, что противоречит оптимальности исходного вектора a . ♦

Утверждение 2. Пусть для векторов $a = (a_1, \dots, a_k)$ и $b = (b_1, \dots, b_k)$ выполнены ограничения (5), а также условия для некоторого $i \in N$:

$$\begin{aligned} x_{ij} &\leq a_j \leq x_{i+1,j}, \\ x_{ij} &\leq b_j \leq x_{i+1,j} \end{aligned} \quad (8)$$

для всех $j \in K$. Тогда значения целевой функции L задачи (4) на этих векторах совпадают: $L(a) = L(b)$.

Доказательство. Покажем, что разность $L(a) - L(b)$ равна нулю:

$$\begin{aligned} L(a) - L(b) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \left(\sum_{m=1}^i (a_j - x_{mj}) + \sum_{m=i+1}^i (x_{mj} - a_j) \right) - \\ &- \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \left(\sum_{m=1}^i (b_j - x_{mj}) + \sum_{m=i+1}^i (x_{mj} - b_j) \right) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k (a_j - b_j)(i - (n - i)) = \\ &= \left(i - \frac{n}{2}\right) \left(\sum_{j=1}^k a_j - \sum_{j=1}^k b_j \right) = 0. \quad \blacklozenge \end{aligned}$$

Заметим теперь, что все вектора $a = (a_1, \dots, a_k)$, удовлетворяющие условиям (5), разбиваются на два непересекающихся подмножества: для них условия (6) и (7) либо выполняются либо не выполняются. Векторы из первого подмножества, в соответствии с утверждением 1, не могут быть оптимальными. Следовательно, оптимальный вектор (решение задачи (4), (5)) следует искать во втором подмножестве, для векторов из которого выполняется условие (8) для некоторого $i \in N$. Для нахождения решения следует найти (например, путем последовательного перебора по i) значение $i \in N$, для которого выполняется условие

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} \leq 1 \leq \sum_{j=1}^k x_{i+1,j} \quad (9)$$

В силу условия (3) сумма в левой части неравенства (9) не убывает по i , поэтому такое значение существует и единственное — за исключением случаев, когда имеет место двойное равенство

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} = 1 = \sum_{j=1}^k x_{i+1,j} \quad (10)$$

Если в условии (9) оба неравенства для некоторого i обращаются в равенства (т. е. выполняется (10)), то единственным решением задачи (3) является вектор

$$a_j = x_{ij}, \quad j \in K. \quad (11)$$

В противном случае имеется множество векторов, в которых, согласно утверждению 2, целевая функция принимает одно и то же значение; для определенности предлагается считать решением вектор

$$a_j = (1 - \gamma)x_{ij} + \gamma x_{i+1,j}, \quad j \in K. \quad (12)$$

где γ — решение уравнения $\sum_{j=1}^k a_j = 1$:

$$\gamma = \frac{1 - \sum_{j=1}^k x_{ij}}{\sum_{j=1}^k x_{i+1,j} - \sum_{j=1}^k x_{ij}}. \quad (13)$$

Итак, решение задачи (2) имеет вид (12), (13) или (11), где i определяется соотношением (9). ♦

3.2. Примеры

Приведем примеры расчета «идеальных» политических позиций для четырех пабликов онлайн-социальной сети ВКонтакте:

- «Православная держава» (<https://vk.com/club63342269>);
- «СССР Ленин Сталин Марксизм Коммунизм Коммунисты» (<https://vk.com/public53550079>);
- «Новости RT на русском» (https://vk.com/rt_russian);
- «Медуза» (<https://vk.com/meduzaproject>).

Для каждого из пабликов был зафиксирован перечень пользователей — их подписчиков, далее из перечней были исключены пользователи, имеющие менее 11 подписок. Рассмотрим отдельно для каждого паблика распределение идейно-политических предпочтений пользователей.

Пример 1. Паблик «Православная держава». Рассмотрены предпочтения 23 749-ти пользователей. На рис. 7 (см. первую страницу вклейки) представлены тепловые карты (heatmap) на симплексе идейно-политических предпочтений пользователей. Каждая точка на симплексе характеризует соотношение между компонентами вектора идейно-политической позиции. Координаты точки можно определить при помощи линий, параллельных сторонам симплекса. Интенсивностью цвета показаны частоты встречаемости пользователей, попадающих в шестиугольники симплекса. «Идеальной» идеологической позицией паблика (или оптимальным ДЛС-вектором) является вектор $(0,5151, 0,3497, 0,1352)$, который обозначен на рис. 7 красным плюсом. Среднее расстояние позиций пользователей до идеальной позиции составляет 0,2684. Исходя из рис. 7, можно отметить, что пользователи паблика придерживаются в большей степени державных позиций, в меньшей — либеральных.

Пример 2. Паблик «СССР Ленин Сталин Марксизм Коммунизм Коммунисты». Рассмотрены предпочтения 6179-ти пользователей. На рис. 8 (см. первую страницу

Рисунки к статье [Л.Г. Бызова], Д.А. Губанова, И.В. Козицина, А.Г. Чхартишвили

**«ИДЕАЛЬНЫЙ ПОЛИТИК ДЛЯ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ:
ПОДХОД К АНАЛИЗУ ИДЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ»
(с. 15–26)**

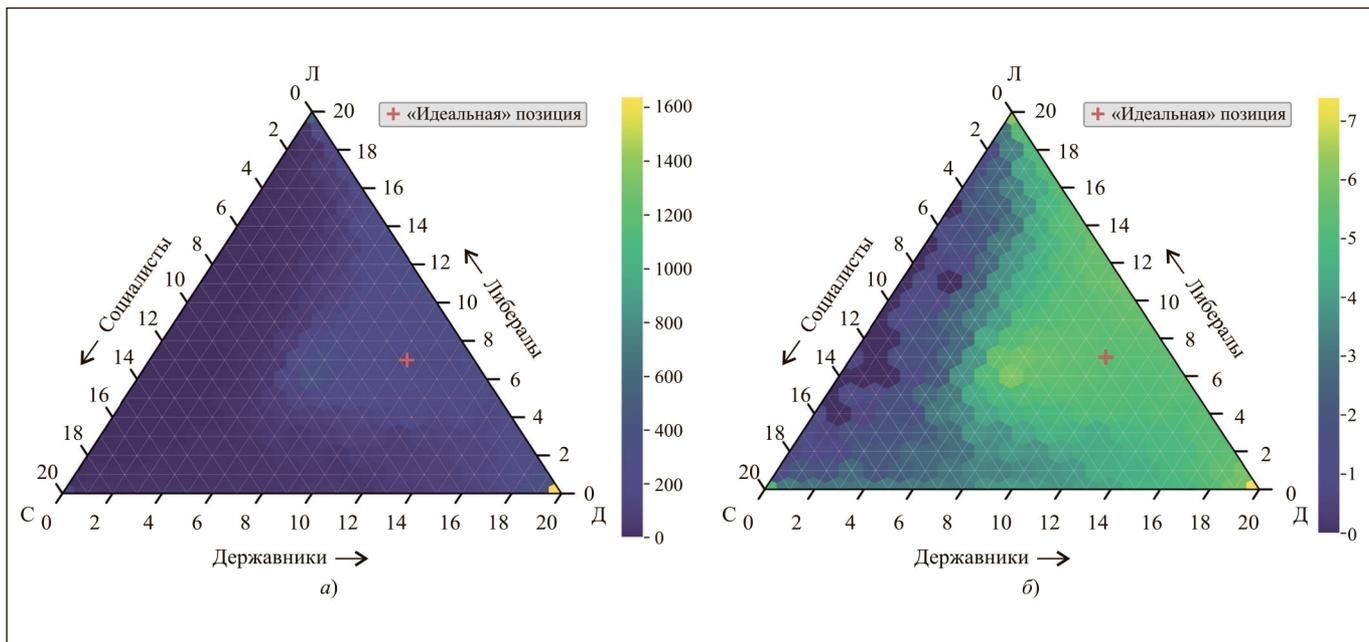


Рис. 7. Тепловая карта предпочтений подписчиков «Православная держава»:
а – частоты; б – логарифм частот

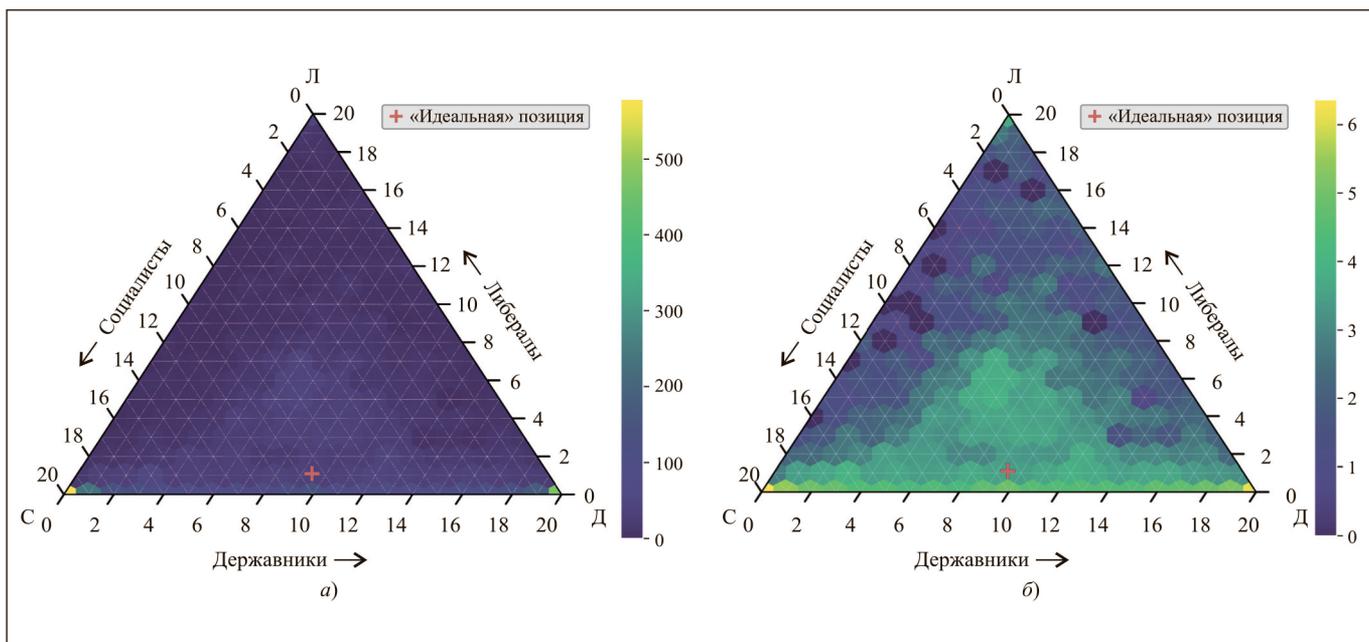


Рис. 8. Тепловая карта предпочтений подписчиков «СССР»:
а – частоты; б – логарифм частот



вклейки) представлены тепловые карты предпочтений пользователей. Идеальной идеологической позицией паблика является вектор **(0,4708, 0,0549, 0,4743)**. Среднее расстояние позиций пользователей до идеальной позиции составляет 0,3341. Максимальная концентрация пользователей достигается в полюсах, соответствующих социалистам и державникам. В целом можно сказать, что пользователи паблика придерживаются державных и социалистических позиций.

Пример 3. Паблик «Новости RT на русском». Рассмотрены предпочтения 129 141-го пользователя. На рис. 9 (см. вторую страницу вклейки) представлены тепловые карты предпочтений. Идеальной идеологической позицией паблика служит вектор **(0,4596, 0,1537, 0,3866)**. Среднее расстояние позиций пользователей до идеальной позиции составляет 0,2341. Пользователи паблика придерживаются в большей степени державной и в меньшей степени социалистической позиции.

Пример 4. Паблик «Медуза». Для паблика «Медуза» рассмотрены предпочтения 134 705-ти пользователей. На рис. 10 (см. вторую страницу вклейки) представлены тепловые карты предпочтений пользователей. Идеальной идеологической позицией паблика служит вектор **(0,2462, 0,5135, 0,2403)**. Среднее расстояние позиций пользователей до идеальной позиции составляет 0,2321. В целом можно сказать, что пользователи паблика придерживаются в большей степени либеральной позиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи определения идейно-политических представлений пользователей онлайн-социальной сети может найти различные применения. В настоящей работе внимание акцентировано на одном из них: нахождение оптимальной (в смысле минимизации суммарного расстояния до пользователей социальной сети) позиции политика или политической партии. Для решения этой задачи были предприняты следующие шаги: определение идейно-политического базиса (ДЛС-модель), подбор характеризующих этот базис направлений популярных сетевых сообществ (маркерных аккаунтов), решение задачи трехклассовой классификации для нахождения ДЛС-векторов пользователей, решение задачи минимизации суммарного расстояния.

Довольно высокое качество классификации на тестовой выборке косвенно свидетельствует в пользу адекватности выбранного нами идеологического базиса. При этом предлагаемый подход универсален и может быть адаптирован к базисам иного состава и иной размерности (см., например, [9]).

В заключение отметим, что в дальнейших исследованиях мы планируем воспользоваться построенной ДЛС-моделью для анализа динамики мнений пользователей сети ВКонтакте. В частности, интерес представляет вопрос, насколько хорошо формальные модели динамики мнений согла-

суются с динамикой ДЛС-векторов пользователей [24–26]. Кроме того, ДЛС-модель позволит проверить гипотезы о наличии в сети ВКонтакте таких явлений, как поляризация [27] и эхо-камеры [28].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gayo-Avello, D.* A meta-analysis of state-of-the-art electoral prediction from Twitter data // *Social Science Computer Review*. — 2013. — Vol. 31, no. 6. — P. 649–679.
2. *Petrov, A., Proncheva, O.* Modeling Propaganda Battle: Decision-Making, Homophily, and Echo Chambers / *Conf. on Artificial Intelligence and Natural Language*. — Springer, Cham, 2018. — P. 197–209.
3. *Chkharishvili, A.G., Gubanov, D.A., Novikov, D.A.* Social Networks: Models of information influence, control and confrontation. — Springer, 2018. — 158 p.
4. *Petrov, A.P., Proncheva, O.G.* Modeling Position Selection by Individuals during Informational Warfare with a Two-Component Agenda // *Mathematical Models and Computer Simulations*. — 2020. — Vol. 12, no. 2. — P. 154–163.
5. *Barberá, P.* Birds of the Same Feather Tweet Together: Bayesian Ideal Point Estimation Using Twitter Data // *Political Analysis*. — 2015. — Vol. 23, no. 1. — P. 76–91.
6. *Makazhanov, A., Rafiei, D., Waqar, M.* Predicting Political Preference of Twitter Users // *Social Network Analysis and Mining*. — 2014. — Vol. 4, no. 1. — P. 193.
7. *Pennacchiotti, M., Popescu, A.M.* Democrats, republicans and starbucks aficionados: user classification in twitter // *Proc. of the 17th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*. — 2011. — P. 430–438.
8. *Бызов Л.Г.* Динамика идейно-политических предпочтений за 25 лет. Три этапа трансформации общественного сознания // *Россия XXI*. — 2019. — № 2. — С. 6–21. [*Byzov, L.G.* Dinamika ideino-politicheskikh predpochtenii za 25 let. Tri etapa transformatsii obshchestvennogo soznaniia // *Rossia XXI*. — 2019. — No. 2. — S. 6–21. (In Russian)]
9. *Kozitsin, I.V., Chkharishvili, A.G., Marchenko, A.M., et al.* Modeling Political Preferences of Russian Users Exemplified by the Social Network Vkontakte // *Mathematical Models and Computer Simulations*. — 2020. — Vol. 12, no. 2. — P. 185–194.
10. *Kozitsin, I.V., Marchenko, A.M., Goiko, V.L., et al.* Symmetric Convex Mechanism of Opinion Formation Predicts Directions of Users' Opinions Trajectories // *Twelfth Intern. Conf. «Management of Large-scale System Development» (MLSD)*. — IEEE, 2019.
11. *Rokeach, M.* The Nature of Human Values. — NY: Free Press, 1973.
12. *Фелдман С.* Ценности, идеология и структура политических установок / *Политическая психология. Хрестоматия по ред. Е.Б. Шестопал*. — М.: Аспект Пресс, 2007. — С. 256–260. [*Feldman, S.* Tsennosti, ideologiya i struktura politicheskikh ustanovok / *Politicheskaiia psikhologiya. Khrestomatia po red. E.B. Shestopal*. — М.: Aspekt Press, 2007. — S. 256–260. (In Russian)]
13. *Inglehart, R.* The silent revolution. — Princeton: Princeton University Press, 1977.
14. *Inglehart, R.* Cultural shift in advanced industrial society. — Princeton: Princeton University Press, 1990.
15. *Блинов В.В.* Типы идеологических сторонников в современной России // *Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены*. — 2010. — № 6 (100). [*Blinov, V.V.* Tipy ideologicheskikh storonnikov v sovremennoi Rossii // *Monitoring obshchestvennogo mneniia: ekonomicheskie i sotcialnye peremeny*. — 2010. — No. 6 (100). (In Russian)]

Рисунки к статье [Л.Г. Бызова], Д.А. Губанова, И.В. Козицина, А.Г. Чхартишвили

**«ИДЕАЛЬНЫЙ ПОЛИТИК ДЛЯ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ:
ПОДХОД К АНАЛИЗУ ИДЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ»
(с. 15–26)**

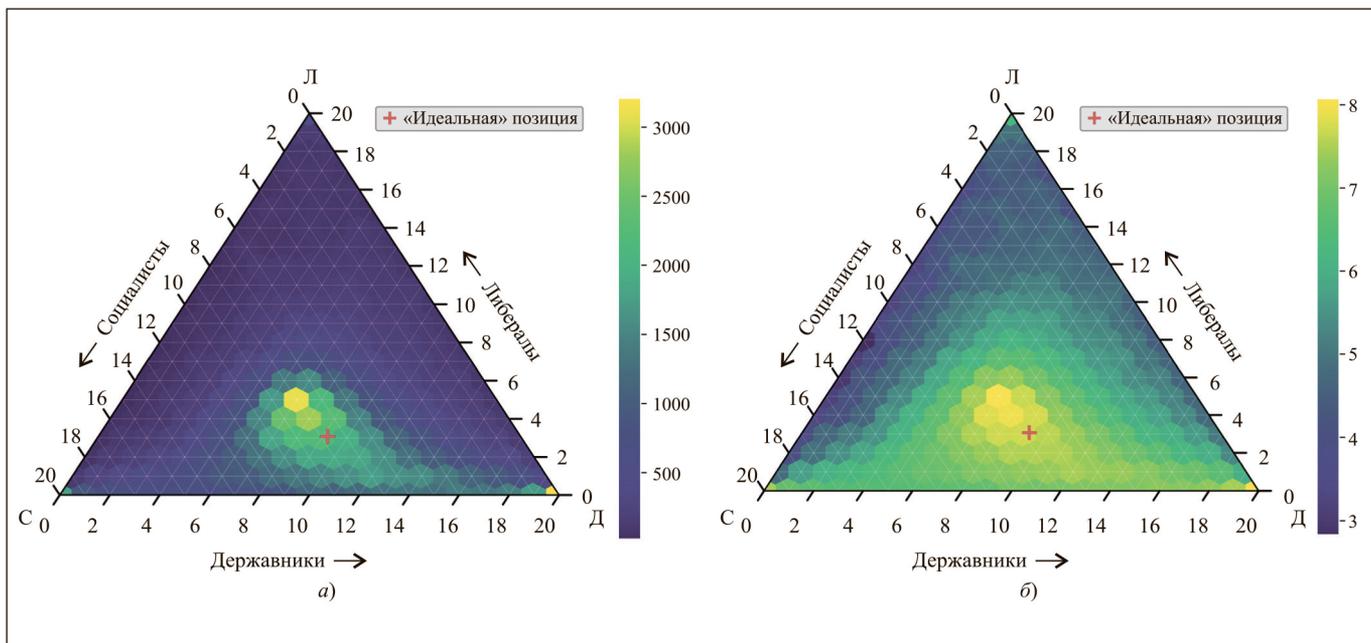


Рис. 9. Тепловая карта предпочтений подписчиков «RT»:

а – частоты; *б* – логарифм частот

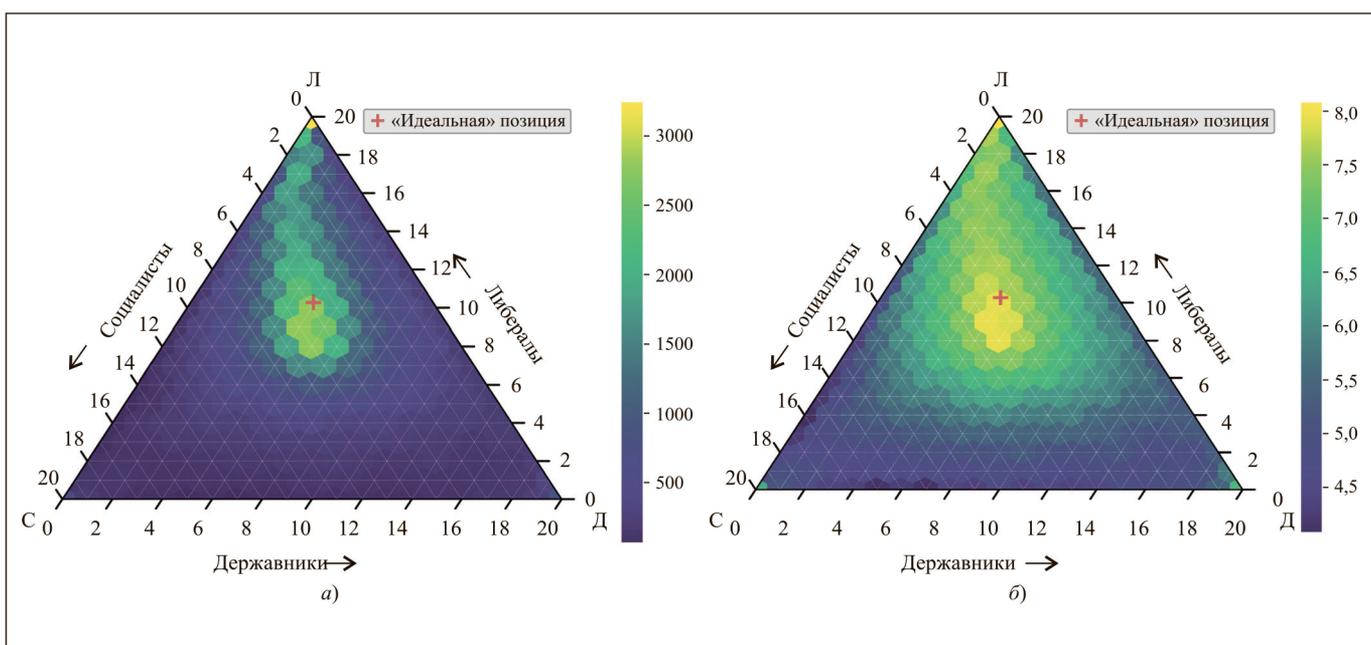


Рис. 10. Тепловая карта предпочтений подписчиков «Медуза»:

а – частоты; *б* – логарифм частот

16. Козицин И.В., Чхартишвили А.Г. Об одной модели идейно-политических предпочтений пользователей онлайн-социальной сети // Теория активных систем — 50 лет / Материалы междунар. науч.-практ. конф., 18–19 ноября 2019 г., Москва, ИПУ РАН. Под общ. ред. В.Н. Буркова. — С. 520–527. [Kozitsin, I.V., Chkhartishvili, A.G. Ob odnoi modeli ideino-politicheskikh predpochtenii polzovatelei onlain-ovoi sotcialnoi seti // Teoriia aktivnykh sistem — 50 let / Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 18–19 noiabria 2019 g., Moskva, IPU RAN. Pod obshch. red. V.N. Burkova. — S. 520–527. (In Russian)]
17. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3792003>
18. Newman, M. Networks. — Oxford: Oxford University Press, 2018.
19. Flach, P. Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. — Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
20. Downs, A. An Economic Theory of Political Action in a Democracy // Journal of Political Economy. — 1957. — Vol. 65, no. 2. — P. 135–150.
21. Gubanov, D., Petrov, I. Multidimensional Model of Opinion Polarization in Social Networks // Twelfth Intern. Conf. «Management of Large-scale System Development» (MLSD). — IEEE, 2019.
22. Small, C.G. A Survey of Multidimensional Medians // International Statistical Review. — 1990. — No. 58. — 1990. — P. 263–277.
23. Croux, C., Filzmoser, P., Fritz, H. A Comparison of Algorithms for the Multivariate L1-median // Computational Statistics. — 2010. — Vol. 27, no 3. — P. 1–18.
24. Kozitsin, I.V., Belolipetskii, A.A. Opinion Convergence in the Krasnoshchekov Model // The Journal of Mathematical Sociology. — 2019. — Vol. 43, no. 2. — P. 104–121.
25. Proskurnikov, A.V., Tempo, R. A Tutorial on Modeling and Analysis of Dynamic Social Networks. Part I // Annual Reviews in Control. — 2017. — Vol. 43. — P. 65–79.
26. Fedyanin, D., Giliyazova, A. Influence of Deactivated Agents in Social Networks: Switching Between French-De Groot Models and Friedkin-Johnsen Model // Twelfth Intern. Conf. «Management of Large-scale System Development» (MLSD). — IEEE, 2019.
27. Chhartishvili, A.G., Kozitsin, I.V., Goiko, V.L., Saifulin, E.R. On an Approach to Measure the Level of Polarization of Individuals' Opinions // Ibid.
28. Chkhartishvili, A., Kozitsin, I. Binary Separation Index for Echo Chamber Effect Measuring // Ibid.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Поступила в редакцию 2.03.2020, после доработки 26.03.2020.
Принята к публикации 28.03.2020.

Бызов Леонтий Георгиевич — канд. экон. наук,
Федеральный научно-исследовательский социологический центр РАН, г. Москва,

Губанов Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ✉ dmitry.a.g@gmail.com,

Козицин Иван Владимирович — мл. науч. сотрудник,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ✉ kozitsin.ivan@mail.ru,

Чхартишвили Александр Гедеванович — д-р физ.-мат. наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ✉ sandro_ch@mail.ru.

PERFECT POLITICIAN FOR SOCIAL NETWORK: AN APPROACH TO ANALYSIS OF IDEOLOGICAL PREFERENCES OF USERS

[L.G. Byzov]¹, D.A. Gubanov², I.V. Kozitsin³, A.G. Chkhartishvili⁴

¹ Federal Center of Theoretical and Applied Sociology of Russian Academy of Sciences
^{2,3,4} V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
² ✉ dmitry.a.g@gmail.com, ³ ✉ kozitsin.ivan@mail.ru, ⁴ ✉ sandro_ch@mail.ru

Abstract. In this paper, we consider the problem of determining politico-ideological preferences of users of online social networks. We propose a model (DLS model) that allows assessing politico-ideological preferences of VKontakte users by using information taken from their accounts (digital footprints). The model incorporates the main ideological directions in modern-day Russia. Our approach is based on the supervised learning methodology whereby one solves a classification problem by calculating posterior probabilities of class membership. We make an anonymized labeled dataset and develop corresponding software. Then we formulate and solve the problem of the politician's choice of an ideological positioning strategy, that will potentially receive the most support from the considered set of users. We exemplify our methodology by finding «ideal» political positioning for some popular online communities in VKontakte.

Keywords: online social networks, ideological views, DLS-model, big data, finding the optimal ideological position.

Funding. The work was performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (project no. 18-29-22042).

УПРАВЛЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ В СИСТЕМЕ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ¹

В.В. Еремин, В.П. Бауэр, А.Н. Райков

Аннотация. Показано, что цифровые платформы, активно управляя своей конкурентоспособностью, видоизменяют существующие механизмы конкурентной борьбы. Разработана и приведена подробная классификация цифровых платформ. Охарактеризованы конкурентные механизмы, позволяющие управлять конкурентоспособностью цифровых платформ. Предложено развитие ресурсной теории системной организации экономики в контексте ее платформизации. Определены взаимосвязи цифровых платформ с проектами по внедрению механизмов управления конкурентоспособностью, со средовой системой поставщиков ресурсов для платформы и потребителей ее услуг, а также с системой ценообразования на рынках этих ресурсов и услуг — как основы для оценки изменения взаимодействия спроса и предложения. Отмечена необходимость и показана возможность внедрения адекватного математического моделирования в целях повышения эффективности управления указанной конкурентоспособностью. При этом учтено многообразие связей при моделировании управленческих механизмов повышения конкурентоспособности, что позволит существенно снизить риски внедрения этих механизмов и повысить эффективность применения цифровых платформ.

Ключевые слова: конкурентоспособность, цифровая экономика, цифровая платформа, цифровая экосистема, классификация, управление.

ВВЕДЕНИЕ

Происходящая в настоящее время в экономике цифровая революция началась во второй половине XX в. и продолжила свое активное развитие в XXI в. [1—3]. Взрывное внедрение в экономику (см., например, работу [4]) сквозных цифровых технологий — искусственный интеллект, большие данные, блокчейн, квантовые вычисления, цифровые двойники, виртуальная и дополненная реальность [5] — говорит о начале четвертой промышленной революции [6]. Данная революция означает цифровизацию цепочек создания добавленной стоимости с одновременной цифровизацией продуктов, услуг и сопутствующей бизнес-среды [7]. Цифровизация реальной экономики происходит с применением киберфизических систем [8] и масштабным внедрением цифровых технологий в обрабатывающую и прочие виды промышленности [9].

¹ Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансовому университету при Правительстве Российской Федерации.

Основой и связующим звеном процессов цифровой трансформации экономики служат цифровые платформы [10], которые рассматриваются вместе с их окружением, что принято сейчас называть экосистемой цифровизации. Экосистема охватывает как технологические, так и социально-политические аспекты, как цифровые, так и «нецифровые» сферы человеческой деятельности и управления [11].

Таким образом, цифровые платформы — это сравнительно новые субъекты экономических отношений, активно участвующие в распределении, обмене и потреблении экономических благ. Их задача — обеспечение ускоренного роста качества жизни конкурентоспособности продукции и услуг в современной экономике путем внедрения цифровых технологий [12].

1. ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА КАК НОВЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АГЕНТ

Под цифровой платформой понимается цифровая структура, позволяющая взаимодействовать двум или более группам пользователей [13]. Это

площадка, поддерживающая комплекс автоматизированных процессов и потребление типовых цифровых продуктов (услуг) значительным числом потребителей [14].

Цифровая платформа может определяться как предприятие (фирма), обеспечивающая взаимовыгодные взаимодействия между производителями и потребителями [15]. Ее главная задача состоит в формировании связей между пользователями, содействии обмену товарами, деньгами и/или социальной валютой, в результате чего создаются новые ценности. По разнообразию процессов цифровой трансформации экономики цифровые платформы можно классифицировать следующим образом.

Исходя из базовой транзакции (набора действий, которые должны совершить пользователи платформы для создания ценности), платформы подразделяются на платформы, предназначенные для снижения транзакционных и трансформационных издержек, для творческих процессов и платформы, осуществляющие интеграцию творческих процессов и прочих видов хозяйственной деятельности.

Под платформами, предназначенными для *снижения транзакционных издержек* (издержки распределения товаров и услуг), понимаются платформы, цель которых — облегчить взаимодействие между пользователями. Это платформы для онлайн-заказов товаров (eBay, Alibaba), платформы для оказания онлайн-услуг зачастую на основе активов, платформам не принадлежащих (Uber, Airbnb). Также это платформы, собирающие информацию о действиях пользователей, для размещения целевой рекламы (Facebook, Google), платформы, позволяющие пользователям привлекать и инвестировать денежные средства (Kickstarter, Тинькофф Инвестиции), игровые (World of Warcraft), коммуникативные платформы (WhatsApp) и социальные сети (ВКонтакте).

Платформы для *снижения трансформационных издержек* предназначены снижать издержки на производство продукции. К ним относятся платформы, накапливающие данные в качестве аналитической основы для принятия управленческих решений, а также платформы, накапливающие и анализирующие данные в качестве основы для автоматизации производственных и управленческих процессов на предприятии. К последним, прежде всего, относятся так называемые «цифровые двойники» [16].

В последнее время достаточно широкое распространение получает новый тип платформ снижения трансформационных издержек — *продуктовые платформы*. Их цель — превращение товара в услугу. Так, например, компания «Rolls-Royce Group plc» продвигает бизнес-модель сдачи в

аренду авиадвигателей собственного производства вместо их реализации производителям самолетов. При этом Rolls-Royce будет обслуживать сданные в аренду двигатели, собирать и анализировать информацию о их состоянии и на основе этого анализа разрабатывать более совершенные типы двигательных установок. Аналогичное направление развития бизнеса выбирает производитель турбин для электростанций компания «Westinghouse Electric Company LLC».

Платформы для творчества делятся на два типа: платформы для создания контента, позволяющие создавать и размещать онлайн видео, аудио, текст, изображения, и платформы для разработки приложений. Они позволяют привлечь на платформу независимых и творчески настроенных разработчиков программных приложений.

Интеграционные платформы совмещают снижение издержек с творчеством. Как правило, первоначально они создавались для снижения издержек, но в дальнейшем параллельно стали применяться для творчества. Пример такой трансформации платформ — многие социальные сети (например, ВКонтакте), первоначально снижавшие издержки поиска друзей, коллег и одноклассников, но позже выступившие как обширные площадки для творчества.

Платформы могут быть классифицированы по степени *коммодитизации*, которая характеризуется широтой набора характеристик услуг, предлагаемых платформой. Платформы с *высокой степенью коммодитизации* предлагают услуги, набор характеристик которых ограничен. Задача таких платформ — соединить потребителя с ближайшим доступным и подходящим для него производителем услуги. Например, Uber обеспечивает контакт пассажиров и водителей со такими характеристиками: точки отправления и назначения, стоимость маршрута, срок оказания услуги.

Платформы с *низкой степенью коммодитизации* предлагают услуги с широким набором характеристик. Их задачи — обеспечить быстрый поиск требуемой услуги. Примером служит платформа краткосрочной аренды жилья Airbnb. Она учитывает такие параметры арендуемого жилья: число комнат, этаж, развитость инфраструктуры, удаление от центра, возможность аренды жилья семьей с детьми или животными и др.

Возможна классификация платформ *по механизму монетизации* (способ превращения части ценности, создаваемой платформами, в доход их владельцев). Один из наиболее распространенных механизмов монетизации — *взимание комиссии*. В данном случае платформа забирает определенный процент (или фиксированную сумму) от стоимости каждой сделки. Также достаточно распро-



странена *рекламная модель* — продажа рекламных мест на платформе. Распространена (в особенности на игровых платформах) *продажа расширенного доступа*. В этом случае доступ к игровой платформе бесплатный, но часто на платформе продаются виртуальные предметы игры, обеспечивающие купившему их игроку преимущество перед игроками, играющими бесплатно.

Менее распространен *доступ к гарантированному контенту*. Это платный доступ к размещенным на платформе предложениям услуг, качество которых проверено данной платформой. Наименее всего распространен *платный доступ к платформе*, так как оплата доступа приводит к падению темпов прироста новых пользователей, что вынуждает платформу вернуться к предоставлению бесплатного доступа.

По *типу подписки* платформы можно классифицировать на виды:

— *один ко многим* (характерна для творческих платформ) — здесь разместивший определенный контент пользователь привлекает внимание большого числа пользователей (YouTube);

— *один к одному (один к нескольким)* — как правило, это общение одного или нескольких пользователей на платформе (WhatsApp);

— *многие ко многим* — имеет большое число клиентов и большое число поставщиков, которые взаимодействуют друг с другом (eBay).

По *степени охвата пользователей* платформы делятся на *глобальные* (охватывают пользователей на мировом уровне — Facebook), *региональные* (охватывают пользователей на уровне страны или группы стран — ВКонтакте) и *местные* (охватывают пользователей на территории страны — Qiwi).

2. УПРАВЛЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ

Управление конкурентоспособностью цифровых платформ на практике сводится к разработке и внедрению конкурентных механизмов различного уровня эффективности. Внедрение этих механизмов позволяет не только управлять конкурентоспособностью цифровых платформ, но и оказывает значительное влияние на процессы конкуренции в современной экономике в целом. Некоторые из этих механизмов применяются впервые именно цифровыми платформами и до этого в экономике не применялись.

Важнейший конкурентный механизм, позволяющий управлять конкурентоспособностью цифровых платформ, заключается в активном *применении сетевых эффектов*. Сетевой эффект заключается в том, что увеличение числа пользователей, потре-

ляющих или создающих определенный продукт (услугу), приводит к увеличению его ценности [17]. Так, приток желающих арендовать жилье на Airbnb приводит к притоку арендодателей, что в свою очередь приводит к новому витку притока арендаторов и т. д. Сетевой эффект является новым видом мультипликативного эффекта в современной экономике [18], значительно ускоряющим динамику развития цифровых платформ [19]. Вычленение новых видов сетевых эффектов и их применение служит основой управления конкурентоспособностью цифровых платформ, поскольку, чем больше у них постоянных пользователей, тем выше их конкурентоспособность.

Уникальными для цифровых платформ механизмами, позволяющими управлять их конкурентоспособностью, являются механизмы, обеспечивающие *нулевые предельные издержки*. Такие издержки возникают благодаря близкой к нулю стоимости копирования и распространения оригинальной версии платформенного приложения, а также применению облачных технологий. Хотя издержки на поддержку и развитие платформы, ее совершенствование, создание новых версий платформенного приложения и существуют, но рост числа пользователей и создание новых экземпляров приложения простым копированием снижают их до нуля. В этом случае управление конкурентоспособностью цифровой платформы сводится к поиску тех направлений ее развития, предельные издержки для которых могут быть снижены до нуля. Одно из таких направлений заключается в производстве новых версий платформенных приложений и контента, размещаемых на развлекательных платформах. Здесь применяется нестандартный конкурентный механизм, позволяющий снизить издержки практически до нуля — *привлечение бесплатных внешних разработчиков*. Пользователи, создающие и размещающие видео на YouTube, не получают за это плату; Apple не платит разработчикам, размещающим свои приложения на App Store, наоборот, взимает с них комиссию за размещение разработанных ими приложений. Таким образом, здесь управление конкурентоспособностью осуществляется через управление издержками.

Для снижения издержек на оплату труда платформы *активно применяют онлайн аукционы и площадки для найма фрилансеров*. Это позволяет платформам выходить на международный рынок труда, конкуренция на котором снижает цены на трудовые ресурсы.

Процесс платформизации привел к проблеме контроля качества размещаемого на платформах контента и приложений. Некачественный контент служит причиной массового оттока пользователей, а сетевые эффекты становятся отрицательными,

усиливая этот отток. Но и в этом случае ряд платформ применили нетривиальный и достаточно эффективный метод управления конкурентоспособностью — через снижение предельных издержек до нуля — *переложили функцию контроля качества на пользователей платформы*. На практике это выглядит так: пользователи формируют рейтинг предлагаемых товаров, контента и его разработчика своими отзывами, распространением ссылок на контент, нажатием кнопок «Like» («понравилось») или «Dislike» («не понравилось»). В ответ платформа прекращает доступ к продукту (контенту) с отрицательными отзывами и низким рейтингом.

Минимизация собственности. Управление конкурентоспособностью возможно не только через снижение издержек, но и через стимулирование скорости роста объема услуг. В данном направлении управления конкурентоспособностью платформы применили нестандартный конкурентный механизм — минимизацию количества находящейся в их владении собственности, оставляя за собой, как правило, цифровые активы — права на программный код, дизайн сайтов и игр. Так крупнейший в мире сервис бронирования жилья Airbnb не владеет квартирами, которые предлагает арендовать, а владеет цифровой площадкой для их аренды. Одна из крупнейших компаний в сфере транспортных услуг Uber не владеет автомобилями, с помощью которых оказываются эти услуги, а владеет цифровой площадкой, обеспечивающей коммуникации между пассажирами и водителями. Минимум имущества в собственности позволяет платформе достаточно быстро расти, так как для роста ей не нужно приобретать недвижимость или транспортные средства.

Управляя конкурентоспособностью, платформы осуществляют *масштабный сбор и анализ данных о пользователях и продуктах*, позволяющий платформам разрабатывать и успешно реализовывать новые направления стратегии своего развития. Сбор и анализ данных позволяет выявить предпочтения пользователя, формируя тем самым адресно направленную рекламную кампанию и так называемую кастомизированную продукцию — изготовление партии массовой продукции по требованиям клиента путем ее комплектации дополнительными элементами. Сбор и анализ данных цифровыми двойниками позволяет разрабатывать новые, более эффективные образцы промышленного оборудования и механизмов. Анализ больших данных позволяет платформам наладить эффективные каналы обратной связи с пользователями. Отметим, что сами по себе собранные и структурированные массивы больших данных также обладают ценностью.

Управляя конкурентоспособностью, платформы активно применяют такой конкурентный механизм, как *перекрестное субсидирование*. Так, привлекая пользователей, одно подразделение платформы оказывает им услуги бесплатно (бесплатное размещение страницы пользователя в сети Facebook или почты на Google). Однако другое подразделение той же платформы одновременно повышает расценки на свои услуги для другой группы пользователей (стоимость рекламы на Facebook). В результате второе подразделение не только финансирует свою деятельность, но и компенсирует упавшие доходы первого подразделения.

Отметим, что часть перечисленных конкурентных механизмов, таких как сетевой эффект и минимизация предельных издержек, возникают в связи с «врожденными» особенностями функционирования цифровых платформ, изначально будучи их признаками. Но их наличие не означает их безусловную эффективность. Опираясь на эти признаки, менеджмент платформы реализует мероприятия, позволяющие развить их в полноценные конкурентные механизмы. Так, минимизация предельных издержек в качестве конкурентного механизма будет эффективно проявляться лишь в том случае, когда менеджмент платформы разовьет ее привлечением внешних разработчиков и усилит обеспечением притока пользователей на платформу.

В связи с многообразием конкурентных механизмов управление конкурентоспособностью платформ, предполагающее применение существующих конкурентных подходов и разработку новых, должно иметь соответствующие модели функционирования. Моделирование процессов управления конкурентоспособностью делает эти процессы более обоснованными, позволяет подстраивать их под активно меняющуюся реальность еще на этапе разработки конкурентных механизмов. Моделирование позволяет применять многовариантный анализ последствий применения конкретного управленческого механизма и в кратчайшие сроки осуществлять его оптимизированную настройку. Применение моделей управления конкурентоспособностью цифровой платформы на практике позволяет избежать значительной части управленческих ошибок и связанных с ними затрат. Особенно актуально все вышеописанное для разработки новых, уникальных механизмов управления конкурентоспособностью цифровых платформ, внедрение которых позволит платформам достигать стратегического конкурентного преимущества. Моделирование управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформ — неотъемлемая часть системы управления ее конкурентоспособностью.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ

3.1. Ресурсная теория системной организации экономики как основа для повышения конкурентоспособности в системе цифровых платформ

Повсеместное применение цифровых платформ, равно как и их интеграция, оказывает влияние на экономику, повышая ее эффективность по двум основным направлениям:

- увеличивая эффективность использования времени — информационные технологии значительно ускоряют процессы производства, поиска поставщиков, покупателей и партнеров по совместному производству продукции;

- повышая эффективность использования пространства; примером служат интернет-магазины, которые при минимально занимаемой площади эффективно конкурируют с обычными магазинами, постепенно вытесняя их, например, в сфере торговли бытовой техникой и товарами повседневного спроса.

В свою очередь, эффективные управленческие механизмы повышения конкурентоспособности цифровых платформ могут работать и в системе координат изменения активности и интенсивности.

В связи с заявленными направлениями функционирования эффективных управленческих механизмов, в качестве основы для их моделирования предлагается взять так называемую «экономическую тетраду» [20, 21]. Для этого сначала экономические системы классифицируются с учетом их локализации:

- *проектная система* (проект) — имеет границы, определенные и во времени, и в пространстве;
- *объектная система* (объект) — ее границы определены в пространстве, но не определены во времени;

- *процессная система* (процесс) — границы такой системы определены во времени, но не определены в пространстве;

- *средовая система* (среда) — не имеет определенных границ ни во времени, ни в пространстве.

Каждая система обладает определенными ресурсами и возможностями. К ресурсам относятся непосредственно пространство S и время T , а к возможностям:

- интенсивность i — способность к эффективному использованию пространства;
- активность A — способность к эффективному использованию времени.

Указанная тетрада как основа для моделирования управленческих механизмов повышения кон-

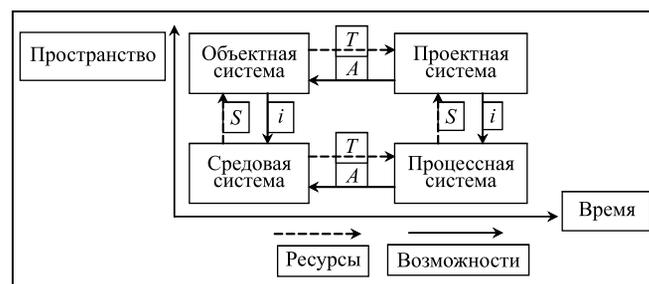


Рис. 1. Тетрада моделирования управленческих механизмов повышения конкурентоспособности цифровых платформ

курентоспособности цифровых платформ может быть представлена в виде схемы (рис. 1).

Объектом служит сама цифровая платформа. Она не рассматривается как субъект экономики, исходя из применяемой в ресурсной теории классификации экономических систем по их локализации во времени и пространстве. А также исходя из того, что платформа в данном случае является объектом, развиваемым с помощью реализации определенного проекта. В свою очередь, проектом является формирование и реализация управленческих механизмов, направленных на повышение конкурентоспособности цифровой платформы. Процессная система складывается из процессов закупки ресурсов, необходимых для реализации управленческих механизмов, а также из процессов реализации цифровой платформой дополнительного объема услуг в связи с повышением ее конкурентоспособности. Средовая система состоит из совокупности экономических агентов — поставщиков ресурсов, необходимых для реализации управленческих механизмов повышения конкурентоспособности, разработчиков, а также покупателей дополнительного объема услуг, реализуемых платформой в результате повышения ее конкурентоспособности. Сложная и многогранная совокупность этих агентов формирует из них среду, в которую погружается и в которой функционирует объектная система.

Объект определяет время (T) реализации проекта, в ответ проект активизирует (A) деятельность объекта путем повышения его конкурентоспособности. В результате эффективной реализации проекта баланс сэкономленного времени для предприятия будет положительным.

Процессная система предоставляет проектное пространство протекающих процессов (S) — закупки ресурсов, продажи продукции и т. п. Увеличивая число и объемы протекающих процессов, проектная система интенсифицирует (i) использование процессного пространства.

Средовая система предоставляет время для реализации процессов (T), а процессная система ак-

тивизирует (A) средовую, предоставляя ей (в результате реализации проекта) большие объемы продукции, работ, услуг.

Средовая система предоставляет платформе пространство (S) для функционирования в виде вложений в ее деятельность. Платформа интенсифицирует использование этого пространства (i), повышая эффективность его функционирования путем отдачи на вложенные ресурсы и стимулируя таким образом участников средовой системы к дополнительным вложениям в развитие платформы.

При формировании модели управленческих механизмов повышения конкурентоспособности цифровых платформ время и пространство предлагается соединять с помощью денежных потоков. Временной фактор описывается динамикой денежных потоков с их дальнейшим дисконтированием. Пространственный фактор описывается объемами денежных потоков — например, объемом выплат для аренды определенного пространства (включая цифровое) или объемом выплат для поступления определенного объема ресурсов. Под термином «внедрение управленческого механизма» подразумевается разработка, внедрение и функционирование управленческого механизма повышения конкурентоспособности цифровой платформы.

3.2. Модель управленческих механизмов повышения конкурентоспособности цифровых платформ

Моделирование управленческих механизмов повышения конкурентоспособности цифровых платформ требует математической формализации. Необходимо формализовать связи между системами, представленными на рис. 1, одновременно охарактеризовав их экономический смысл.

Формализация связей средовой и объектной систем. Средовая система в виде акционеров и кредиторов представляет платформе пространство финансовых ресурсов (S) для реализации механизмов повышения конкурентоспособности. Это могут быть:

— собственные ресурсы — часть заработанной объектом (платформой) прибыли ($\Delta\text{ЧП}$), которую его владельцы (часть среды) соглашаются направить на финансирование проекта создания управленческого механизма повышения конкурентоспособности;

— заемные ресурсы — кредиты, которые владельцы платформы берут у соответствующих кредитных организаций (часть среды) на финансирование проекта создания управленческого механизма ($\Delta\text{Кр}$);

— доленое финансирование в виде сумм, полученных от дополнительной эмиссии акций, изменения уставного капитала ($\Delta\text{ДФ}$).

Владельцы платформы интенсифицируют использование пространства (i), побуждая инвесторов предоставлять финансовые ресурсы путем выплаты им процентов (Пр) и дивидендов (Див), а также обеспечивая рентабельность реинвестированной в проект создания управленческого механизма прибыли на уровне не менее рентабельности альтернативных проектов, в которые могла бы быть вложена эта прибыль (Pa).

В таком случае стоимость привлечения ресурсов (СПР) для финансирования создания управленческого механизма повышения конкурентоспособности цифровой платформы рассчитывается по формуле:

$$\text{СПР} = \text{Див} \cdot \Delta\text{ДФ} + \text{Пр} \cdot \Delta\text{Кр} + \text{Pa} \cdot \Delta\text{ЧП}. \quad (1)$$

Исходя из этой формулы, средневзвешенная стоимость финансирования проекта (ССФ) составит:

$$\text{ССФ} = \text{Див} \cdot \frac{\Delta\text{ДФ}}{\text{ООФ}} + \text{Пр} \cdot \frac{\Delta\text{Кр}}{\text{ООФ}} + \text{Pa} \cdot \frac{\Delta\text{ЧП}}{\text{ООФ}}, \quad (2)$$

где ООФ — общий объем финансирования проекта.

Финансирование проекта, как правило, распределено во времени. Будут распределены во времени и потоки оплаты этого финансирования, определяемые формулой (1). Чтобы учесть фактор времени, необходимо дисконтировать эти потоки:

$$\text{ДСПР} = \sum_{n=1}^m \frac{\text{СПР}_n}{(1+r)^n}, \quad (3)$$

где ДСПР — дисконтированная сумма потоков оплаты ресурсов финансирования проекта реализации управленческого механизма; m — число периодов времени, в течение которых осуществляются выплаты источникам финансирования; n — временной период выплаты средств источникам финансирования, r — ставка дисконтирования.

В рамках описываемого взаимодействия будет иметь место изменение объемов спроса и предложения на рынке финансовых ресурсов, следовательно, реализация платформой проекта создания управленческого механизма может оказать влияние на динамику процентных ставок на финансовых рынках.

Формализация связей средовой и процессной систем. Средовая система взаимодействует с процессной, предоставляя последней время (T). В единицу времени осуществляется общее рыночное предложение i -го вида ресурсов как для создания управленческого механизма (SP_i^{YM}), так и для создания и реализации платформой продукции, ра-



бот, услуг (SUP_i^{pp}) — далее «услуги», а также и общий рыночный спрос (DY_j) на услуги j -го вида, предлагаемые платформой и прочими их поставщиками.

Процессная система активизирует деятельность средовой (A), предъявляя в единицу времени общий рыночный спрос на ресурсы для реализации проекта по созданию управленческого механизма (DP_i^{ym}), производства и реализации платформой услуг (UP_i^{pp}). При этом предлагается к реализации общий рыночный объем услуг платформы и прочих поставщиков таких же услуг (SY_j).

Внедрение управленческого механизма повышения конкурентоспособности меняет объемы услуг j -го вида, предлагаемые платформой (ΔSY_j):

$$\Delta SY_j = SY_j^1 - SY_j^0, \quad (4)$$

где SY_j^0 — объем услуг j -го вида, реализуемой платформой до внедрения управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности; SY_j^1 — объем услуг j -го вида, реализуемый платформой после внедрения механизма повышения ее конкурентоспособности.

Изменение предложения, как и изменение спроса, может привести к изменению цен на оказание данных услуг. Если до внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы эти цены ($ЦУ_j^0$) определялись как $SY_j = DY_j$, то после внедрения данного механизма эти цены ($ЦУ_j^1$) будут определяться как $SY_j + \Delta SY_j + \Delta OSY_j = DY_j + \Delta ODY_j$, где ΔODY_j — изменение общего объема рыночного спроса на услуги, аналогичные услугам j -го вида, оказываемых платформой после внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности; ΔOSY_j — изменение общего объема рыночного предложения на услуги j -го вида после внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности анализируемой платформой (без учета изменения объема предложения самой платформы ΔSY_j).

Слагаемое ΔOSY_j необходимо для учета влияния внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности в бизнес-процессы анализируемой платформы на деятельность других платформ.

Изменение рыночных цен на предлагаемый платформой j -й вид услуг ($\Delta ЦУ_j$), произошедшее в

результате внедрения данной платформой управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности, определяется как

$$\Delta ЦУ_j = ЦУ_j^1 - ЦУ_j^0, \quad (5)$$

где $ЦУ_j^0$ — цены на услуги j -го вида, реализуемые платформой до внедрения управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности; $ЦУ_j^1$ — цены на услуги j -го вида, реализуемые платформой после внедрения управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности.

Изменение объема спроса цифровой платформы на ресурсы, предназначенные для оказания и реализации предлагаемых ею услуг, произошедшее в результате внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности (ΔDYP_i^{pp}),

рассчитывается как $\Delta DYP_i^{pp} = DYP_i^{pp1} - DYP_i^{pp0}$,

где DYP_i^{pp0} — объем спроса платформы на ресурсы для оказания услуг до внедрения ею управленческого механизма повышения своей конкурентоспособности; DYP_i^{pp1} — объем спроса платформы на ресурсы для оказания услуг после внедрения ею управленческого механизма повышения конкурентоспособности.

Рыночные цены на ресурсы для оказания услуг платформой до внедрения ею управленческого механизма повышения конкурентоспособности ($ЦР_i^{pp0}$) могут быть определены из равенства

$$SYP_i^{pp} = DYP_i^{pp}. \quad (6)$$

Рыночные цены на ресурсы для оказания услуг платформой после внедрения ею управленческого механизма повышения конкурентоспособности ($ЦР_i^{pp1}$) могут быть определены из равенства

$$SYP_i^{pp} + \Delta OSYP_i^{pp} = DYP_i^{pp} + \Delta DYP_i^{pp} + \Delta ODYP_i^{pp}, \quad (7)$$

где $\Delta OSYP_i^{pp}$ — изменение объема рыночного предложения ресурсов i -го вида для оказания услуг, аналогичных услугам анализируемой платформы, после внедрения ею управленческого механизма повышения своей конкурентоспособности; $\Delta ODYP_i^{pp}$ — изменение объема рыночного спроса на ресурсы i -го вида для оказания услуг, аналогичных услугам анализируемой платформы, после внедрения ею управленческого механизма повышения своей кон-

курентоспособности (без учета изменения объема спроса со стороны самой платформы $\Delta DУР_i^{pp}$).

В таком случае изменение рыночных цен на ресурсы i -го вида $\Delta ЦР_i^{pp}$, требующиеся для оказания услуг платформой, в результате внедрения ею управленческого механизма повышения своей конкурентоспособности могут быть рассчитаны по формуле $\Delta ЦР_i^{pp} = ЦР_i^{pp1} - ЦР_i^{pp0}$.

Кроме ресурсов на оказание услуг, платформе требуются ресурсы на внедрение управленческого механизма повышения конкурентоспособности. Применим к анализу изменения цен на эти ресурсы такой же подход, что и к анализу изменения цен на ресурсы для оказания услуг платформой. Тогда:

— изменение объема спроса платформы на ресурсы i -го вида для внедрения управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности (ΔDP_i^{ym}) рассчитывается по формуле $\Delta DP_i^{ym} = DP_i^{ym1} - DP_i^{ym0}$, где DP_i^{ym0} — объем спроса платформы на ресурсы для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности до внедрения этого механизма; DP_i^{ym1} — объем спроса платформы на ресурсы для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности после внедрения этого механизма;

— рыночные цены на ресурсы для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности до внедрения этого механизма платформой ($ЦР_i^{ym0}$) определяются из равенства $SP_i^{ym} = DP_i^{ym}$. После внедрения этого механизма ($ЦР_i^{ym1}$)

$$SP_i^{ym} + \Delta OSP_i^{ym} = DP_i^{ym} + \Delta DP_i^{ym} + \Delta ODP_i^{ym}. \quad (8)$$

Обозначения слагаемых аналогичны обозначениям в формулах (6) и (7).

Изменение рыночных цен на ресурсы, необходимые для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы в результате реализации ею этого проекта рассчитывается по формуле

$$\Delta ЦР_i^{ym} = ЦР_i^{ym1} - ЦР_i^{ym0}. \quad (9)$$

Показатели ΔSY_j , $\Delta DУР_i^{pp}$ и ΔDP_i^{ym} будут определены в ходе взаимодействия между проектной и процессной системами. В данной части статьи они введены для выстраивания четкой логики рассуждений.

С учетом многообразия потребляемых платформой ресурсов и оказываемых ею услуг все изменения объемов спроса, предложения и следующие за ними изменения цен должны быть рассчитаны для каждого вида ресурсов и услуг.

В процессе взаимодействия средовой и процессной систем определяются изменения $\Delta ЦУ_j$ рыночных цен на услуги, оказываемые платформой, ресурсы $\Delta ЦР_i^{pp}$, требующиеся для оказания этих

услуг, ресурсы $\Delta ЦР_i^{ym}$ для внедрения механизма повышения конкурентоспособности платформы. Данные изменения произойдут в результате внедрения платформой управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности.

Формализация связей проектной и процессной систем. Процессная система предоставляет проектной системе пространство ресурсов (S). С одной стороны, это ресурсы для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности цифровой платформы, а также изменение в результате внедрения этого механизма объемов спроса на ресурсы для осуществления деятельности платформы. С другой стороны, это пространство для реализации дополнительных объемов услуг (которые также являются ресурсами для их покупателей), генерируемых платформой в результате реализации проекта по внедрению управленческого механизма.

Пространство процессов реализации результатов проекта позволяет платформе генерировать дополнительную выручку от реализации услуг. Для j -го вида продукта (услуги) платформы, генерирующей эту выручку, ее размер ΔB_{ymj}^n будет рассчитан по формуле

$$\Delta B_{ymj}^n = \Delta SY_j^n \cdot \Delta ЦУ_j^n, \quad (10)$$

где ΔSY_j^n — изменение в результате внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы объема предлагаемых платформой услуг j -го вида в период времени n (см. формулу (4)) — для упрощения формул считаем, что все эти услуги будут реализованы; $\Delta ЦУ_j^n$ — изменение в результате реализации проекта внедрения управленческого механизма рыночных цен на услуги j -го вида, реализуемые платформой в период времени n (см. формулу (5)).

При равенстве значений одного из показателей ΔSY_j^n или $\Delta ЦУ_j^n$ нулю его значение в формуле (10) необходимо взять на уровне SY_j^0 или $ЦУ_j^0$ (т. е. до внедрения платформой управленческого механизма повышения конкурентоспособности). В данной

ситуации величина $\Delta B_{ym_j}^n$ будет отражать изменение выручки платформы от реализации услуг j -го вида в период времени n либо в результате изменения объемов реализации данных услуг, либо в результате изменения цены их реализации под влиянием внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы.

В случае равенства каждого из показателей ΔSY_j^n и ΔCY_j^n нулю, $\Delta B_{ym_j}^n = 0$, так как изменения выручки платформы в связи с внедрением ею управленческого механизма повышения конкурентоспособности не произойдет.

Так как платформа может оказывать k видов услуг и в связи с внедрением управленческого механизма выручка от реализации может меняться по каждому виду услуг, необходимо рассчитать ее общее изменение в период времени n :

$$\Delta BO_{ym}^n = \sum_{j=1}^k \Delta B_{ym_j}^n. \quad (11)$$

Платность предоставления пространства ресурсов служит основой для интенсификации его использования (i), так как именно платность ресурсов заставляет платформу использовать их более эффективно, что приводит к изменению себестоимости оказываемых платформой услуг под влиянием внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы.

В связи с этим следует выделить виды затрат, учитываемые при моделировании последствий внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности в деятельность цифровой платформы.

- Затраты на ресурсы в период времени n по i -му виду ресурса — $ZB_{ym_i}^n$, необходимые для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы:

$$ZB_{ym_i}^n = \Delta DP_i^{ym^n} \cdot \Delta CP_i^{ym^n}, \quad (12)$$

где $\Delta DP_i^{ym^n}$ — изменение в результате внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы спроса на ресурсы i -го вида для внедрения этого механизма в период времени n (см. формулу (8)); $\Delta CP_i^{ym^n}$ — изменение в результате внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы рыночных цен на ресурсы i -го вида, необходимые для внедрения этого механизма в период времени n (см. формулу (9)). Так как внедрение

анализируемого управленческого механизма может потребовать использования ресурсов h -видов, общая сумма затрат на ресурсы, требуемые для внедрения этого механизма в период времени n

$$OZB_{ym}^n = \sum_{i=1}^h ZB_{ym_i}^n.$$

- Затраты на функционирование процессной системы оцениваются через изменение затрат на реализацию j -го вида услуг в период времени n в результате внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы

$$\Delta ZP_j^n = \Delta SY_j^n \cdot \Delta ZP_{ед_j}^n, \quad (13)$$

где $\Delta ZP_{ед_j}^n$ — изменение затрат на реализацию одной единицы j -го вида услуг в период времени n .

Выше было сказано, что платформа может оказывать k видов услуг. В таком случае следует рассчитать общую сумму затрат на процесс их реализации

$$\Delta OZP^n = \sum_{j=1}^k \Delta ZP_j^n. \quad (14)$$

Изменение затрат на закупку i -го вида ресурса для оказания услуг j -го вида в период времени n в результате внедрения в деятельность платформы управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности

$$\Delta Z3_i^n = \Delta DYP_i^{pp^n} \cdot \Delta Z3_{ед_i}^n, \quad (15)$$

где $\Delta DYP_i^{pp^n}$ — изменение спроса платформы на i -й вид ресурсов для оказания услуг в период времени n ; $\Delta Z3_{ед_i}^n$ — изменение затрат на процесс закупки одной единицы i -го вида ресурса для оказания платформой услуг в период времени n .

Поскольку число видов продукции равно k , а число видов ресурсов равно h , необходимо рассчитать изменение общей суммы затрат на их закупку в период времени n в результате внедрения платформой управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности по формуле:

$$\Delta OZ3^n = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^h \Delta Z3_{усл_i}^n. \quad (16)$$

Изменение затрат на закупку i -го вида ресурса для реализации проекта внедрения в деятельность платформы управленческого механизма повыше-

ния ее конкурентоспособности в период времени n в результате внедрения данного механизма

$$\Delta Z_{\text{ум}_i}^n = \Delta DP_i^{\text{ум}^n} \cdot \Delta Z_{\text{ум}_i}^n, \quad (17)$$

где $\Delta DP_i^{\text{ум}^n}$ — изменение спроса платформы на i -й вид ресурсов для внедрения в ее деятельность управленческого механизма повышения конкурентоспособности в период времени n ; $\Delta Z_{\text{ум}_i}^n$ — изменение затрат на процесс закупки одной единицы i -го вида ресурса для внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы в период времени n .

Поскольку число видов ресурсов равно h , рассчитывается общая сумма затрат на их закупку для реализации проекта внедрения в деятельность платформы управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности в период времени n :

$$\Delta OZ_{\text{ум}}^n = \sum_{i=1}^h \Delta Z_{\text{ум}_i}^n.$$

В формулах (13), (15), (17), как и формуле (12), в случае равенства нулю значения одного из множителей, его значение берется на том уровне, которое он принимал до внедрения в деятельность платформы управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности. При равенстве значений всех множителей нулю, значение их произведения также равно нулю.

Таким образом, общая сумма затрат на функционирование платформы, возникающих при взаимодействии анализируемого проекта внедрения управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности с процессной системой в период времени n , будет рассчитана по формуле:

$$\Delta OZ_{\Phi}^n = \Delta OZ_{\text{Р}}^n + \Delta OZ_{\text{З}}^n + \Delta OZ_{\text{ум}}^n.$$

Изменение затрат i -го вида на оказание j -го вида услуг в результате внедрения управленческого механизма повышения конкурентоспособности платформы в период времени n : $\Delta ZY_i^n = \Delta DУР_i^{\text{пр}^n} \cdot \Delta ЦР_i^{\text{пр}^n}$, где

$\Delta DУР_i^{\text{пр}^n}$ — изменение спроса платформы на i -й вид ресурсов для оказания j -го вида услуг в период

времени n ; $\Delta ЦР_i^{\text{пр}^n}$ — изменение цены на i -й вида ресурса для оказания j -го вида услуг в период времени n .

Поскольку число видов продукции равно k , а число видов ресурсов равно h , необходимо рассчитать общую сумму затрат на ресурсы для оказания платформой услуг в период времени n ($\Delta OZУ^n$) в результате внедрения в деятельность этой плат-

формы управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности:

$$\Delta OZУ^n = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^h \Delta ZY_i^n. \quad (18)$$

Внедрение в деятельность платформы управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности должно быть эффективным, в противном случае оно не имеет смысла. Само моделирование этого внедрения необходимо для того, чтобы предварительно оценить его эффективность и, таким образом, обосновать необходимость этого внедрения. Для оценки эффективности рассчитаем изменение финансовых потоков платформы в периоде времени n в результате реализации проекта по внедрению управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности: $\Phi П_n = \Delta BO_{\text{ум}}^n - \Delta OZ_{\text{Р}}^n - \Delta OZУ^n - \Delta OZ_{\text{З}}^n$, где $\Delta BO_{\text{ум}}^n$ — изменение выручки платформы (рассчитано по формуле (11)); $\Delta OZ_{\text{Р}}^n$ — изменение затрат на реализацию платформой услуг (рассчитано по формуле (14)); $\Delta OZУ^n$ — изменение затрат на ресурсы для оказания платформой услуг (рассчитано по формуле (18)); $\Delta OZ_{\text{З}}^n$ — изменение затрат на закупку ресурсов для оказания платформой услуг (рассчитано по формуле (16)).

Распределение денежных потоков во времени приводит к необходимости их дисконтирования:

$$\Phi П_{\text{д}} = \sum_{n=1}^m \frac{\Phi П_n}{(1+r)^n}, \quad (19)$$

где $\Phi П_{\text{д}}$ — дисконтированное значение изменения денежных потоков от реализации платформой услуг в результате осуществления проекта по внедрению в деятельность платформы управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности; n — временной период поступления финансового потока; m — общее число временных периодов поступления финансовых потоков; r — ставка дисконтирования.

Рассчитаем общую сумму инвестиций платформы в реализацию проекта по внедрению управленческого механизма повышения ее конкурентоспособности в период времени n : $OИ_n = OЗВ_{\text{ум}}^n + \Delta OZ_{\text{ум}}^n$. Распределение сумм инвестиций по времени также приводит к необходимости их дисконтирования:

$$OИ_{\text{д}} = \sum_{n=1}^m \frac{OИ_n}{(1+r)^n}, \quad (20)$$

нирывать. Это могут быть как потоки средств, привлеченные от внешних источников, так и потоки выручки, прибыли, генерируемой проектом и достаточные не только для финансирования его текущей деятельности, но и для расчетов с владельцами привлеченных средств. Исходя из этого, объектная система будет предоставлять проекту время при выполнении условия: $IRR > ССФ$, где iRR — внутренняя норма рентабельности проекта, значение $ССФ$ определяется по формуле (2). Обязательным условием является $NPV > 0$.

Необходимость возврата инвесторам вложенных ими в финансирование реализации проекта средств в приемлемый для них период времени также является обязательным условием предоставления времени функционирования проекту, что приводит к возникновению еще одного обязательного условия эффективности проекта: $NPV > ДСПР$.

Дисконтированная сумма потоков оплаты ресурсов рассчитывается по формуле (3). Объяснение этого условия заключается в том, что средства, вложенные инвесторами, фактически станут активами платформы; T — это период времени, за который инвесторы смогут получить от реализации проекта прибыль, равную их инвестициям, без реализации своей доли активов в данном предприятии.

Схематично предложенная модель показана на рис. 2 в виде детализации тетрады моделирования управленческих механизмов повышения конкурентоспособности цифровых платформ (см. также рис. 1).

Преимущество предлагаемой модели для оценки эффективности управления конкурентоспособностью цифровых платформ состоит в том, что она обеспечивает сочетание микроэкономического и макроэкономического подходов. Именно это сочетание позволяет учесть многоплановость и масштабность экономических последствий изменения конкурентоспособности платформы, зачастую не свойственную проектам развития других предприятий. Перечислим ее главные особенности.

- С одной стороны, в предлагаемой модели в определенной степени применяются универсальные микроэкономические методы анализа финансовых потоков, хорошо зарекомендовавшие себя в процессах бизнес-планирования (важной составляющей части управления проектами). Избегая излишней сложности, в данной модели проект внедрения механизма управления конкурентоспособностью в деятельность платформы рассматривается как вид проекта по повышению эффективности деятельности предприятия.
- С другой стороны, избегая излишнего упрощения (что особенно важно для такой инноваци-

онной структуры, как цифровая платформа), предлагаемая модель учитывает масштабность влияния платформы и, как следствие, изменений ее конкурентоспособности на экономику. Это становится возможным в результате учета в рамках предлагаемой модели влияния деятельности платформы на окружающую ее среду через механизмы ценообразования в совокупности рынков ресурсов, услуг и готовой продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к управлению конкурентоспособностью в системе цифровых платформ сводится к моделированию управленческих механизмов, основанному на включении в процесс моделирования большого набора факторов. Внедрение такого управленческого механизма в деятельность цифровой платформы изменяет ее спрос на ресурсы, необходимые как для ее функционирования, так и для формирования соответствующего управленческого механизма, а также изменяет объемы спроса на услуги, предлагаемые цифровой платформой.

Для моделирования с учетом широкого набора учитываемых в ходе моделирования факторов в настоящей работе предложена соответствующая модель, позволяющая учесть все многообразие экономических процессов, как подверженных влиянию механизмов управления конкурентоспособностью платформы, так и оказывающих влияние на эти механизмы. В теоретическую основу для моделирования положена ресурсная теория системной организации экономики [20, 21].

В рамках предложенного подхода описано влияние, которое механизм управления конкурентоспособностью оказывает как на функционирование цифровой платформы, так и на ее связи с поставщиками и потребителями ее ресурсов и услуг, инвесторами. Это влияние также сказывается на ситуации на рынках ресурсов, необходимых для функционирования платформы, и рынках оказываемых ею услуг.

Результаты анализа могут быть полезны в практической деятельности отечественных предприятий, цифровых экосистем, самих цифровых платформ — как уже существующих, так и создаваемых, а также нецифровых предприятий, стремящихся повысить конкурентоспособность путем внедрения цифровых двойников и сквозных цифровых технологий [5], зарекомендовавших себя как основное слагаемое успеха деятельности цифровых платформ.

Применение предложенной модели позволит ускорить процессы разработки и внедрения новых



механизмов повышения конкурентоспособности цифровых платформ с одновременным снижением риска их внедрения, что в совокупности станет основой для повышения эффективности функционирования цифровых платформ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рифкин Дж.* Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. — М.: Альпина нон-фикшн, 2014. — 410 с. [Rifkin, J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World. — Moscow: Alpina non-fiction, 2014. — 410 p. (In Russian)]
2. *Марш П.* Новая промышленная революция: потребители, глобализация и конец массового производства. — М.: Изд-во Института Гайдара, 2015. — 420 с. [March, P. The New Industrial Revolution: Consumers, Globalization and the End of Mass Production. — Moscow: Gaidar Institute Publishing House, 2015. — 420 p. (In Russian)]
3. *Anderson, C.* Makers: The New Industrial Revolution. — London: Crown Business, 2012. — 272 p.
4. *Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П.* и др. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. — 2019. — № 1. — С. 2—14. doi: 10.25728/ru.2019.1.1 [Voropaj, N.I., Gubko, M.V., Kovalev, S.P., et al. Problems of Development of Digital Energy in Russia // Control Sciences. — 2019. — No. 1. — P. 2—14. (In Russian)]
5. *Raikov A.N., Ermakov A.N., and Merkulov, A.A.*, Assessments of the Economic Sectors Needs in Digital Technologies // Lobachevskii Journal of Mathematic. — 2019. — Vol. 40, no. 11. — P. 1837—1847. doi: 10.1134/S1995080219110246
6. *Шваб К.* Четвертая промышленная революция. — М.: Эксмо, 2016. — 208 с. [Schwab, K. Fourth Industrial Revolution. — Moscow: Exmo, 2016. — 208 p. (In Russian)]
7. *Александров А.М.* Четвертая промышленная революция и модернизация образования: международный опыт // Стратегические приоритеты. — 2017. — № 1 (13). — С. 53—69. [Aleksankov, A.M. The Fourth Industrial Revolution and the Modernization of Education: International Experience // Strategic Priorities. — 2017. — No. 1 (13). — P. 53—69. (In Russian)]
8. *Тарасов И.В.* Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития // Стратегии бизнеса. — 2018. — № 6 (50). — С. 57—63. [Tarasov, I.V. Industry 4.0: Concept, Concepts, Development Trends // Business strategies. — 2018. — No. 6 (50). — P. 57—63. (In Russian)]
9. *Uzialko, A.C.* (2017). Industry 4.0: How Technology is Revolutionizing the Manufacturing Industry. — 2017. — URL: <https://www.businessnewsdaily.com/10156-industry-manufacturing-iot.html>
10. *Маркова В.Д.* Бизнес-модели компаний на базе платформ // Вопросы экономики. — 2018. — № 10. — С. 127—135. [Markova, V.D. Platform Business Models // Economic issues. — 2018. — No. 10. — P. 127—135. (In Russian)]
11. *Национальный индекс развития цифровой экономики.* — М.: Госкорпорация РОСАТОМ, 2018. — 94 с. [National Digital Economy Development Index. — Moscow: ROSATOM State Corporation, 2018. — 94 p. (In Russian)]
12. *Степнов И.М.* Экономические агенты и принципы их функционирования в цифровом пространстве // Управление инновационными и инвестиционными процессами и изменениями в условиях цифровой экономики: Сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. — СПб., 2019. — С. 274—279. [Stepnov, I.M. Economic Agents and the Principles of Their Functioning in Digital Space // Management of Innovation and Investment Processes and Changes in the Digital Economy: Collection of Scientific Papers of the II International Scientific and Practical Conf. — SPb., 2019. — P. 274—279. (In Russian)]
13. *Срничек Н.* Капитализм платформ. — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. — 128 с. [Srnichек, N. Platform Capitalism. — Moscow: Publishing House of Higher School of Economics, 2019. — 128 p. (In Russian)]
14. *Кравченко Н.А., Маркова В.Д., Балдина Н.П.* и др. Вызовы цифровой трансформации и бизнес высоких технологий. — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2019. — 351 с. [Kravchenko, N.A., Markova, V.D., Baldina, N.P., et al. Challenges of Digital Transformation and High-Tech Business. — Novosibirsk: IEOPP SB RAS, 2019. — 351 p. (In Russian)]
15. *Паркер Дж., Альтин М., Чаудари С.* Революция платформ. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. — 304 с. [Parker, Dzh., Al'stin, M., Chaudari, S. Platform Revolution. — Moscow: Mann, Ivanov and Ferber, 2017. — 304 p. (In Russian)]
16. *Гончаров А.С., Саклаков В.М.* Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы: Сб. науч. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. — Кузбасс, 2018. — С. 24—26. [Goncharov, A.S., Saklakov, V.M. Digital Double: a Review of Existing Solutions and Prospects for the Development of Technology // Information and Telecommunication Systems and Technologies: Collection of Scientific Papers of the All-Russian International Scientific and Practical Conf. — Kuzbass, 2018. — P. 24—26. (In Russian)]
17. *Меткалф Б.* Закон Меткалфа сорок лет спустя после рождения Ethernet // Открытые системы. СУБД. — 2014. — № 1. — С. 44—47. [Metkalf, B. Metcalfe's Law Forty Years After the Birth of Ethernet // Open Systems. DBMS — 2014. — No.1. — P. 44—47. (In Russian)]
18. *Еремин В.В.* Мультипликатор инвестиций: сущность, поэтапный анализ, влияние на динамику инноваций. — М.: МФЮА, 2016. — 152 с. [Eremin, V.V. Multiplier of Investments: Essence, Phased Analysis, Impact on the Dynamics of Innovation. — Moscow: MFUA, 2016. — 152 p. (In Russian)]
19. *Еремин В.В.* Математический анализ мультипликатора автономных расходов в статике и динамике. — Уфа: Аэтерна, 2015. — 150 с. [Eremin, V.V. Mathematical Analysis of the Autonomic Expense Multiplier in Statics and Dynamics. — Ufa: Aeterna, 2015. — 150 p. (In Russian)]
20. *Клейнер Г.Б.* Новая теория экономических систем и ее приложения // Вестник РАН. — 2011. — № 9. — С. 794—808. [Kleiner, G.B. The New Theory of Economic Systems and its Applications // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. — 2011. — No. 9. — P. 794—808. (In Russian)]
21. *Клейнер Г.Б.* Системная парадигма и системный менеджмент // Российский журнал менеджмента. — 2008. — № 6 (3) — С. 37—50. [Kleiner, G.B. Systemic Paradigm and System Management // Russian Management Journal. — 2008. — No. 6 (3). — P. 37—50. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Ключковым.

Поступила в редакцию 27.01.2020, после доработки 4.03.2020.
Принята к публикации 18.04.2020.

Еремин Владимир Владимирович — канд. экон. наук, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ✉ villy.eremin@gmail.com,

Бауэр Владимир Петрович — д-р экон. наук, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ✉ bvp09@mail.ru,

Райков Александр Николаевич — д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ✉ alexander.n.raikov@gmail.com.

COMPETITIVENESS MANAGEMENT IN THE DIGITAL PLATFORM SYSTEM

V.V. Eremin¹, V.P. Bauer², A.N. Raikov³

^{1,2} Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia,

³ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
Lomonosov Moscow State University, Russia

¹ ✉ villy.ereimin@gmail.com, ² ✉ bvp09@mail.ru, ³ ✉ alexander.n.raikov@gmail.com

Abstract. It is shown that digital platforms modify the existing mechanisms of competition by actively managing their competitiveness. A detailed classification of digital platforms is developed. Mechanisms for managing the competitiveness of digital platforms are developed and presented. The development of the resource theory of systemic organization of the economy in the context of its platformization is proposed. The interconnections between digital platforms and competitiveness management mechanisms integration projects are determined. The connections were developed of digital platforms with the environment system of resource providers for the platform and consumers of its services, as well as with the pricing system in the markets of these resources and services, which is used as the basis for assessing changes in the interaction of supply and demand. The possibility of introducing adequate mathematical modeling is shown in order to improve the management efficiency of this competitiveness. At the same time, a variety of relationships was taken into account when modeling management mechanisms to increase competitiveness, which will significantly reduce the risks of implementing these mechanisms and increase the efficiency of using digital platforms.

Keywords: competitiveness, digital economy, digital platform, digital ecosystem, classification, management.

Funding. The article was prepared upon the results of studies carried out at the expense of budget funds on a state assignment to the Financial University under the Government of the Russian Federation.



Новая книга

Новиков Д.А. Управление, деятельность, личность. — М.: ИПУ РАН, 2020. — 80 с..

Работа представляет собой взгляд специалиста по теории управления на теории личности и деятельности в поисках их результатов, необходимых для постановки и решения задач управления системами, содержащими человека. Предлагаемые конструкции можно рассматривать как «интерфейс», устанавливающий соответствие между подходами и результатами психологии личности, методологии и науки управления.

Ориентирована на специалистов по теории управления, которые, прочитав ее, могут получить первоначальные представления о теориях личности и теориях деятельности, а также их связи с управлением социальными и организационно-техническими системами. Читатели-психологи, возможно, увидят не только перспективы использования их результатов в упомянутых разделах теории управления, но и ряд новых непростых вызовов.

Скачать полный текст: http://www.mtas.ru/search/search_results.php?publication_id=22808

КОНСТАНТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ В ДЕЛОВЫХ ИГРАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА: УСТОЙЧИВОСТЬ К ДИЗАЙНУ ИГР И МОДЕЛЬ¹

В.О. Корепанов

Аннотация. В проведенных деловых играх распределения ресурсов обнаружено «константное» поведение (КП) игроков, когда игроки не меняют своих действий в течение нескольких шагов игры. Особенностью игровых данных является то, что КП занимает в них большую долю. Предложен измененный дизайн игр, где выплаты производятся за каждый из пяти игровых шагов и интерфейс не позволяет игроку легко вводить неизменную заявку. Результаты игр с измененным дизайном показали, что доля КП уменьшилась, но остается на достаточно высоком уровне. Далее представлены результаты поиска причины данного поведения с помощью статистических гипотез и решения задач классификации решений игроков. Среди статистических гипотез приняты гипотезы о случайной природе КП и остановки КП в случае падения выигрыша. Задача классификации позволяет провести отбор информативных признаков (параметров и истории игры) и правило принятия решения игроками (классификатор) об остановке КП на их основе. Результаты построения классификатора дали идею усложнения модели: у игрока есть не только принцип остановки/продолжения КП, но и принцип начала КП. Также показано, что результаты статистического исследования и классификации имеют общие черты и могут в дальнейшем дополнить друг друга.

Ключевые слова: деловые игры, экспериментальная экономика, модели поведения, задача распределения ресурса.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] описано проведение деловых игр по распределению ограниченного ресурса на основе механизма Гровса — Лейдярда при трансферабельной полезности (полезность можно «перенести» между игроками). Эксперимент тогда и далее проводился в лаборатории, участники знакомились с условиями игры, с самой игрой и играли без разговоров между собой, каждый за своим компьютером. Для принятия решений от игроков и сбора данных игры применялась система создания и проведения экономических экспериментов zTree. Проводились игры со студентами экономических и технических специальностей.

В работе [1] была обнаружена большая доля константного поведения (КП) у игроков — когда в течение нескольких шагов игры действие игрока

не меняется. Причем в большинстве случаев такое поведение не соответствует ни действию, представляющему собой наилучший ответ на предыдущие действия, ни даже движению в сторону такого действия [1].

Понять причины такого поведения важно, так как:

— итоговые распределения ресурсов в играх неэффективны, хотя используемые механизмы распределения ресурсов в основном обладают очень хорошими теоретическими свойствами: единственность и устойчивость равновесия Нэша, сходимость к равновесию Нэша моделей поведения и обучения [1, 2],

— обнаружена проблема манипулируемости механизмов распределения ресурсов [3, 4],

— важно фундаментальное понимание поведения людей в деловых играх.

В общем случае причина того или иного поведения кроется либо в самих игроках, либо в элементах дизайна игры, в которой участвуют игроки. К элементам дизайна игр относятся, например,

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-07-01550 А.

наличие ознакомительной лекции, число ознакомительных шагов игры, число основных шагов игры, правила вознаграждения за участие в игре, информация, которая дается игрокам в игре и т. п. В § 3 данной работы мы оценим влияние дизайна проведенных игр на наличие КП.

Если искать источник поведения в самих игроках, наиболее близко к исследуемой модели КП находятся модели обучения из экспериментальной экономики (см., например, работы [5—7]), которые можно поделить на два класса.

К первому классу относятся модели на основе представлений (beliefs-based) — игроки формируют представления о поведении оппонентов и на их основе выбирают свое поведение. К этому классу принадлежат модели Курно [8] и Fictitious Play [9, 10] и дальнейшие их обобщения [11—13], построенные для преодоления слабых сторон этих моделей.

Параллельно развивались модели, не основанные на представлениях, а развивавшиеся на идеях обучения с подкреплением (reinforcement learning, RL). Идея обучения с подкреплением в том, что игрок смотрит не на поведение других игроков, а на свой выигрыш от выбранных действий и с большей вероятностью выберет такое действие, которое давало ему больший выигрыш в прошлом. В данных моделях игроку не нужно знать информацию об остальных игроках, при достаточных предположениях знание только своего выигрыша от истории игры позволяет корректировать выбор действия на следующем шаге и находить оптимальную стратегию, по крайней мере, в пределе по шагам. Примеры моделей данного класса в работах [14—17].

Модели обучения допускают, чтобы игроки не меняли свое действие в течение некоторого времени, но идея, из-за которой это происходит, одна — «стремление к действию» или «привлекательность» действия, приносившего в прошлом больший выигрыш. Другими словами, чаще должно выбираться то действие, которое в прошлом приносило выигрыш больше, чем другие действия, поэтому, в том числе, оно может выбираться неизменно в течение нескольких шагов игры. Такой режим в моделях обучения называют «эксплуатацией». При этом выбор действия вероятностен, а вероятности действий определяются через привлекательности действий — на каждом шаге режима, в принципе, может быть выбрано разное действие.

Наиболее близкая модель, которая явно вносит режим КП — Inertia sampling and weighting (I-SAW) [18]. В ней есть три режима: Исследование, Эксплуатация и Инерция. Как и в основной массе моделей обучения, в режиме исследования равновероятно выбирается любое из возможных действий игрока. Константное поведение в модели I-SAW

может ассоциироваться с режимом инерции, в котором есть вероятность повторения именно последнего действия, в отличие от режима эксплуатации, в котором последнее действие может повториться только случайно (хотя, может быть, и с большой долей вероятности, если оно приносило в прошлом большой выигрыш). При этом вероятность оказаться в этом режиме уменьшается в степенной зависимости при увеличении размера «сюрприза»: оценки различия между ожидаемым выигрышем и полученным на прошлом шаге.

Важно отметить, что в данной работе не предлагается полная модель поведения, в отличие от упомянутых выше, а предлагаются результаты по поиску только моделей, объясняющих моменты КП игрока: сначала вероятностных, затем, основанных на использовании информации, доступной игрокам, и построении на ее основе классификаторов, которые были бы моделью принятия решения на следующем шаге: «продолжать КП — не продолжать КП». Эти результаты могут быть далее встроены, например, в модель I-SAW на место режима Инерция, и их эффективность проверена с помощью стандартных методов.

Из неполноты модели вытекает и то, что мы пока не применяем методы идентификации правил обучения, принятые в экономической литературе [19, 20] — эти методы применяются для моделей поведения, которые стремятся описать поведение на каждом шаге игры, мы же берем только шаги с неизменными действиями с заданной точностью и на них проверяем модель. Данные методы, наверное, можно применить и для модели КП на части шагов, но будет под вопросом сравнение полученного значения критерия эффективности модели КП на части шагов со значениями критерия для других моделей, посчитанным на данных всех шагов.

В данной работе будет показано, что у КП, обнаруженных на имеющихся данных, моделей для объяснения КП может быть две — одна вероятностная, другая на основе классификатора. Во втором случае КП не может быть сведено полностью к известным моделям обучения.

Работа организована по такой схеме:

- описание деловых игр;
- модель константного поведения;
- проверка влияния ряда факторов дизайна игры на наличие константного поведения. Проводится деловая игра с измененным дизайном — экспериментальным (для сравнения с базовым дизайном):
 - модель КП с режимами, проверка ряда гипотез о КП;
 - задачи классификации для модели КП с режимами, попытка выделить значимые признаки для объяснения КП.

В работе использовались данные деловых игр (действия игроков на шагах игры) для базового дизайна игры, деловых игр для экспериментального дизайна игры, анкетирования игроков после игры.

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ДЕЛОВЫХ ИГР

Проводились игры по распределению делимого ограниченного ресурса $R = 115$ между тремя игроками. Каждый игрок i делает заявку $s_i(\tau)$ на каждом шаге игры $\tau \in \{1, \dots, T\}$, после подачи игроками своих заявок $s(\tau) = (s_1(\tau), s_2(\tau), s_3(\tau))$ происходит расчет: ресурса, назначаемого игрокам $x_i(s(\tau))$ (шаг τ далее опускаем, если понятно о чем речь), полезностей игроков $u_i(x_i(s)) \in \mathbb{R}$, штрафов $p_i(s) \in \mathbb{R}$ и выигрышей игроков $g_i = u_i - p_i$. Далее игра переходит на следующий шаг или заканчивается. В качестве результата игры для игрока брался его выигрыш на последнем шаге.

В качестве функций полезности игроков принимается функция от полученного ресурса $u_i(x_i) = \sqrt{r_i + x_i}$, где r_i — тип игрока i или базовое количество ресурса, имеющееся у игрока. У игроков были типы 1, 9 и 25, но типы игрокам назначались случайно в каждой игре.

Рассматриваемый в данной работе механизм распределения ресурса Yang-Hajek (YH) [2], представляется таким образом:

$$s_i \in [0, 1000],$$

$$x_i = \begin{cases} \frac{S_i R}{S}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \end{cases}$$

где $S = s_1 + s_2 + s_3$,

$$p_i = \beta s_i S_{-i}$$

где $S_{-i} = S - s_i$, $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$.

В базовом дизайне число шагов в игре ограничивалось 60 шагами, но игра могла закончиться досрочно, если никто из игроков не поменял свои заявки. Всего было проведено 13 игр с механизмом YH с общим числом шагов 330, а если считать число шагов для каждого игрока в отдельности, то получится $330 \cdot 3 = 990$. На рис. 1 представлен график продолжительности игр (число шагов в каждой игре). Общее число участников игр — 39.

Общий процесс деловой игры состоял в следующем: рассказ группе студентов об игре и процессе экспериментов, ознакомительная игра, показ результатов игры, основная игра, обсуждение итогов и выигрышей, выплата вознаграждений. Перед ознакомительной и основной игрой студенты садились каждый за свой стол с компьютером, затем,

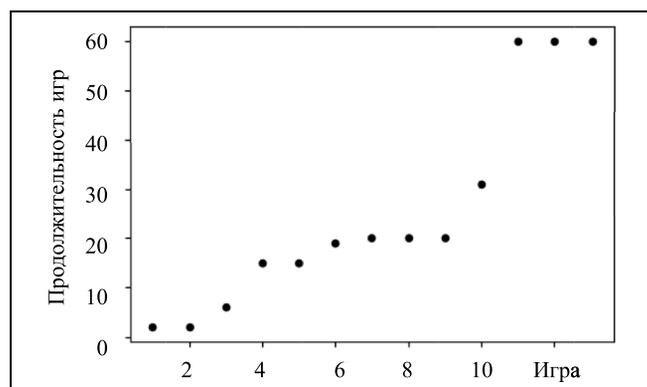


Рис. 1. Продолжительность игр

с помощью функционала zTree, они случайным образом группировались по три человека в группе и случайным образом в каждой группе игрокам назначались их типы из множества $\{1, 9, 25\}$ без повтора. В ознакомительной игре студентам разрешалось устное общение для обмена опытом, совместного исследования игры, в основной игре — было запрещено. Вознаграждение выплачивалось в размере 20–30 руб. за единицу выигрыша.

В процессе ознакомительной или основной игры игроки знали: общий вид функций полезности друг друга, функции распределения ресурса и функции штрафов, свои типы, распределения ресурса и собственные выигрыши на предыдущих шагах игры в числовой форме и в форме графиков, условия остановки игры. Игроки не знали: заявки, поданные другими, типы других игроков (кроме информации, что они из множества $\{1, 9, 25\}$ и не равны типу самого игрока), выигрыши, штрафы и др.

Игры создавались и проводились с помощью программы zTree [21], обработка данных осуществлялась в основном с помощью MS Excel и библиотек numpy, pandas, scikit-learn на языке программирования python3 в среде Jupyter.

2. КОНСТАНТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ

При анализе поведения людей в условиях дискретного пространства действий зачастую в модель добавляют некую случайность, которая позволяет учесть случайность в экспериментальных данных, устойчивость стратегий. Мы учтем случайность поведения в константном поведении с помощью параметра погрешности.

Интуитивно КП можно определить как шаги, при которых игрок не изменил свою заявку с прошлого шага с заданной абсолютной погрешностью $\varepsilon \geq 0$. Это дает понять суть КП, но при погрешности $\varepsilon = 1$ последовательность заявок (1, 2, 3, 4, ...) будет представлять КП. Скорее, нужно говорить о

том, что КП — это набор заявок, не меняющийся в целом больше, чем заданная погрешность. Такая модель похожа на модели «дрожания» (tremble) при выборе игроком заявки [20].

Обозначим $s_i(a, b) = \{s_i(\tau) | a \leq \tau \leq b\}$, $[a, b] = \{a, a + 1, \dots, b\}$, $|A| = \max(A) - \min(A)$, для конечных множеств $A \subseteq \mathbb{R}^1$. Дадим более точное определение.

Определение 1. Игрок i проявляет константное поведение $CB(i, t_s, t_e, \varepsilon)$ с погрешностью $\varepsilon \geq 0$ с шага $t_s + 1$ до шага $t_e > t_s$, если:

$$|s_i(t_s, t_e)| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

$$\forall a < t_s, b > t_e: |s_i(a, t_e)| > \varepsilon \vee |s_i(t_s, b)| > \varepsilon, \quad (2)$$

не существует другого КП $CB(i, t_a, t_b, \varepsilon)$, удовлетворяющего условиям (1) и (2) такого, что

$$t_a > t_s \text{ и } [t_a, t_b] \cap [t_s, t_e] \neq \emptyset. \quad (3)$$

Смысл условий (1) и (2) прозрачен, условие (3) устраняет неоднозначность выбора КП условиями (1) и (2) в сторону первого шага. Для пояснения возьмем последовательность заявок (10, 11, 12, 13, 14). Для погрешности $\varepsilon = 2$ в этой последовательности можно выделить два набора заявок, удовлетворяющих условиям (1) и (2): $\{(10, 11, 12), (13, 14)\}$ и $\{(11, 12, 13)\}$. Условие (3) ограничивает выбор только заявками КП $\{(10, 11, 12), (13, 14)\}$.

Определение 1 аналогично результатам «алгоритма» последовательного поиска КП от первого шага каждой игры к последнему: ищем, начиная с первого шага, последовательности заявок игроков, максимум и минимум которых отличаются не больше, чем на ε .

Последовательность $s_i(t_s, t_e)$ будем называть *заявками КП*. Множество всех КП погрешности ε обозначим $C(\varepsilon)$, длиной КП назовем $L = t_e - t_s$. Заметим, что длина КП, например, $CB(1, 2, 5, 1)$ будет равна 3 (шаги 3, 4 и 5), и шаг 2 не входит в КП, но важен как отправная точка, от которой началось КП.

В проведенных играх число КП и суммарное число шагов в них в зависимости от точности представлено в табл. 1.

Уже при погрешности 0 число шагов в КП достигает почти треть всех 978 шагов, т. е. КП важно для описания поведения игроков в базовом дизайне игры.

3. ВЛИЯНИЕ ДИЗАЙНА ИГРЫ НА НАЛИЧИЕ КОНСТАНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ

В работе [1] были проанализированы данные для двух механизмов распределения ресурсов из одного класса, позднее были проведены игры с механизмами других классов [4], и КП также занимало большую долю среди действий игроков.

Можно проверить гипотезу, что сам базовый дизайн игры стимулировал подобное поведение — игроки получали итоговый выигрыш только по результату последнего шага игры, и последний шаг игры мог определяться динамически — шаг, в котором никто из игроков не поменял своего действия — условие, позволявшее игрокам прийти к удовлетворяющему всех распределению ресурса. Поэтому встал вопрос о влиянии дизайна игры на полученные результаты. Помимо введения фиксированного числа шагов, решили назначать итоговый выигрыш по суммарному выигрышу за каждый шаг игры, чтобы избежать аномального поведения игроков на последнем шаге. Возможно, также повлиял интерфейс игры, так как по умолчанию в поле ввода заявки игроку ставилась заявка с прошлого шага, таким образом, у игрока мог быть стимул для «лени».

Были проведены игры с измененным дизайном, игроки были другие, но все также студенты экономических и технических специальностей. Назовем дизайн «экспериментальным», так как он ближе к дизайну игр экспериментальной экономики [22, 23]:

- пять обучающих шагов;
- пять основных шагов;
- вознаграждение игроку за игру было пропорционально суммарному выигрышу за *основные шаги* игры;
- в поле ввода заявок устанавливался 0 по умолчанию на каждом шаге.

Результаты по числу константного поведения и числу шагов в КП для игр с механизмом Yang-Hajek (YH) [2] и Grove-Ledyard (GL) [1] представлены в табл. 2 и 3 и на рис. 2.

Хотя общее число шагов в случае экспериментального дизайна на два порядка меньше, качественно можно сказать, что:

- доля КП с погрешностью 0 становится меньше в 1,5–4,5 раз (насколько меньше, зависит так-

Таблица 1

Число контактного поведения и суммарное число шагов в КП

ε	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число КП	131	180	192	198	203	229	221	214	212	202	202
Число шагов в КП	295	415	465	498	526	607	613	620	629	635	688

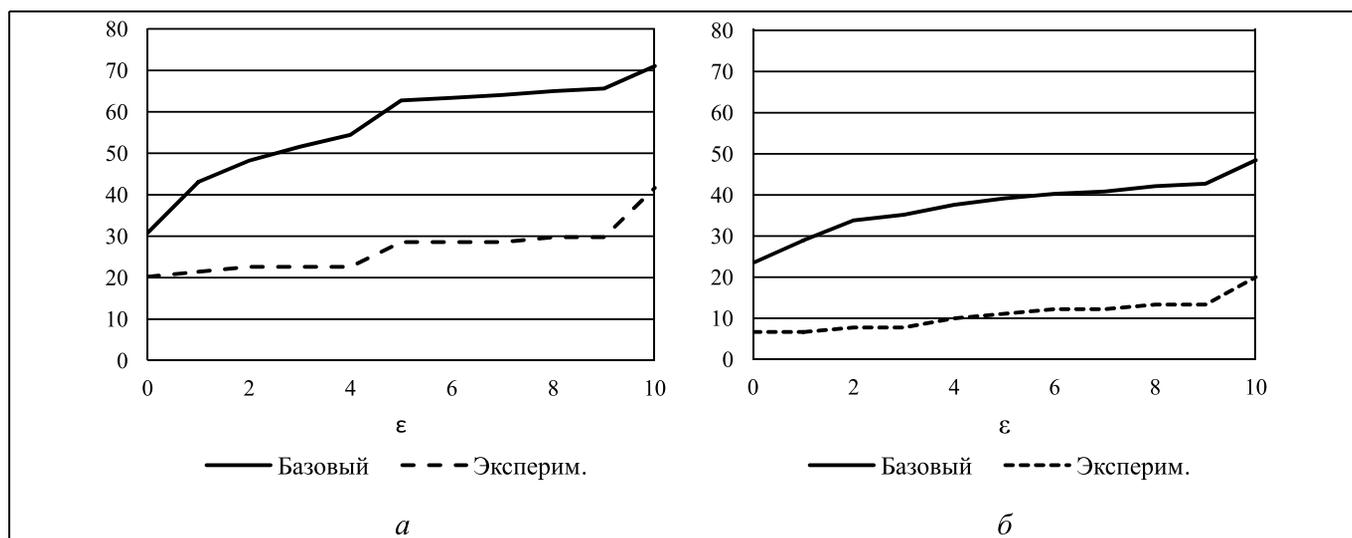


Рис. 2. Процент шагов во всех КП для базового и экспериментального дизайна в механизмах УН (а) и GL (б) в зависимости от погрешности КП

же от механизма), но остается существенной в поведении игроков для механизма УН;

— доля КП быстро растет при увеличении погрешности от 0 до 3 в случае базового дизайна и почти не меняется в случае экспериментального дизайна.

Первый вывод говорит о том, что обнаруженное КП сильно зависело от дизайна экспериментов, но не полностью им объясняется, т. е. оно важно для описания поведения игроков. Второй вывод наталкивает на мысль о влиянии базового дизайна — можно предложить гипотезу, что рост

доли КП с погрешностью больше 0 связан с моделью поведения, в которой игроки меняли немного свои действия, чтобы посмотреть на его эффективность, не останавливая игру, так как если все игроки не поменяют своих действий в базовом дизайне, то игра остановится.

В итоге получается, что доля КП оказалась завышена в базовом дизайне; после изменения дизайна игры видим, что доля КП снизилась, оставшись при этом на заметном уровне для механизма УН (минимум 20 %). Интересна зависимость КП от применяемого механизма — в механизме GL

Таблица 2

Сравнение числа шагов в КП в играх с механизмом Yang-Hajek в случаях базового (Б) и экспериментального (Э) дизайна

Дизайн	Всего шагов	КП										
		$\epsilon = 0$	$\epsilon = 1$	$\epsilon = 2$	$\epsilon = 3$	$\epsilon = 4$	$\epsilon = 5$	$\epsilon = 6$	$\epsilon = 7$	$\epsilon = 8$	$\epsilon = 9$	$\epsilon = 10$
Б	978	295	415	465	498	526	607	613	620	629	635	688
	%	30	42	48	51	54	62	63	63	64	65	70
Э	90	17	18	19	19	19	24	24	24	25	25	35
	%	19	20	21	21	21	27	27	27	28	28	39

Таблица 3

Сравнение числа шагов в КП в играх с механизмом Grovse-Ledyard в случаях базового (Б) и экспериментального (Э) дизайна

Дизайн	Всего шагов	КП										
		$\epsilon = 0$	$\epsilon = 1$	$\epsilon = 2$	$\epsilon = 3$	$\epsilon = 4$	$\epsilon = 5$	$\epsilon = 6$	$\epsilon = 7$	$\epsilon = 8$	$\epsilon = 9$	$\epsilon = 10$
Б	2346	545	672	785	817	873	909	935	948	978	992	1125
	%	23	29	34	35	38	39	40	41	42	43	48
Э	96	6	6	7	7	9	10	11	11	12	12	18
	%	7	7	8	8	10	11	12	12	13	13	20

доля КП в экспериментальном дизайне резко падает, возможно, это связано с качественным отличием пространств заявок: \mathbb{R}^3 в GL и \mathbb{R} в YH.

Доли КП с погрешностью 0 меньше всего отличаются в базовом и экспериментальном дизайне, к тому же при таком поведении ясно, что на игрока не влияет условие остановки игры базового дизайна, если бы игрок боялся остановки игры, то воспользовался бы КП с погрешностью больше 0. Поэтому далее будет проводиться анализ КП с погрешностью 0, если иное не оговорено особо.

4. МОДЕЛЬ КОНСТАНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ С РЕЖИМАМИ. ГИПОТЕЗЫ

В данном параграфе предлагается модель КП и базовые гипотезы для ее описания. В § 3 речь шла только об анализе тех шагов, на которых игроки не меняли своих действий с заданной погрешностью. Здесь предлагается модель, в которой КП только часть более сложного поведения, и нужно понять, когда игрок переходит к ней и когда уходит от нее.

Базовая идея сложного поведения игрока состоит в том, что оно может быть разбито на два режима: наблюдение и выбор. В режиме наблюдения игрок не меняет (с заданной погрешностью) свое действие в течение нескольких шагов (собственно, проявляет КП), а в режиме выбора он выбирает следующее действие. В этом случае игрок должен иметь, как минимум, два принципа принятия решения: *принцип окончания КП* и *принцип выбора действия*; т. е. предполагаем, что игрок действует таким образом:

- на первом шаге выбирает свое первое действие с помощью принципа выбора действия;
- на втором шаге применяет принцип окончания КП; если он сработал, то опять выбирает действие с помощью принципа выбора действия, если

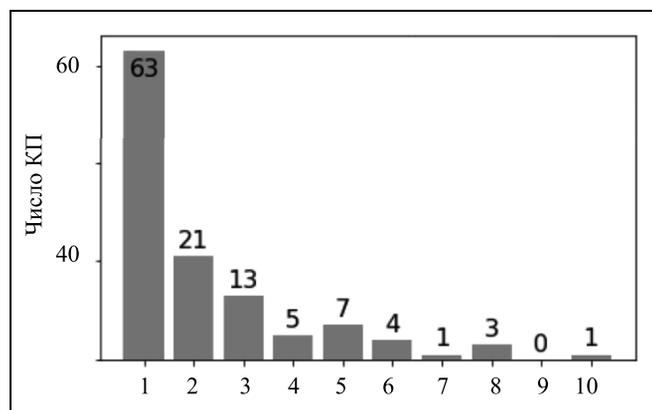


Рис. 3. Гистограмма длин КП

он не сработал — меняет свое действие случайно в рамках заданной погрешности КП;

— остальные шаги аналогичны второму шагу.

Принцип выбора действия в данной работе не рассматривается. Для принципа окончания КП было предложено несколько гипотез: Г1 — фиксированное число шагов; Г2 — случайное число шагов; Г3 — уменьшение выигрыша; Г4 — уменьшение выигрыша ниже заданного порога.

Заметим, что гипотезы Г2 и Г4 в каком-то смысле уточняют гипотезы Г1 и Г3.

В работе [24] показано, что гипотеза Г1 не верна, гипотеза Г2 кажется правдоподобной (но не была доказана статистически), а также гипотеза Г3 для КП с погрешностью 0 кажется правдоподобна. На рис. 3 представлена гистограмма длин КП.

Статистически гипотеза Г2 действительно верна. Мы подобрали визуально, что логарифмическое распределение $\text{Log}(p)$ хорошо описывает распределение длин КП, метод максимального правдоподобия позволил найти оптимальный параметр распределения $p \approx 0,7646$. Далее для проверки гипотезы, что эмпирическое распределение совпадает с логарифмическим (по критерию согласия Пирсона, см., например, книгу [24]), длины КП были сгруппированы в 5 групп ($\{L = 2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6 \text{ и более}\}$), чтобы в каждой группе ожидаемое и наблюдаемое число реализаций было не меньше 5. Тест Σ^2 с уровнем значимости 0,05 и степенью свободы 3 ($5 - 1 - 1$ (число параметров теоретического распределения)) показал значение статистики $\approx 1,844$, что меньше расчетного значения 11,07, а p -критерий $\approx 0,61$. Таким образом, гипотеза, что распределение длин КП имеет логарифмическое распределение, не может быть отвергнута.

Обозначим через $g_i(\tau)$ — выигрыш игрока i на шаге τ . Для проверки гипотезы Г3 примем, что различие выигрышей игрока в начале и в конце КП отражается на различии усредненных выигрышей первой и второй половины КП. Поэтому разделим каждое константное поведение $i(i, t_s, t_e, \varepsilon)$ и его первый шаг t_s на первую половину M_1 и вторую M_2 и возьмем от них средние:

$$h = \left\lfloor \frac{t_e - t_s + 1}{2} \right\rfloor, \quad H = \left\lceil \frac{t_e - t_s + 1}{2} \right\rceil + 1,$$

$$M_1 = \{\overline{g_i(t_s, h)} \mid \forall (i, t_s, t_e, \varepsilon) \in C(\varepsilon)\},$$

$$M_2 = \{\overline{g_i(H, t_e)} \mid \forall (i, t_s, t_e, \varepsilon) \in C(\varepsilon)\},$$

$$M = \{\overline{g_i(t_s, h)} - \overline{g_i(H, t_e)} \mid \forall (i, t_s, t_e, \varepsilon) \in C(\varepsilon)\},$$

где $g_i(a, b) = \{g_i(\tau) \mid a \leq \tau \leq b\}$.

Говоря по-простому, если во множестве M больше положительных, чем отрицательных элементов, то в первой половине большинства КП сред-

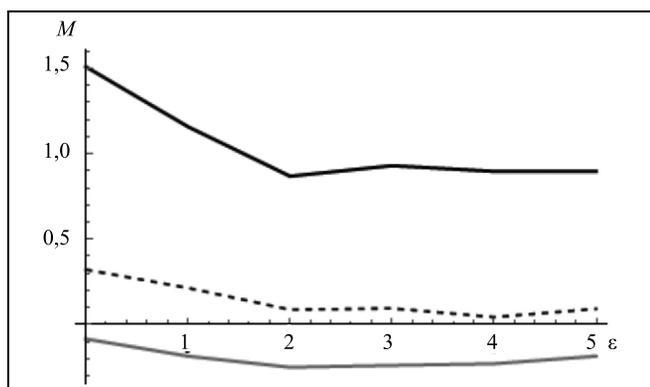


Рис. 4. Квантили и медиана для множества M : 0,25-квантиль (серая линия); медиана (пунктирная линия); 0,75-квантиль (черная линия)

ний выигрыш игроков был больше, чем во второй, поэтому, мы не отвергаем гипотезу Г3.

На рис. 4 представлены линии 0,25- и 0,75-квантилей и медиана для множества M . Видно, что для $\varepsilon > 0$ медиана близка к нулю, хотя нижний квартиль примерно в 4 раза меньше верхнего по абсолютной величине. В случае $\varepsilon = 0$ даже нижний квартиль почти равен нулю, что говорит о заметном падении выигрыша в этом случае.

Статистический U-критерий Манна — Уитни для всех ε подтверждает нулевую гипотезу, что M_2 меньше, чем M_1 при уровне значимости 0,05. Таким образом, даже в целом, если рассматривать M_1 и M_2 как независимые выборки, нельзя отвергнуть гипотезу, что $M_2 < M_1$. Но на самом деле от каждого КП в M_1 и M_2 идут средние первой и второй половины, соответственно, поэтому это не независимые выборки. Поэтому мы применили критерий Уилкоксона для связанных выборок (см., например,

книгу [25]), который при таком же уровне значимости 0,05 подтверждает нулевую гипотезу, что среднее значение выигрыша в КП меньше во второй его половине (значения в M_2 меньше соответствующих им значений из M_1).

С гипотезой Г4 в работе [24] была допущена ошибка, после устранения которой она кажется правдоподобной. Будем считать, что КП имеет нижний порог δ_τ по выигрышу, с периодом $\tau > 0$, если только в конце КП наблюдаются выигрыши меньше δ_τ в течение τ шагов; формально:

$$\forall t > t_\delta = t_e - \tau: g_i(t) < \delta_\tau, \quad (4)$$

$$\forall [k_s, k_e] \subset [t_s, t_e - \tau]:$$

$$(\forall t \in [k_s, k_e]: g_i(t) < \delta_\tau) \Rightarrow (k_e - k_s - 1 < \tau). \quad (5)$$

Практически, для заданного извне периода τ , кандидатом на нижний порог по выигрышу КП будем брать значение $\delta_\tau = \max(g(t_e - (\tau - 1)), \dots, g(t_e))$ и проверять его на выполнение условий (4)–(5). Важно заметить, что нижний порог в гипотезе Г4 не одинаков для всех КП — в каждом КП он может быть разным.

На рис. 5, а показан график доли КП в множестве $S(0)$, имеющих нижний порог по выигрышу в соответствии с выражениями (4)–(5) в зависимости от заданного периода. При расчете доли рассматриваются только КП с длиной больше, чем заданный период (рис. 5, б).

Гипотеза Г4 выглядит правдоподобно — число КП, имеющих нижний порог по выигрышу, колеблется от 60 до 90 % для значений периода от 1 до 5. Сами значения порогов представлены на рис. 6 в форме гистограммы.

Таким образом, не подтвердилась гипотеза Г1, статистически верна гипотеза Г2, расширяющая гипотезу Г1. Также статистически верна гипотеза

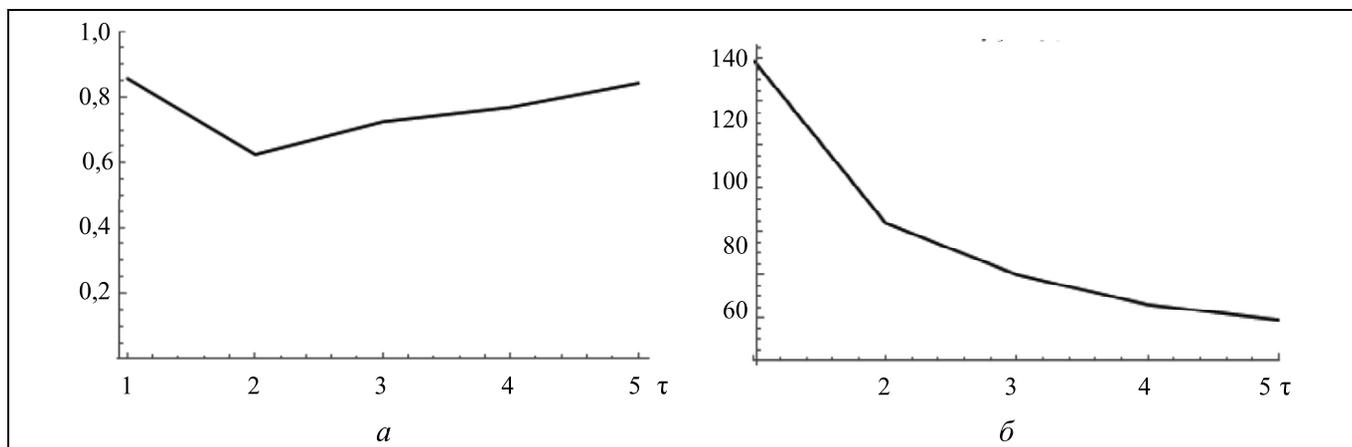


Рис. 5. Доля КП, имеющих порог по выигрышу в множестве $S(0)$ (а) и число КП, длина которых больше заданного периода (б)

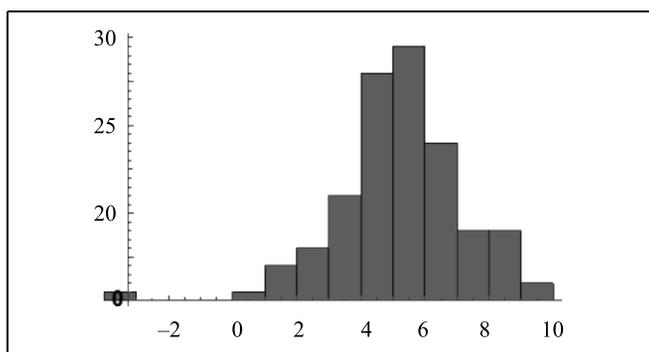


Рис. 6. Гистограмма порогов по выигрышу для периода 1

Г3 и выглядит правдоподобно гипотеза Г4. При этом гипотезы Г2 и Г4 позволяют (в отличие от гипотезы Г3) построить модель принципа окончания КП: в гипотезе Г2 игрок выбирает длину КП как значение реализации случайной величины, в гипотезе Г4 игрок выбирает сначала порог по выигрышу и период, затем, если в течение выбранного периода получаемый выигрыш меньше порога, то игрок заканчивает режим наблюдения. Для второго случая открытым остается вопрос о том, как игрок выбирает порог и период для КП.

В § 5 также проводится попытка построить модель принципа окончания КП, но только с помощью другого подхода — задачи классификации.

5. ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИ КОНСТАНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ С РЕЖИМАМИ

В связи с разделением поведения игрока на «режимы», для выхода из режима наблюдения игрок может на основании доступной ему информации в игре (полученный ресурс, выигрыш, штраф, число шагов и т. п.) принять решение об окончании КП или его продолжении. Причем, из имеющихся данных нам известен выбор игроков (завершить/продолжить КП), но неизвестны точно признаки (информация), на основе которых они принимают решение и сама модель выбора.

Задача построения правила для отнесения набора признаков к одному из решений (завершить/продолжить КП) на основе имеющихся данных (набор признаков, решение) относится к задаче классификации, рассматриваемой среди задач машинного обучения [25], в области машинного обучения также есть задача отбора признаков по их информативности. Мы воспользуемся методом случайных лесов как для отбора признаков, так и для построения классификатора. Этот метод, вероятно, не лучший, но с его помощью попробуем провести начальный анализ.

Простыми словами, для рассматриваемой задачи классификатор — это функция, которая преоб-

разует набор признаков на входе (например, действие, полученный ресурс и выигрыш на прошлом шаге) в выбор игрока на текущем шаге. Эффективность построенного классификатора оценивается как доля посчитанных классификатором решений игроков, которые совпали с реальными решениями игроков в игре. Информативность признака оценивается как вклад в эффективность, который дает признак, если его учитывать при построении классификатора по сравнению с классификатором, не использующим данный признак.

Рассмотрим набор признаков w_1 на основе доступных игроку данных: выигрыши $g_i(t)$, штрафы $p_i(t)$, получаемый ресурс $x_i(t)$ и их изменение на текущем шаге и на предыдущих (вплоть до трех шагов назад): $\Delta g_i(t) = g_i(t) - g_i(t-1)$, $\Delta p_i(t) = p_i(t) - p_i(t-1)$, $\Delta x_i(t) = x_i(t) - x_i(t-1)$, $\Delta g_i(t-1)$, $\Delta p_i(t-1)$, $\Delta x_i(t-1)$, $\Delta g_i(t-2)$, $\Delta p_i(t-2)$, $\Delta x_i(t-2)$. Ранее мы, зная начало каждого КП, пытались построить классификатор, который бы по этим признакам отвечал на вопрос — был ли прошлый шаг началом очередного КП или, другими словами, будет ли действие игрока на следующем шаге равно предыдущему действию или нет? Точнее, пусть множество P_1 содержит только шаги игр, начиная с 4-го (для расчета, например, $\Delta g_i(t-2)$) и заканчивая предпоследним шагом в игре (чтобы всегда знать действия игрока на следующем шаге), которые либо не принадлежат ни одному КП, либо являются первым шагом какого-то КП. Для построения классификатора брались признаки w_1 для каждого шага $t \in P_1$ и выбор игрока на шаге $(t+1)$ — продолжать или нет КП.

В работе [24] представлены результаты построения такого классификатора и оценок информативности этих признаков для классификации. Оказалось, что эффективность классификаторов низка, как и информативность признаков. Причем была попытка улучшить классификатор с помощью различных модификаций признаков (например, вместо прироста брать точное значение на прошлом шаге, стандартизация признаков, расчет полного ресурса (тип + ресурс) игроков и т. п.).

Попробуем провести подобную же классификацию на других исходных данных: множество P_2 содержит шаги всех КП и первый шаг после каждого КП, если он есть (игра не закончилась на КП). Набор признаков w_1 оставляем тем же. Эти данные содержат в себе как шаги, после которых игроки решили продолжить КП, так и шаги, после которых прервали КП. Таким образом, можно пытаться понять, на какие признаки игроки опирались при принятии этих решений об окончании КП.

Отбор признаков на основе алгоритма «случайного леса» [26] выявил три признака, выделяющиеся информативностью: прирост штрафа, прирост ресурса и прирост выигрыша на предыдущем шаге (рис. 7).

Построенный по алгоритму «случайного леса» классификатор на этих трех признаках дает точность классификации приблизительно 75 % на тестовой выборке. При этом для двух наиболее информативных признаков данные неплохо разделены на плоскости (рис. 8): черные точки — признаки, после которых КП продолжается, серые — КП прерывается. Шаги, продолжающие КП, находятся в областях, где $\Delta x(t) \cdot \Delta p(t) < 0$, а больше половины шагов, прерывающих КП, находятся в противоположных областях.

При попытке построить классификатор на шагах множества P_1 мы скорее пытались найти принцип «начала наблюдения» в КП, а не принцип окончания наблюдения. Данные результаты гово-

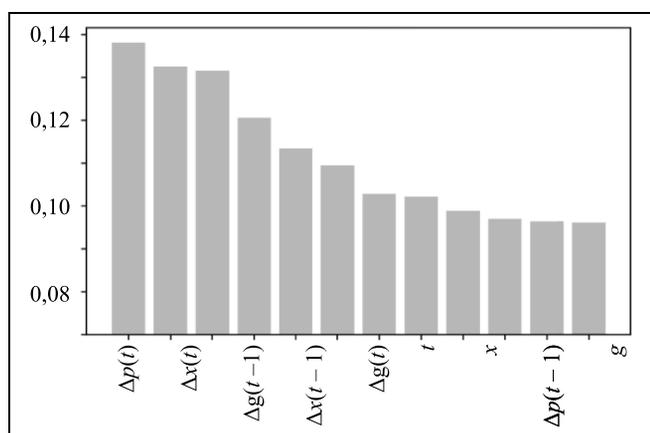


Рис. 7. Информативность признаков

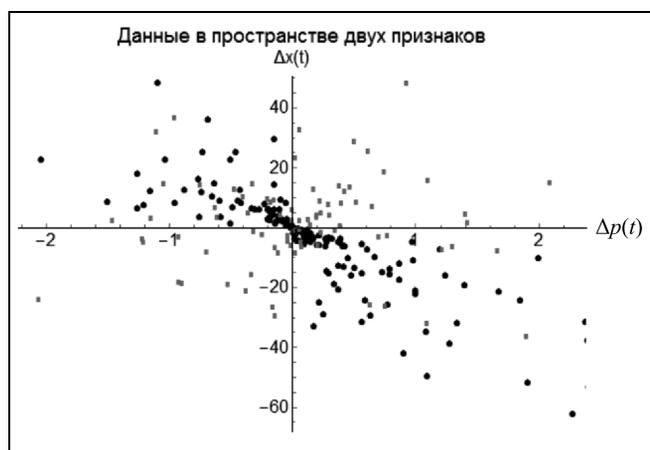


Рис. 8. Данные шагов в пространстве двух наиболее информативных признаков

рят, что, прежде всего, у игроков есть не только принцип окончания наблюдения, но и, видимо, принцип старта наблюдения, поскольку один и тот же подход к классификации дал разные результаты для первых (см. работу [24]) и последних шагов КП, а также, что принцип окончания наблюдения может основываться на небольшом числе признаков «прирост штрафа», «прирост ресурса» и «прирост выигрыша на прошлом шаге».

Дальнейшее уточнение этих результатов может идти в сторону отбора лучших признаков, так как случайные деревья снижают информированность коррелированных признаков, или в сторону применения методов выделения признаков (сокращения размерности данных).

6. ОБСУЖДЕНИЕ

В § 2 и 3 показано, что КП занимает важную долю в поведении игроков, но в то же время сильно зависит от дизайна игры и, что оказалось побочным результатом, менее сильно от применяемого механизма.

Далее в работе введена сложная модель поведения с двумя режимами: наблюдение (КП) и выбор, исследования пока проведены только для режима «наблюдение», предполагается, что режим «выбор» может быть взят из известных моделей поведения. Автор благодарен рецензенту за вопрос об исследовании содержательности модели КП с помощью анкетных данных. В анкетах было текстовое поле о принципах принятия решений, но игроки могли игнорировать его, вводя, например, «1». В этом поле можно найти ответы типа «Выбрав определенную заявку, которая дает удовлетворительный результат, пытался сохранить ее, отклоняясь незначительно в стороны», но даже этот игрок давал такие заявки: «40, 40, 45, 45, 70, 45, 50, 50, 55, 60, 50, 45, 30, 25, 35» и т. д.; т. е. у игрока может и была «определенная» заявка, но он, видимо, руководствовался чем-то еще, меняя в таких пределах свою заявку. В его действиях только несколько КП с погрешностью 0 (а в работе мы исследовали в основном ее), остальные, как минимум, с погрешностью 5. В будущем можно поставить в анкетах обязательный вопрос, связанный (не)явно с КП.

В § 4 проведен анализ гипотез, которые помогают понять характер КП. Статистически верны оказались гипотезы случайной длины КП и падения выигрыша в КП. Более сложная гипотеза о нижнем пороге выигрыша, после которого игрок прекращает КП, пока не доказана, но выглядит правдоподобной.

В § 5 представлены результаты другого, может быть, более прямого подхода к поиску модели поведения. Сделаны попытки отбора признаков и построения классификаторов, эффективно пред-

сказывающих выбор игроков: продолжать или нет КП. Результаты этого исследования дали идею усложнения модели поведения — у игрока есть не только принцип окончания наблюдения, но и принцип начала наблюдения, причем последний, возможно, основан на случайной модели, так как задача отбора признаков и построения классификатора дали неэффективное решение, в отличие от аналогичных попыток для поиска принципа окончания наблюдения. Интересно, что в близкой модели I-SAW, можно сказать, применяется похожий подход. При классификации есть отдельные задачи отбора и выделения признаков, при выделении создается новый признак на основе данных признаков, а при отборе просто берутся лучшие признаки из данных. Авторы модели I-SAW выделили из данных признак «сюрприз» и на основании этого признака предложили вероятностный классификатор, который позволяет модели переходить в режим «инерция». Возможно, эта работа выполнена с помощью подходов машинного обучения, а может быть, экспертным путем, в настоящей же статье похожий режим строится явно с помощью подходов машинного обучения (метод случайных лесов).

Интересно, как гипотеза о нижнем пороге по выигрышу (см. § 4), согласуется с наиболее информативными признаками, обнаруженными в § 5. Там прирост по выигрышу на прошлом шаге попал в тройку самых информативных признаков. В дальнейшем гипотеза наличия нижнего порога по выигрышу также может учитываться при отборе признаков — при классификации можно добавить новый признак «нижний порог», только пока неясно технически, как строить уровень нижнего порога на основании предыстории игры для конкретного шага.

Другое направление этих исследований — это работа не на полной совокупности данных, а на неких «удобных» подмножествах. Поскольку после некоторых игр проводилось также анкетирование игроков в целях выявления мотивов поведения, оказалось, что анкетные данные указывают на разнообразие мотивов поведения. Это наталкивает на мысль анализировать поведение не всех игроков в целом, а только групп игроков с похожими мотивами (анкетными данными) или с похожим поведением (кластеризация данных игр). Таким образом, можно выполнить ту же работу, что и в § 4 и 5, но при этом брать подмножества исходных данных только для игроков с близкими мотивами. Можно поставить также более сложную задачу — выделить части данных, которые эффективно классифицируются.

И конечно, вторая по важности задача состоит в построении модели принципа выбора действия игроками в КП. Только решив ее, можно постро-

ить полную модель поведения игроков для полученных данных игр распределения ресурса. Для решения этой задачи можно воспользоваться регрессионным анализом или известными моделями поведения из экспериментальной экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты двухстороннего исследования КП игроков. Предложен ряд статистических гипотез, сделаны попытки классификации начала и окончания КП. Описанные подходы могут пролить свет на это явление, с точки зрения моделей случайных величин и моделей принятия решений, основанных на информации об истории игрока. За рамками работы остаются пока причины такого поведения: усталость, непонимание, ожидание ответных реакций оппонентов, забывчивость (recency [6]) и т. п.

В литературе встречаются похожие модели, в дальнейшем логичным шагом было бы встраивание построенного классификатора на место режима «инерция» в модель I-SAW [18] и сравнение эффективности исходной и модифицированной модели I-SAW.

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за содержательные и ценные замечания. С их помощью в статью вошли уточнения описания экспериментов и сравнения с существующими моделями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korgin, N.A., Korepanov, V.O. An Efficient Solution of the Resource Allotment Problem with the Groves — Ledyard Mechanism under Transferable Utility // Automation and Remote Control. — 2016. — Vol. 77, no. 5. — P. 914—942.
2. Yang, S., Hajek, B. Revenue and stability of a mechanism for efficient allocation of a divisible good. Working paper, University of Illinois at Urbana-Champaign (2006).
3. Korgin, N.A., Korepanov, V.O. Experimental Gaming Analysis of ADMM Dynamic Distributed Optimization Algorithm // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, iss. 12. — P. 574—579.
4. Korgin, N.A., Korepanov, V.O. Experimental and Theoretical Comparison of Several Resource Allocation Mechanisms // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — Vol. 50, iss. 1. 2017. — P. 15592—15597. Online publication date: 1, Jul. 2017.
5. Nachbar, J. Learning in Games / Encyclopedia of Complexity and Systems Science. — N.-Y.: Springer, 2009. — P. 5177—5188.
6. Fudenberg, D., Levine, D.K. Whither Game Theory? Towards a Theory of Learning in Games // Journal of Economic Perspectives. — 2016. — Vol. 30, no. 4. — P. 151—170.
7. Корепанов В.О. Модели поведения игроков в экспериментальной теории игр / Матер. 14-й Всерос. школы-конф. молодых ученых «Управление большими системами» (УБС—2017, Москва). — Пермь: Пермский нац. исслед. политехн. ун-т, 2017. — С. 14—22. [Korepanov, V.O. Models of players behavior in experimental game theory / Contributions of 14th Russian School-Conference of young scientists «Control of big systems». — Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2017. — P. 14—22. (In Russian)]



8. *Cournot, A.A.* Recherches sur les Principes Mathematiques de la Theorie de Richesses, 1838. Translated by N.T. Bacon: Researches into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth. — London: Hafner, 1960.
9. *Brown, G.W.* Iterative Solution of Games by Fictitious Play // Activity Analysis of Production and Allocation. — 1951. — Vol. 13, no. 1. — P. 374—376.
10. *Robinson, J.* An Iterative Method of Solving a Game // Annals of Mathematics. — 1951. — P. 296—301.
11. *Cheung, Y.W., Friedman, D.* Individual Learning in Normal Form Games: Some Laboratory Results // Games and Economic Behavior. — 1997. — Vol. 19, no. 1. — P. 46—76.
12. *Fudenberg, D., Levine, D.K.* The Theory of Learning in Games. — MIT Press, 1998. — Vol. 2.
13. *Healy, P.J.* Learning Dynamics for Mechanism Design: An Experimental Comparison of Public Goods Mechanisms // Journal of Economic Theory. — 2006. — Vol. 129, no. 1. — P. 114—149.
14. *Chen, Y., Tang, F.F.* Learning and Incentive-Compatible Mechanisms for Public Goods Provision: An Experimental Study // Journal of Political Economy. — 1998. — Vol. 106, no. 3. — P. 633—662.
15. *Roth, A.E., Erev, I.* Learning in Extensive-Form Games: Experimental Data and Simple Dynamic Models in the Intermediate Term // Games and Economic Behavior. — 1995. — Vol. 8, no. 1. — P. 164—212.
16. *Camerer, C., Ho, T.H.* Experience Weighted Attraction Learning in Normal Form Games // Econometrica. — 1999. — Vol. 67, no. 4. — P. 827—874.
17. *Arifovic J., Ledyard, J.* A Behavioral Model for Mechanism Design: Individual Evolutionary Learning // Journal of Economic Behavior & Organization. — 2011. — Vol. 78, no. 3. — P. 374—395.
18. *Nevo, I., Erev, I.* On Surprise, Change, and the Effect of Recent Outcomes // Frontiers in Psychology. — 2012. — Vol. 3. — P. 24.
19. *Camerer, C.F., Ho, T.H., Chong, J.K.* Sophisticated Experience-Weighted Attraction Learning and Strategic Teaching in Repeated Games // Journal of Economic Theory. — 2002. — Vol. 104, no. 1. — P. 137—188.
20. *Moffatt, P.G.* Experimentics: Econometrics for Experimental Economics. — Macmillan International Higher Education, 2015.
21. *Fischbacher, U.* Z-Tree — Zurich Toolbox for Ready-Made Economic Experiments // Experimental Economics. — 2007. — Vol. 10, no. 2. — P. 171—178.
22. *Plott, C.R., Smith, V.L.* (Eds.). Handbook of experimental economics results. Vol. 1. — Elsevier, 2008.
23. *Cassar, A., Friedman, D.* Economics Lab: An Intensive Course in Experimental Economics. — Routledge, 2004.
24. *Корепанов В.О., Коргин Н.А.* Причины константного поведения игроков в экспериментальных играх распределения ресурса // Тезисы XIX Апрельской междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. Москва: ВШЭ (в печати). [Korepanov, V.O., Korgin, N.A. The reasons for the constant behavior of players in experimental resource allocation games // Collected Abstracts of XIX April International Academic Conference On Economic and Social Development. Moscow: National Research University Higher School of Economics, 2018. (In Russian)]
25. *Тюрин Ю.Н., Макаров А.А.* Статистический анализ данных на компьютере. — М.: Инфра-М, 1998. — 528 с. [Tyurin, Y.N., Makarov, A.A. Statistical analysis of data on a computer. — Moscow: Infra-M, 1998. — 528 p. (In Russian)]
26. *Rashka, S.* Python Machine Learning. — Birmingham, UK: Packt Publishing, 2015. — 454 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Поступила в редакцию 18.01.2019, после доработки 5.03.2020.
Принята к публикации 18.04.2020.

Корепанов Всеволод Олегович — канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ vkorepanov@ipu.ru.

CONSTANT BEHAVIOR IN RESOURCE ALLOCATION GAMES: RESISTANCE TO THE GAME DESIGN, AND THE MODEL

V.O. Korepanov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ vkorepanov@ipu.ru

Abstract. In the conducted resource allocation games, «constant» behavior (CB) of the players was found when the players do not change their bids during several steps of the game. A feature of the game data is that the CB occupies a large share in them. A modified design of the games is proposed, where payments are made for each of the five game steps and the interface does not allow the player to easily enter an unaltered bid. The results of games with modified design showed that the share of CB has decreased, but remains at a fairly high level. The following are the results of a search for the causes of this behavior using statistical hypotheses and solving problems of classifying decisions of players. Among the statistical hypotheses, those are accepted about the random nature of CB and CB stopping in case of payoffs decrease. The classification task allows selecting informative features (parameters and game history) and the rule of decision-making by players (classifier) to stop the CB on the features basis. The results of constructing the classifier gave the idea of complicating the model: the player has not only the principle of stopping/continuing CB, but also the principle of starting CB. It is also shown that the results of statistical research and classification have common features and can further complement each other.

Keywords: business games, experimental economics, behavior models, resource allocation task.

Funding. The work was performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research, grant no. 17-07-01550 A.

Acknowledgments. The author thanks the reviewers for their informative and valuable comments. With their help, refinements to the description of experiments and comparisons with existing models were included in the article.

ТРОИЧНЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

Д.В. Ефанов

Аннотация. Обсуждены особенности защиты данных, представленных в троичной форме. Подчеркнута актуальность применения троичной логики в будущем для решения задач разработки надежных цифровых устройств и систем. Описан троичный код с суммированием, обнаруживающий любые монотонные и асимметричные ошибки в информационных векторах, применение которого перспективно при построении устройств и систем с обнаружением неисправностей. Отмечено, что принципы построения троичного кода с суммированием аналогичны принципам построения классических двоичных кодов с суммированием (кодов Бергера). Установлены ранее неизвестные свойства троичных кодов с суммированием на случай возникновения ошибок только в информационных векторах при безошибочности контрольных разрядов. Показано, что такая задача актуальна в практических приложениях, в которых разряды контрольных и информационных векторов вычисляются физически различными устройствами. Указано, что учет установленных свойств троичных кодов с суммированием может быть полезен при выборе способа защиты как самих данных, так и парирования возникающих в устройствах автоматики неисправностей.

Ключевые слова: троичная логика, троичная техника, контроль вычислений, защита данных, троичный код с суммированием, код Бергера, необнаруживаемая ошибка, характеристики обнаружения ошибок.

ВВЕДЕНИЕ

Современные цифровые устройства и системы работают в двоичной логике. Тем не менее, во всем мире велись и ведутся исследования в области построения и применения устройств и систем, работающих в троичной логике [1–7]. Во многих источниках отмечаются преимущества троичной логики в более плотной записи чисел и возможностях ее применения.

Устройства, работающие в троичной логике, были построены еще во второй половине прошлого столетия [1]. Известны и современные реализации устройств, работающие на аналогичных принципах [8]. Некоторые исследователи отмечают преимущества троичной логики по сравнению с двоичной при реализации квантовых компьютеров [9]. Указанные примеры подчеркивают актуальность исследований в области применения троичной логики при построении цифровых устройств и систем.

Широко известно, что при построении современных надежных и безопасных устройств и систем автоматизации применяются методы избыточного кодирования, резервирования, диверсифицирования как аппаратных, так и программных средств и многие другие [10–14]. Все эти методы применяются на различных уровнях архитектуры устройств и систем (и на микроуровне при использовании высоконадежной элементной базы, и на макроуровне при обеспечении надежности систем при передаче данных между компонентами и объектами управления). Применяют избыточное кодирование и при решении задач синтеза контролепригодных цифровых устройств и систем и технических средств их диагностирования [15–17]. В подобных приложениях часто применяются коды, ориентированные на обнаружение ошибок, а не на их исправление. Прежде всего, коды с исправлением ошибок имеют несколько большую избыточность, чем коды с обнаружением ошибок [18]. Кроме того, исправление ошибок в аппаратных средствах может приводить к их накоплению и



последующему критическому отказу системы. Повсеместно применяются равновесные коды, разнообразны коды с суммированием и коды с проверками четности значений разрядов [19, 20].

В настоящей статье внимание сконцентрировано на изложении результатов исследования автора в области построения троичных избыточных кодов, предназначенных для решения задач синтеза контролепригодных цифровых устройств и систем и изучения их характеристик. Автором поставлена задача построения троичных кодов с суммированием, обнаруживающих любые монотонные и асимметричные ошибки в информационных векторах, а также установления их основных характеристик, учет которых целесообразно вести при синтезе надежных и безопасных устройств и систем, функционирующих в троичной логике. Особенности же процедур синтеза самих цифровых устройств и систем с применением избыточных кодов (и, в частности, кодов с суммированием), также как и вопросы правильности обработки информации, в настоящей работе обойдены. Данные аспекты требуют глубоких исследований и отдельных публикаций, освещающих их результаты.

1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРОИЧНОГО КОДА С СУММИРОВАНИЕМ

Существует большое разнообразие способов построения троичных помехоустойчивых кодов [21–25].

При построении кода можно пойти несколькими путями. Один из них состоит в эвристическом составлении правил получения контрольных разрядов. Другой — в установлении первоначальных основных свойств «будущего» кода.

В троичной логике для представления сигналов используются три символа. Обозначим их как 0, 1 и 2 без привязки к виду троичной системы счисления (симметричная или несимметричная). Дальнейшие результаты связаны только с троичным представлением сигналов, но не с троичной логикой как таковой. Построим такой троичный код, который будет обнаруживать любые ошибки, связанные с нарушением числа разрядов, равных 1 и 2, в информационных векторах.

Ошибки в троичных кодовых векторах могут быть классифицированы в общем случае таким образом. Ошибки делятся на одиночные и многократные. Первый вид ошибок — это ошибки, связанные с одиночными искажениями в кодовых словах, второй — с одновременным возникновением искажений двух и более разрядов. В свою очередь, многократные ошибки в кодовых векторах троичной логики делятся на композиционные,

монотонные и асимметричные ошибки. *Композиционной* называется такая ошибка, при которой в искаженном кодовом векторе сохраняется число разрядов, равное 1 и 2 в искажаемом кодовом векторе (сохраняется «композиция» разрядов). Остальные искажения приводят к возникновению либо монотонных, либо асимметричных ошибок. Под *монотонной* ошибкой в троичном кодовом векторе понимается такая ошибка, при которой сохраняется приоритет значений, определенный в каждом из известных классов троичных монотонных функций [3]. Напомним читателю, что в троичной логике известно три класса монотонных функций (классы M_1 , M_2 и M_3). Класс M_1 — монотонные функции, для которых при сравнении аргументов принят порядок $0 < 1 < 2$. Класс M_2 — монотонные функции, для которых при сравнении аргументов принят порядок $1 < 2 < 0$. Класс M_3 — монотонные функции, для которых при сравнении аргументов принят порядок $2 < 0 < 1$. Монотонные ошибки в троичной логике могут быть классифицированы на подвиды (однаправленная, двунаправленная и др.). Ошибки с любыми другими видами искажений принадлежат к виду *асимметричных*. Такое разделение ошибок связано именно с особенностями их возникновения на выходах цифровых устройств и обнаружения с помощью избыточных кодов.

Построим такой троичный код, который будет обнаруживать любые монотонные и асимметричные ошибки. Такой код будет принадлежать к классу *MAED*-кодов (monotonous & asymmetrical error-detection codes). Коды из данного класса можно использовать при синтезе контролепригодных структур устройств, работающих в троичной логике, а также технических средств их диагностирования.

Троичный код, относящийся к классу кодов с обнаружением любых монотонных и асимметричных ошибок, строится следующим образом.

Алгоритм. *Правила определения значений разрядов контрольных векторов троичных кодов с суммированием:*

1. В информационном векторе длиной m определяется число разрядов, равных 1, и число разрядов, равных 2, — числа r_1 и r_2 соответственно.

2. Число r_1 представляется в троичном виде и записывается в $k_1 = \lceil \log_3(m + 1) \rceil$ старших разрядах контрольного вектора (запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения).

3. Число r_2 представляется в троичном виде и записывается в $k_2 = \lceil \log_3(m + 1) \rceil$ младших разрядах контрольного вектора.

Так как числа r_1 и r_2 определяются путем применения операций суммирования, назовем строящийся по представленному алгоритму код кодом с

Таблица 1

 Число контрольных разрядов в $\Sigma(m, k)$ -кодах

m	k
4	4
5	4
6	4
7	4
8	4
9	6
10	6
...	...
20	6
...	...
50	8
...	...
100	10

суммированием и обозначим как $\Sigma(m, k)$ -код, где $k = k_1 + k_2 = 2\lceil \log_3(m + 1) \rceil$ — число разрядов в контрольных векторах. В табл. 1 приведены значения числа k для $\Sigma(m, k)$ -кодов с различной длиной информационного вектора. Из таблицы следует, что имеет смысл строить $\Sigma(m, k)$ -коды для случаев $m > 4$ (в противном случае можно ограничиться применением троичных кодов с повторением, обнаруживающих любые ошибки в информационных векторах).

Приведем пример получения значений разрядов контрольного вектора для информационного вектора $\langle 01012121222 \rangle$. Длина информационного вектора $m = 11$. Отсюда следует, что числа $k_1 = k_2 = \lceil \log_3 12 \rceil = 3$, а $k = 6$. Числу $r_1 = 4$ соответствует троичный вектор $\langle 011 \rangle$. Числу $r_2 = 5$ соответствует троичный вектор $\langle 012 \rangle$. Таким образом, контрольный вектор $\Sigma(12, 6)$ -кода будет иметь вид $\langle 011012 \rangle$.

2. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ТРОИЧНЫХ КОДОВ С СУММИРОВАНИЕМ

Рассмотрим особенности обнаружения ошибок в информационных векторах $\Sigma(m, k)$ -кодами.

Прежде всего, отметим, что $\Sigma(m, k)$ -кодами, за исключением кодов с длинами информационных векторов $m = 3^p - 1$, $p \in \{2, 3, 4, \dots\}$, не используются все возможные комбинации разрядов в контрольных векторах. Назовем $\Sigma(m, k)$ -коды с длинами информационных векторов $m = 3^p - 1$, $p \in \{2, 3, 4, \dots\}$, совершенными троичными кодами с суммированием.

Утверждение 1. $\Sigma(m, k)$ -коды обнаруживают любые монотонные и асимметричные ошибки в информационных векторах и не обнаруживают любые композиционные ошибки. ♦

Справедливость утверждения 1 вытекает из принципов построения $\Sigma(m, k)$ -кода. Фактически информационные векторы при построении кода классифицируются на контрольные группы, соответствующие числам r_1 и r_2 ($r_1 - r_2$ группам), определяющие все информационные векторы с одной и той же композицией [26]. Ошибка будет необнаруживаемой в том случае, если она исказит информационный вектор, принадлежащий одной контрольной группе, в информационный вектор, принадлежащий той же контрольной группе. Такая ошибка не нарушает композиции значений и, как отмечено выше, является композиционной. Отсюда следует, что ошибки композиционного типа не могут быть обнаружены $\Sigma(m, k)$ -кодами. Если же ошибка переведет информационный вектор одной контрольной группы в информационный вектор другой контрольной группы, то она будет связана с нарушением композиции значений в информационном векторе. Такая ошибка будет обнаружена и будет принадлежать к типу монотонных или асимметричных ошибок.

Для определения характеристик обнаружения ошибок $\Sigma(m, k)$ -кодами целесообразно воспользоваться табличной формой задания кода, в которой все информационные векторы классифицируются по всем возможным $r_1 - r_2$ группам. Анализируя такие $r_1 - r_2$ группы, можно установить особенности обнаружения ошибок $\Sigma(m, k)$ -кодами. Для примера в табл. 2 задан $\Sigma(4, 4)$ -код (данный код, хоть и имеет двойную избыточность, выбран для иллюстрации особенностей троичных кодов с суммированием как код с наименьшей мощностью множества кодовых слов).

Таблица задания $\Sigma(4, 4)$ -кода включает в себя информационные векторы, разбитые на три категории. Первая из них включает в себя те, для которых разряды принимают только значения 0 и 1. Такие векторы помещены в группы $r_1 - 0$. Вторая категория информационных векторов включает в себя те из них, для которых разряды принимают только значения 0 и 2 и занимают группы $0 - r_2$. Третья категория включает в себя информационные векторы, значения разрядов в которых равны 0, 1 и 2. При этом в таблице для наглядности и выделения категорий векторов потребовалось сдвинуть все векторы, образованные из всех сочетаний значений 0 и 2, а также все векторы, образованные из всех сочетаний 0, 1 и 2 вниз внутри каждой контрольной группы. В результате такого сдвига и в результате того, что распределение векторов между контрольными группами неравномерно, в таблице появляется большое число пустых ячеек. Такое представление кода не только удобно с пози-

Распределение информационных векторов в контрольные группы $\Sigma(4, 4)$ -кода

Контрольные группы (r_1-r_2 группы)														
00-00	00-01	00-02	00-10	00-11	01-00	01-01	01-02	01-10	02-00	02-01	02-02	10-00	10-01	11-00
Информационные векторы														
0000					0001 0010 0100 1000				0011 0101 0110 1001 1010 1100			0111 1011 1101 1110		1111
	0002 0020 0200 2000	0022 0202 0220 2002 2020 2200	0222 2022 2202 2220	2222										
						0012 0021 0102 0120 0201 0210 1002 1020 1200 2001 2010 2100	0122 0212 0221 1022 1202 1220 2012 2021 2102 2120 2201 2210	1222 2122 2212 2221		0112 0121 0211 1012 1021 1102 1120 1201 1210 2011 2101 2110	1122 1212 1221 2112 2121 2211		1112 1121 1211 2111	

ций чтения таблицы, но и позволяет установить основные характеристики обнаружения ошибок $\Sigma(m, k)$ -кодами.

Отметим также, что можно отдельно рассматривать коды с суммированием, для которых используются только информационные векторы, входящие в одну из трех категорий информационных векторов — $\Sigma^1(m, k)$, $\Sigma^2(m, k)$ и $\Sigma^3(m, k)$ коды. Если, например, рассматривать $\Sigma^1(m, k)$ -код, соответствующий распределению информационных векторов только первой категории, то можно сказать, что построен классический двоичный код с суммированием (код Бергера) [27].

Утверждение 2. *Необнаруживаемые ошибки, происходящие в информационных векторах, входящих в r_1-0 и $0-r_2$ группы, могут иметь только четную кратность. ♦*

Формулировка утверждения 2 обосновывается следующими соображениями. Каждая r_1-r_2 группа для рассматриваемых случаев определяется только числом r_1 (или только числом r_2). Чтобы ошибка

была необнаруживаемой, она должна перевести информационные векторы конкретной контрольной группы друг в друга. В этом случае не должно нарушиться общее число разрядов, равных 1 (или равных 2). Это возможно только в том случае, если любое искажение 1 (или 2) будет скомпенсировано противоположным искажением нулевого разряда. Отсюда следует, что ошибка будет иметь только четную кратность.

Необнаруживаемые ошибки для контрольных групп, характеризующих информационные векторы третьей категории, могут иметь любую кратность $d \geq 2$.

Из табл. 2 следует способ подсчета числа необнаруживаемых $\Sigma(m, k)$ -кодом ошибок: необходимо определить для заданного значения m общее число информационных векторов, соответствующих каждой r_1-r_2 группе. Обозначим это число как Q_{r_0, r_1, r_2} , где r_0, r_1 и r_2 — число разрядов, равных 0, 1 и 2 соответственно. В табл. 3 приведены представители контрольных групп $\Sigma(4, 4)$ -кода. Число

информационных векторов, соответствующих каждой контрольной группе, можно определить по формуле:

$$Q_{r_0, r_1, r_2} = C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2} C_{m-(r_1+r_2)}^{r_0}, \quad (1)$$

где $C_m^{r_1}$ — число вариантов расположения разрядов, равных 1, в информационном векторе длины m ; $C_{m-r_1}^{r_2}$ — число вариантов расположения разрядов, равных 2, в оставшихся $m - r_1$ информационных разрядах; $C_{m-(r_1+r_2)}^{r_0}$ — число вариантов расположения разрядов, равных 0, в оставшихся $m - (r_1 + r_2)$ информационных разрядах.

Учитывая, что $m - (r_1 + r_2) = r_0$ и принимая во внимание, что $C_{r_0}^{r_0} = 1$, формулу (1) перепишем в виде $Q_{r_0, r_1, r_2} = C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2}$.

Таблица 3

 Представители контрольных групп $\Sigma(4,4)$ -кода

r_1-r_2 группа	Представители контрольных групп	Общее число представителей	Формула подсчета
00-00	0000	1	$C_4^0 C_4^0$
00-01	0002	4	$C_4^0 C_4^1$
00-02	0022	6	$C_4^0 C_4^2$
00-10	0222	4	$C_4^0 C_4^3$
00-11	2222	1	$C_4^0 C_4^4$
01-00	0001	4	$C_4^1 C_3^0$
01-01	0012	12	$C_4^1 C_3^1$
01-02	0122	12	$C_4^1 C_3^2$
01-10	1222	4	$C_4^1 C_3^3$
02-00	0011	6	$C_4^2 C_2^0$
02-01	0112	12	$C_4^2 C_2^1$
02-02	1122	6	$C_4^2 C_2^2$
10-00	0111	4	$C_4^3 C_1^0$
10-01	1112	4	$C_4^3 C_1^1$
11-00	1111	1	$C_4^4 C_0^0$

Тогда число необнаруживаемых ошибок в каждой контрольной группе будет определяться величиной $N_{r_0, r_1, r_2} = C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2} (C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2} - 1)$.

Общее же число необнаруживаемых ошибок равно сумме всех необнаруживаемых ошибок, «даваемых» каждой контрольной группой:

$$N_{m,k} = \sum_{r_1, r_2=0}^{r_1, r_2=m} N_{r_0, r_1, r_2} = \sum_{r_1=0}^{r_1=m} \left(\sum_{r_2=0}^{r_2=m} C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2} (C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2} - 1) \right). \quad (2)$$

Например, формула (2) для подсчета общего числа необнаруживаемых $\Sigma(4, 4)$ -кодом ошибок, дает результат: $N_{4,0,0} = 0$, $N_{3,0,1} = 12$, $N_{2,0,2} = 30$, $N_{1,0,3} = 12$, $N_{0,0,4} = 0$, $N_{3,1,0} = 12$, $N_{2,1,1} = 132$, $N_{1,1,2} = 132$, $N_{0,1,3} = 12$, $N_{2,2,0} = 30$, $N_{1,2,1} = 132$, $N_{0,2,2} = 30$, $N_{1,3,0} = 12$, $N_{0,3,1} = 12$, $N_{0,4,0} = 0$. Суммируя полученные числа, получаем: $N_{4,4} = 558$.

С увеличением длины информационного вектора на единицу увеличивается и число контрольных групп (представителей контрольных групп). Причем прослеживается такая закономерность: в группе 00—00 всегда присутствует один вектор, в группах 00— $r_2 - m$, 01— $r_2 - m$, 02— $r_2 - m - 1$, 11— $r_2 - m - 2$, ..., $r_1 - 00 - 1$ векторов. Исходя из этого, общее число контрольных групп (и различных композиций) определяется по формуле:

$$R_m = 1 + m + m + (m - 1) + (m - 2) + \dots + 2 + 1 = m + 1 + \frac{m(m+1)}{2} = \frac{m^2 + 3m + 2}{2}.$$

Например, для рассматриваемого $\Sigma(4,4)$ -кода $R_4 = \frac{4^2 + 3 \cdot 4 + 2}{2} = 15$.

В табл. 4 приведены рассчитанные значения числа R_m для различных $\Sigma(m, k)$ -кодов.

Введем в рассмотрение относительные показатели обнаружения ошибок $\Sigma(m, k)$ -кодами.

Общее число ошибок, которые могут возникнуть в информационных векторах троичных кодов, равно [28]: $N_m = 3^m(3^m - 1)$.

Показатель $\gamma_{m,k}$ позволяет сравнивать число необнаруживаемых кодами ошибок с общим возможным их числом:

$$\gamma_{m,k} = \frac{N_{m,k}}{N_m} \cdot 100 \%. \quad (3)$$



Таблица 4

Числа R_m для различных $\Sigma(m, k)$ -кодов

m	R_m
4	15
5	21
6	28
7	36
8	45
9	55
10	66
...	...
20	231
...	...
50	1326
...	...
100	5151

Чем ближе значение $\gamma_{m,k}$ к значению 0 %, тем больше ошибок обнаруживает рассматриваемый код.

Как показано в работе [28], существует такой троичный разделимый код, который обладает равномерным распределением информационных векторов на контрольные группы. Такой код обладает очень важной особенностью.

Теорема 1. *Троичный код с параметрами m и k обладает минимальным общим количеством необнаруживаемых ошибок при условии, что все 3^m информационных вектора равномерно распределены между всеми 3^k контрольными векторами, а общее число необнаруживаемых ошибок в таком коде определяется по формуле*

$$N_{m,k}^{\min} = 3^m(3^{m-k} - 1). \blacklozenge$$

Таким образом, любой разделимый код, в том числе $\Sigma(m, k)$ -код, можно сравнивать с кодом с равномерным распределением информационных векторов на контрольные группы:

$$\xi_{m,k} = \frac{N_{m,k}}{N_{m,k}^{\min}} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Показатель $\xi_{m,k}$ характеризует эффективность использования контрольных разрядов троичным разделимым кодом, чем ближе он к 100 %, тем эффективнее код обнаруживает ошибки.

Из сравнения формул (3) и (4) следует, что между коэффициентами $\gamma_{m,k}$ и $\xi_{m,k}$ имеется зависимость:

$$\xi_{m,k} = \gamma_{m,k} \frac{N_m}{N_{m,k}^{\min}} = \gamma_{m,k} \frac{3^m(3^m - 1)}{3^m(3^{m-k} - 1)} = \gamma_{m,k} \frac{3^m - 1}{3^{m-k} - 1}.$$

Тем не менее, далее обоими коэффициентами будем пользоваться наравне, так как они дают возможность наглядного представления о характеристиках $\Sigma(m, k)$ -кодов.

В табл. 5 представлены рассчитанные по приведенным выше формулам показатели $\Sigma(m, k)$ -кодов с малыми значениями длин информационных векторов. Графики зависимостей величин $\gamma_{m,k}$ и $\xi_{m,k}$ от m дополняют приведенные рассчитанные числа.

С увеличением длины информационного вектора доля необнаруживаемых ошибок от общего их числа уменьшается (рис. 1). Что касается эффективности использования контрольных разрядов (рис. 2), то с увеличением длины информационного вектора до величины $m = 3^p - 1$, $p \in \{2, 3, 4, \dots\}$, соответствующей значению длины информационного вектора совершенного $\Sigma(m, k)$ -кода,

Таблица 5

Характеристики обнаружения ошибок $\Sigma(m, k)$ -кодами

m	k	$N_{m,k}$	N_m	$N_{m,k}^{\min}$	$\gamma_{m,k}$	$\xi_{m,k}$
4	4	558	6 480	0	8,611	0
5	4	4 410	58 806	486	7,499	11,02
6	4	34 440	530 712	5 832	6,489	16,934
7	4	270 648	4 780 782	56 862	5,661	21,01
8	4	2 151 198	43 040 160	524 880	4,998	24,399
9	6	17 300 154	387 400 806	511 758	4,466	2,958
10	6	140 609 016	3 486 725 352	4 723 920	4,033	3,36
11	6	1 153 285 848	31 380 882 462	42 869 574	3,675	3,717
12	6	9 533 107 584	282 429 005 040	386 889 048	3,375	4,058
13	6	79 324 972 272	2 541 864 234 006	3 485 190 078	3,121	4,394
14	6	663 830 247 366	22 876 787 671 992	31 376 276 640	2,902	4,727
15	6	5 582 710 119 186	205 891 117 745 742	282 415 187 574	2,711	5,059


 Рис. 1. Зависимость коэффициента $\gamma_{m,k}$ от значения m

 Рис. 2. Зависимость коэффициента $\xi_{m,k}$ от значения m

происходит ее повышение. При достижении величины $m = 3^p$, $p \in \{2, 3, 4, \dots\}$, происходит резкое уменьшение значения коэффициента $\xi_{m,k}$, что объясняется увеличением числа контрольных разрядов на 2 и крайне большим числом неиспользуемых контрольных групп. Затем постепенно с увеличением длины информационного вектора растет число информационных векторов, заполняется большее число контрольных групп, значение коэффициента $\xi_{m,k}$ повышается.

Из рис. 1 и 2 следует, что $\Sigma(m, k)$ -коды не обнаруживают менее 10 % ошибок в информационных векторах при любой их длине. Более того, при $m \geq 8$ доля необнаруживаемых ошибок от общего их количества составляет менее 5 %. Тем не менее, контрольные разряды используются ими весьма неэффективно, о чем говорит график величины $\xi_{m,k}$: значения данного коэффициента не превышают 25 % для кодов с любыми значениями m .

Приведенные выше формулы, к сожалению, не дают возможности подсчета числа необнару-

живаемых $\Sigma(m, k)$ -кодами ошибок каждой кратностью. Для этого требуется детальный анализ задающих коды таблиц. Результаты такого анализа для $\Sigma(m, k)$ -кодов с малыми значениями длин информационных векторов представлены в табл. 6. Для каждого значения m приведены данные о числе необнаруживаемых ошибок данной кратностью d (верхнее число), общем числе ошибок данной кратностью (среднее число) и доле необнаруживаемых ошибок данной кратностью от общего количества ошибок данной кратностью — величине β_d % (нижнее число).

Расчеты показывают, что $\Sigma(m, k)$ -коды (как и их двоичные аналоги [29]) обладают интересной особенностью.

Теорема 2. Доля необнаруживаемых троичными кодами с суммированием ошибок кратностью d от общего числа ошибок данной кратностью не зависит от длины информационного вектора и является постоянной величиной. ♦

Таким образом, любые $\Sigma(m, k)$ -коды не обнаруживают 16,667 % двукратных ошибок, 5,556 % трехкратных ошибок, 6,944 % четырехкратных ошибок и т. д. Однако, следует отметить, что положение теоремы 2 является гипотезой, которая подтверждается расчетами, но к настоящему времени математически не доказана.

Сравнивая между собой двоичные и троичные коды с суммированием, отметим, что у троичных кодов с суммированием в классе необнаруживаемых имеются ошибки как четной, так и нечетной кратностью, а доли необнаруживаемых ошибок каждой кратностью d от общего числа ошибок

Таблица 6

 Характеристики обнаружения $\Sigma(m, k)$ -кодами ошибок по кратностям

m	d					
	1	2	3	4	5	6
3	0	54	12	—	—	—
	162	324	216	—	—	—
	0	16,667	5,556	—	—	—
4	0	324	144	90	—	—
	648	1 944	2592	296	—	—
	0	16,667	5,556	6,944	—	—
5	0	1 620	1080	1 350	360	—
	2430	9 720	19 440	19 440	7776	—
	0	16,667	5,556	6,944	4,63	—
6	0	7290	6480	12 150	6480	2040
	8748	43 740	116 640	174 960	139 968	466 56
	0	16,667	5,556	6,944	4,63	4,372



данной кратностью значительно ниже, чем у двоичных кодов с суммированием (к примеру, двоичные коды с суммированием не обнаруживают 50 % двукратных ошибок [29], а троичные — 16,667 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Троичные коды с суммированием, обнаруживающие любые монотонные и асимметричные ошибки, могут применяться при построении цифровых устройств и систем, работающих в троичной логике. Ими не обнаруживаются любые композиционные ошибки, которые, как установлено в настоящей статье, составляют для всех $\Sigma(m, k)$ -кодов с $m \geq 8$ менее 5 % от общего числа ошибок в информационных векторах. Если сравнивать троичный код с суммированием с двоичным [29], то можно отметить куда большее значение доли обнаруживаемых им ошибок.

Отметим некоторую особенность $\Sigma(m, k)$ -кода. Все возможные контрольные векторы ими используются только в частных случаях: для каждого значения k существует только одно значение длины информационного вектора $m = 3^p - 1$, $p \in \{2, 3, 4, \dots\}$, при которой формируются все возможные контрольные векторы. Все остальные значения длин информационных векторов не позволяют строить коды, для которых формируются все возможные контрольные векторы. Это усложняет задачу синтеза контролепригодных устройств на их основе, но может учитываться при построении иных троичных кодов, ориентированных на обнаружение ошибок в информационных векторах. Один из способов построения последних состоит в подсчете чисел r_1 и r_2 в кольце вычетов по модулю

$M \in \{3^1, 3^2, \dots, 3^{\lceil \log_3(m+1) \rceil - 1}\}$ и записи получаемых значений в разряды троичного контрольного вектора (аналог двоичных модульных кодов с суммированием [30, 31]). Например, перспективным является использование модульных кодов, для которых числа r_1 и r_2 подсчитываются в кольце вычетов по модулю $M = 9$. Число контрольных разрядов в таких троичных модульных кодах будет всегда равно $k = 4$, для них гораздо проще сформировать полное множество контрольных векторов, при этом будут обнаруживаться любые монотонные ошибки в информационных векторах кратностью $d_u < 9$. По этой причине их применение может оказаться также перспективным.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение особенностей различных модификаций $\Sigma(m, k)$ -кода, а также установление основных характеристик обнаружения ими ошибок в информационных векторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брусенцов Н.П., Маслов С.П., Розин В.П., Тишулина А.М. Малая цифровая вычислительная машина «Сетунь». — М.: Изд-во МГУ, 1962. — 140 с. [Brusentsov, N.P., Maslov, S.P., Rozin, V.P., Tishulina, A.M. Small digital computer «Setun». — Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1962. — 140 p. (in Russian)].
2. Merrill, R.D. Ternary Logic in Digital Computers // Proceedings of the SHARE design automation project (DAC'65). — ACM New York, NY, USA. — P. 6.1–6.17. — DOI: 10.1145/800266.810759.
3. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем. — М.: Энергия, 1974. — 368 с. [Pospelov, D.A. Logical Methods of Analysis and Synthesis of Circuits. — Moscow: Energy, 1974. — 368 p. (in Russian)].
4. Rahman, Md.R., Rise, J.E. On Designing a Ternary Reversible Circuit for Online Testability // IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. — 2011. — P. 1–7. — DOI: 10.1109/PACRIM.2011.6032878.
5. Nayeem, N.M., Rice, J.E. Design of an Online Testable Ternary Circuit from the Truth Table // Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS, vol. 7581): Reversible Computation, 4th International Workshop on Reversible Computation (RC 2012), Copenhagen, Denmark, July 2–3. — 2012. — P. 152–159.
6. Vudadha, C., Katragadda, S., Phaneendra, P.S. 2:1 Multiplexer Based Design for Ternary Logic Circuits // IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia), 19–21 December 2013, Visakhapatnam, India. — P. 46–51. — DOI: 10.1109/PrimeAsia.2013.6731176.
7. Nair, R.S.P., Smith, S.C., Di, J. Delay Insensitive Ternary CMOS Logic for Secure Hardware // Journal of Low Power Electronics and Applications. — 2015. — Iss. 5. — P. 183–215. — DOI: 10.3390/jlpea5030183.
8. Connely, J. Ternary Computing Testbed 3-Trit Computer Architecture. — California Polytechnic State University of San Luis Obispo, August 29th, 2008. — 184 p.
9. Lanyon, B.P., Barbieri, M., Almeida, M.P., et al. Simplifying Quantum Logic Using Higher-Dimensional Hilbert Spaces // Nature Physics. — 2009 — Vol. 5, iss. 2. — P. 134–140. — DOI: 10.1038/nphys1150.
10. Гавзов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. — 1994. — № 8. — С. 3–50. [Gavzov, D.V., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V. Methods for Providing Safety in Discrete Systems // Automation and Remote Control. — 1994. — Vol. 55, iss. 8. — P. 1085–1122].
11. Smith, D.J., Simpson, K.G.L. Functional Safety: A Straightforward Guide to IEC 61508 and Related Standards. — Butterworth-Heinemann, 1st edition (June 26, 2001). — 208 p.
12. Дрозд А.В., Харченко В.С., Антошук С.Г., и др. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / под ред. А.В. Дрозда и В.С. Харченко. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-тет им. Н.Е. Жуковского, 2012. — 614 с. [Drozd, A.V., Kharchenko, V.S., Antoshchuk, S.G., et al. Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems / ed. A.V. Drozd and V.S. Kharchenko. — Kharkov: Nat. aerospace. University named after N.E. Zhukovsky, 2012. — 614 p. (in Russian)].
13. Скляр В.В. Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами. — М.: Инфра-Инженерия, 2018. — 384 с. [Sklyar, V.V. Ensuring the Safety of Process Control Systems in Accordance with Modern Standards. — Moscow: Infra-Engineering, 2018. — 384 p. (in Russian)].
14. Sogomonyan, E.S. Self-Correction Fault-Tolerant Systems. — Preprint, October 2018. — 30 p.

15. *Согомонян Е.С., Слабаков Е.В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с. [*Sogomonyan, E.S., Slabakov, E.V.* Self-Checking Devices and Fault-Tolerant Systems. — Moscow: Radio and Communications, 1989. — 208 p. (in Russian)]
 16. *Piestrak, S.J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. — Wrocław: Ofiyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.
 17. *Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В.* Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография. — СПб.: Наука, 2018. — 151 с. [*Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V., Efanov, D.V.* Hamming Codes in Concurrent Error Detection Systems of Logic Devices. — St. Petersburg: Nauka, 2018. — 151 p. (in Russian)].
 18. *Петерсон У.* Коды, исправляющие ошибки. — М.: Мир, 1964. — 338 с. [*Peterson, W.* Codes for Correcting Errors. — Moscow: Mir, 1964. — 338 p. (in Russian)]
 19. *Fujiwara, E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. — John Wiley & Sons, 2006. — 720 p.
 20. *Lala, P.K.* Principles of Modern Digital Design. — New-Jersey: John Wiley & Sons, 2007. — 436 p.
 21. *Brouwer, A.E., Hamalainen, H.O., Ostergard, P.R.J., Sloane, N.J.A.* Bounds on Mixed Binary/Ternary Codes // IEEE Transactions on Information Theory. — 1988. — Vol. 44, iss. 1. — P. 140—161. — DOI: 10.1109/18.651001.
 22. *Gulliver, T.A., Ostergard, P.R.J.* Improved Bounds for Ternary Linear Codes of Dimension 7 // IEEE Transactions on Information Theory. — 1997. — Vol 43, iss. 4. — P. 1377—1381. — DOI: 10.1109/18.605613.
 23. *Mirzaee, R.F., Daliri, M.S., Navi, K., Bagherzadeh, N.* A Single Parity-Check Digit for One Trist Error Detection in Ternary Communication Systems: Gate-Level and Transistor-Level Designs // Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing — 2017. — No. 29 (3—4). — P. 303—326.
 24. *Bitouze, N., Graell i Amat, A., Rosnes, E.* Error Correcting Coding for a Nonsymmetric Ternary Channel // IEEE Transactions on Information Theory — 2010, Vol. 56, iss. 11. — P. 5715—5729. — DOI: 10.1109/TIT.2010.2069211.
 25. *Laaksonen, A., Ostergard, P.R.J.* New Lower Bounds on Error-Correcting Ternary, Quaternary and Quinary Codes // Lecture Notes in Computer Science 10495, Springer: Coding Theory and Applications, 5th International Castle Meeting, ICMCTA 2017, Vihula, Estonia, August 28—31. — 2017. — P. 228—237.
 26. *Svanström, M., Östergård, P.R.J., Bogdanova, G.T.* Bounds and Constructions for Ternary Constant-Composition Codes // IEEE Transactions on Information Theory. — 2002. — Vol. 48. — P. 101—111.
 27. *Berger, J.M.* A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. — 1961. — Vol. 4, iss. 1. — P. 68—73. — DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
 28. *Efanov, D.V.* Ternary Parity Codes: Features // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS' 2019), Batumi, Georgia, September 13—16. — 2019. — P. 315—319. — DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884414.
 29. *Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В.* О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 6. — С. 155—162. [*Efanov, D.V., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, Vl.V.* On Summation Code Properties in Functional Control Circuits // Automation and Remote Control. — 2010. — Vol. 71, iss. 6. — P. 1117—1123. — DOI: 10.1134/S0005117910060123]
 30. *Das, D., Toubia, N.A.* Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1999. — Vol. 15, iss. 1—2. — P. 145—155. — DOI: 10.1023/A:1008344603814.
 31. *Sapozhnikov, V., Sapozhnikov, Vl., Efanov, D.* Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS' 2015), Batumi, Georgia, September 26—29. — 2015. — P. 181—187. — DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.*
- Поступила в редакцию 3.02.2020, после доработки 03.05.2020.*
Принята к публикации 3.06.2020.
- Ефанов Дмитрий Викторович** — д-р техн. наук, Российский университет транспорта, г. Москва, ☒ TrES-4b@yandex.ru.

TERNARY SUM CODES FOR THE DIGITAL CIRCUIT TESTING

D.V. Efanov

Russian University of Transport, Moscow, Russia

☒ TrES-4b@yandex.ru

Abstract. The specifics of protecting data presented in the ternary form are discussed. Future relevance of the ternary logic is emphasized, and the main features of reliable digital devices and systems development are identified. A ternary sum code is described that detects any monotonous and asymmetrical errors in data vectors, the use of which is promising for constructing devices and systems with fault detection. The principles of building a ternary sum code are similar to those of classical binary sum codes (Berger codes). Previously unknown ternary sum codes properties are established only for the event of errors in data vectors with error-free check bits. Such task is relevant for practical applications in which the check bits and data vectors are calculated by physically different devices. Taking into account the established ternary sum codes properties can be useful when choosing a method of protecting both the data itself and parrying faults arising in automation devices.

Keywords: ternary logic, ternary logic device, fault detection in automation devices, calculation control, data protection, ternary sum code, Berger's code, undetectable error, error detection characteristics.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ КЛАСТЕРЫ С БЫСТРЫМ АППАРАТНЫМ ВЫПОЛНЕНИЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ СООБЩЕНИЙ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ СЕТЕВЫМИ СРЕДСТВАМИ

Г.Г. Стецюра

Аннотация. Предложены сетевая структура и методы быстрого взаимодействия компьютеров в новом виде распределенного составного кластера. Составной кластер организован иерархически и состоит из группы простых кластеров, один из которых выдает задания простым кластерам. Простые кластеры выполняют задания синхронно и асинхронно. В простом кластере группа процессоров также действует синхронно или асинхронно, применяя быструю барьерную синхронизацию. Действиями компьютеров простого кластера управляет ведущий компьютер — лидер. Отмечено, что в составном кластере быстро выполняются: процессы синхронизации передаваемых сообщений, процессы разрешения конфликтов доступа компьютеров к сетевым инструментам, распределенные логические операции, распределенное определение *max* и *min*, распределенные операции сложения и вычитания. Показано, что эти операции не требуют задержки сообщений для выполнения, продолжительность операций не зависит от числа компьютеров кластера, участвующих в них. Для этого компьютеры отправляют сообщения одновременно, создавая групповое сообщение, в котором одноименные биты объединяются во времени. Ускорение указанных выше распределенных вычислений и синхронизации достигается при интенсивном обращении компьютеров к сети кластера, что отличает предлагаемые решения от сложившейся практики применения компьютерной сети. Указано, что предложенные операции позволяют создавать более быстрые алгоритмы для решения задач реального времени, в том числе для задач управления работой кластера.

Ключевые слова: компьютерный кластер, иерархическая структура связей, быстрые вычисления в сети, динамическая реконфигурация, распределенная синхронизация, барьерная синхронизация, распределенный ускоритель вычислений.

ВВЕДЕНИЕ

Возможности распределенных компьютерных систем, в которых группа компьютеров объединяется сетью, в значительной степени зависят от возможностей сети. Традиционно всю обработку данных и управление работой системы выполняют компьютеры системы, а сеть занимается только передачей сообщений.

Однако в последние два десятилетия компьютерные сети существенно усложнились и начинают дополнительно выполнять различные виды обработки данных в процессе их передачи. Появились широко известные активные сети (Active Networks) [1], программно-управляемые сети (SDN)

[2], сети с внутрисетевыми вычислениями (In-Network Computing) [3–6]. Такие, конструктивно достаточно сложные сети, содержат сетевые компьютеры, программное обеспечение которых выполняет дополнительно часть работы основных компьютеров. В Active Networks выполняется управление пересылкой через сеть сообщений с учетом их особенностей. Сети SDN динамически реконфигурируют сетевую структуру. В In-Network Computing сетевые средства выполняют вычисления над передаваемыми в сообщениях данными. Перечисленные сети ориентированы на передачу сообщений большого объема. Благодаря передаче части работы основных компьютеров системы программ сетевых компьютеров эффективность системы повышается.

В последние годы в Институте проблем управления им. Трапезникова РАН выполнен цикл исследований по передаче сетевым средствам распределенных компьютерных систем ряда вычислительных и управляющих операций. По сравнению с упомянутыми системами ставились несколько отличающиеся цели. Сети должны эффективно работать с короткими сообщениями. Сетевые средства должны быть простыми, не содержать компьютеры. При этом они должны выполнять распределенные вычислительные и управляющие операции в сетевых средствах с высокими скоростями, близкими к достижимым в компьютере, т. е. система с сетевыми связями должна работать как распределенный компьютер.

Удовлетворяющие этим требованиям решения были получены для суперкомпьютеров [7, 8] и систем мобильных объектов, в частности роботов [9]. Но в этих работах не рассмотрен распространенный вид систем — составные компьютерные кластеры, которые содержат простые кластеры, взаимно удаленные на расстояние не более нескольких десятков метров. Настоящая статья дает для составных кластеров способы достижения указанных целей.

В составном кластере группы простых кластеров объединяются иерархически организованной локальной компьютерной сетью. Каждый простой кластер состоит из компьютеров, объединенных между собой через простое устройство — модуль связи, который не коммутирует связи. Его задачи — выполнение распределенных вычислений и ретрансляция сигналов. Кластерами в иерархической структуре управляет один из кластеров. Сетевые средства составного кластера не содержат сложных программируемых устройств.

Над содержимым групповых сообщений быстро выполняются вычисления в модулях связи простых кластеров. Вычисления выполняются в процессе передачи сообщений, без их задержки. Время выполнения рассмотренных далее распределенных вычислений не зависит от числа участвующих в них компьютеров.

Структура изложения материала: в § 3 — центральном в статье — описывается структура и функционирование составного, иерархически организованного кластера, объединяющего модулями связи простые кластеры, описанные в § 1, в сложную структуру. В § 2 описываются выполняемые в кластерах высокоскоростные процессы синхронизации, асинхронной барьерной синхронизации, разрешения конфликтов доступа. В § 4 даны примеры быстрых распределенных вычислений в предлагаемых кластерах.

В статье использованы результаты организации распределенных быстрых вычислений в суперкомпьютерах и в группах мобильных роботов из пуб-

ликаций [7—9], расширенные и адаптированные к потребностям составного компьютерного кластера с иерархическими сетевыми соединениями.

1. ПРОСТОЙ КЛАСТЕР

В простом кластере (рис. 1) применяются два вида объектов (сетевых узлов) — сетевые контроллеры NC и модули связи MS .

Объект NC , имеющийся у каждого компьютера кластера, участвует во всех распределенных операциях, необходимых компьютеру. Если не возникает неоднозначности, то будем называть объектом NC компьютер и его контроллер.

В простом кластере имеется только один объект MS . Объекты NC соединены с модулем связи MS каналами связи (оптоволоконными, беспроводными оптическими каналами или радиоканалами). В структуре (рис. 1, а) применяется любой из указанных каналов.

Объекты NC взаимодействуют через модуль связи MS следующим образом. Объект NC должен отправлять сигналы частотой f_1 для передачи двоичной единицы и частотой f_0 для передачи двоичного нуля в модуль связи MS , который преобразует эти сигналы в сигналы других частот $*f_1$ и $*f_0$ и отправляет их всем объектам NC . Эти сигналы имеют одинаковую длительность для всего кластера.

Для управления асинхронными процессами с помощью барьерной синхронизации используются сигналы f_2 и $*f_2$. Сигналы f_2 отправляют объекту NC . Каждый сигнал f_2 имеет длительность, которая требуется объекту NC для выполнения его части асинхронного процесса. Модуль MS отправляет всем NC сигналы $*f_2$, если MS принимает хотя бы один сигнал f_2 .

Для высокоскоростных операций, которые описаны далее, необходимо измерить время передачи сигнала между MS и каждым NC . Так как компьютеры кластера стационарны, то эти временные интервалы определяют один раз. Если не требуются выполнять распределенные операции очень быстро, то эти интервалы можно не измерять.

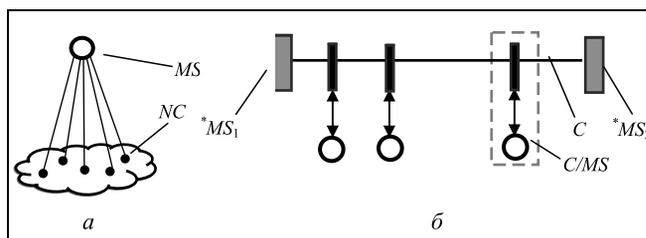


Рис. 1. Виды соединений в кластере: а — канал любого вида; б — оптоволоконный канал

В структуре (рис. 1, б) применяется только оптоволоконный канал. Здесь NC и MS соединены каналом, обозначенным как C . Эта структура позволяет кластеру иметь группу модулей MS и быстро заменять текущий модуль любым другим модулем MS . В составном кластере эта структура также позволяет составляющим его простым кластерам быстро обмениваться информацией. Для упрощения технических средств достаточно ограничиться одним или двумя модулями MS , расположенными на концах кабеля ($*MS_1$ и $*MS_2$ на рис. 1, б). Два модуля повышают отказоустойчивость структуры. Всегда работает только один модуль, быстро заменяемый другим при отказе первого. В этой структуре функции модуля MS может выполнять не только специально выделенный объект MS , но и любой объект NC .

Как показано, модуль связи MS — единственный вид сетевого устройства, через которое проходят все сетевые потоки. В § 2 и 4 показано, что процессы синхронизации и распределенных вычислений в значительной степени выполняются в модуле MS , который не содержит компьютеры, для большинства операций в нем не требуются даже логические элементы. В § 3 для работы в иерархической сетевой структуре модули MS составного кластера усложнены и в них применяется аппаратное управление переключением проходящих через MS потоков данных и команд.

2. СИНХРОНИЗАЦИЯ В ПРОСТОМ КЛАСТЕРЕ, ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРА

Рассмотрим три вида синхронизации: синхронизацию, устранение конфликтов доступа к MS и барьерную синхронизацию.

Синхронизация обеспечит доставку сообщений группы NC в MS в виде одного сообщения. В этом сообщении биты с одинаковыми именами в сообщениях NC перекрываются в MS или сообщения передаются одно за другим без временных пауз, как единое сообщение [7–9].

Синхронизация с помощью специальной команды начала синхронизации. Пусть такая команда поступила от MS ко всем NC . Пусть известно T_i — время распространения сигнала между NC_i и MS , и T_{\max} — время, не меньше времени распространения сигнала между MS и самыми удаленными от него NC .

Один из объектов NC отправляет команду начала синхронизации через MS всем NC . Получив команду, NC , которые должны отправить сообщение, отправляют в MS сообщение — двоичную шкалу. Число битов в шкале равно числу всех NC . Объекты NC , которые должны отправить сообще-

ние, отправляют единицу (f_1) в позицию (бит) шкалы, которая соответствует NC . Шкала отправляется с задержкой $D_i = 2(T_{\max} - T_i)$. Одноименные биты в шкале поступают в MS одновременно от всех NC , и все NC получают общую шкалу от MS — результат перекрытия сигналов NC . Получив шкалу, NC отправляет сообщение с задержкой D_i . Сообщения передаются одно за другим или с перекрытием их разрядов. Все NC получают такое сообщение от MS .

Синхронизация без специальной команды. Если NC не получают в течение заданного интервала времени сигналы от MS , то они начинают передавать сообщения. Если при этом возникает конфликт, то в сообщениях NC в результате наложения в MS сигналы искажаются (совместный приход в NC сигналов f_1 и f_0). Первое такое искажение NC воспринимают как команду начала синхронизации и устранения конфликта. В ответ NC посылают в MS приведенную выше шкалу. Далее выполняется синхронизация, как описано выше, и конфликты устраняются для всех NC одновременно.

Барьерная синхронизация в кластере следит за моментом завершения всех асинхронных процессов, выполняемых компьютерами кластера. Обычно она выполняется программными средствами и требует много времени. В предлагаемом варианте асинхронная барьерная синхронизация выполняется аппаратно. Объекты NC , начав асинхронное задание, посылают сигналы в MS на частоте f_2 . Модуль MS возвращает всем NC сигнал частоты $*f_2$. По завершении задания каждый NC удаляет сигнал f_2 . Когда в MS исчезает сигнал f_2 , передача $*f_2$ прекращается, что служит моментом синхронизации NC .

Таким образом, в отличие от приведенных во Введении систем, длительность каждого из рассмотренных видов синхронизации зависит главным образом от длительности переноса сигналов между NC системы. Использование задержки D_i делает время переноса сигнала между любым объектом и MS одинаковым и равным $T_{\max} = cL$, где c — скорость света, L — расстояние между MS и наиболее удаленными от MS объектами. Все виды синхронизации выполняются аппаратно. При участии в процессе синхронизации n объектов достигается высокая скорость процесса благодаря тому, что их специальные сообщения (шкалы) передаются в виде одного сообщения с совмещением в MS одноименных разрядов сообщений. При этом конфликт устраняется одновременно для всей группы объектов. Время синхронизации уменьшается в n раз, где n — число объектов.

Важно отметить, высокая скорость вычислительных операций из § 4 также достигается благодаря применению шкал.

3. СОСТАВНЫЕ КЛАСТЕРЫ

Составной кластер содержит центральный простой кластер нулевого уровня и подчиненные ему простые кластеры первого уровня, в которых группы компьютеров не находятся в прямой связи с модулем связи MS центрального кластера. Далее представлены синхронные и асинхронные составные кластеры.

3.1. Синхронный составной кластер

Структура составного кластера (рис. 2) одинакова для синхронного и асинхронного кластеров. Здесь MS — основной модуль связи нулевого уровня, принадлежащий центральному кластеру. Объекты NC нулевого уровня напрямую связаны с MS . В подчиненных кластерах объекты NC подключены к MS через свои модули связи первого уровня 1MS . Волоконно-оптические каналы соединяют модули первого уровня 1MS с модулем MS . Удаленность каждого NC составного кластера от MS и наибольшая удаленность всех NC от MS известны.

Модуль MS работает, как описано выше. Модули 1MS принимают сигналы f_0 , f_1 и f_2 от подключенных к ним NC и, не изменяя частоту сигналов, передают их в MS . Поэтому MS воспринимает модули 1MS как NC . Модуль MS посылает сигналы $*f_1$, $*f_0$, и $*f_2$ не только своим NC , но и модулям 1MS . Последние, подобно MS , посылают эти сигналы своим NC . Модули 1MS не преобразуют проходящие через них сигналы. Система с модулями 1MS ведет себя аналогично системе, которая содержит только модули MS .

Процесс синхронизации в составном кластере имеет свои особенности. Для упрощения предположим, что кластеры пользуются шкалами синхронизации, имеющими одинаковое число двоичных разрядов.

В процессе синхронизации участвуют все простые кластеры, которые передают в сообщениях общую шкалу. От MS общая шкала возвращается всем NC . После синхронизации NC отправят свои сообщения без конфликтов.

В этом процессе должно выполняться дополнительное условие: сообщения NC должны поступать без конфликтов не только в MS , но и в 1MS . Каждый NC должен отправить сообщение с рассмотренной выше задержкой T_p , к которой добавляется задержка, учитывающая расстояние между MS и

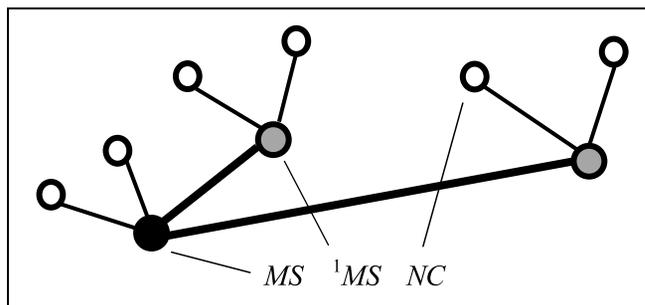


Рис. 2. Составной кластер

1MS . Все последующие операции в кластере начинаются одновременно.

В синхронном составном кластере барьерная синхронизация, цифровые операции и методы обмена данными аналогичны решениям простого кластера.

Кроме того, легко работать со шкалами и сообщениями различной длины, если длины известны заранее. Допустимы динамически изменяемые длины сообщений; однако эти длины должны быть указаны в шкале синхронизации. Для ускорения можно применять две шкалы — шкалу синхронизации, за которой следует более короткая шкала, отправляемая только NC , передающими сообщения. Во второй шкале указываются длины сообщений.

3.2. Асинхронный составной кластер

В отличие от п. 3.1, NC , входящие в любой простой кластер, работают в асинхронном составном кластере автономно, не задерживая работу NC других простых кластеров.

Вернемся к барьерной синхронизации в простом кластере. Предположим, один из объектов NC , объект U , отправляет задание другим объектам NC . Каждый из этих NC начинает асинхронную операцию, отправляет сигнал f_2 барьерной синхронизации в MS и завершает передачу сигнала f_2 после завершения задания объекта U . Модуль MS в ответ на сигнал f_2 отправляет сигнал $*f_2$ объектам NC и завершает передачу сигнала $*f_2$ в отсутствие сигнала f_2 . После этого объект U отправляет новое задание.

Теперь обратимся к составному асинхронному кластеру. Модули 1MS состоят из двух частей: 1MS_a и 1MS_b . Для автономной работы NC в модулях 1MS потребуются два источника сигнала f_2 .

Перевод центральным кластером модуля 1MS в автономный режим состоит из следующих шагов.



Шаг 1. Произвольный NC центрального кластера, действующий как U , отправляет команду $C1$.

После получения команды $C1$ модуль 1MS информирует подключенные к нему NC о предстоящей автономной работе. Модули 1MS и их NC , получившие команду $C1$, ждут команду $C2$ от объекта U . Эта команда перечисляет имена NC — получателей $C2$. Для каждого NC указывается задача — команда или программа, которую должен выполнить NC . Затем модуль 1MS выполняет шаг 2.

Шаг 2. После получения $C2$ модуль 1MS запрещает прохождение сигналов от MS к NC , указанного модуля 1MS и сигналов этих NC к MS . Часть 1MS_a отправляет в MS сигнал f_2 — признак барьерной синхронизации. От модуля MS поступает сигнал $*f_2$ ко всем 1MS . На шаге 3 объекты NC модуля 1MS будут асинхронно выполнять задачи, указанные в команде $C2$.

Шаг 3. Команда $C2$ среди NC модуля 1MS выбирает произвольный NC , который обозначим $*U$. Объект $*U$ должен управлять действиями остальных объектов NC модуля 1MS . Объект $*U$ также может быть выбран совместными операциями объектов NC , объединенных модулем 1MS . В своем простом кластере объект $*U$ ведет себя подобно объекту U центрального кластера.

Каждый NC , получивший команду от $*U$, отправляет части 1MS_b сигнал f_2 . Часть 1MS_b преобразует сигнал f_2 в сигнал $*f_2$, который отправляется объектам только NC этого модуля 1MS .

После завершения операции NC отключает свой сигнал f_2 . При отсутствии сигналов f_2 модуль 1MS_b отключает сигнал $*f_2$.

В ответ объект $*U$ либо продолжает работать с объектами 1MS , либо завершает работу и отправляет команду части 1MS_a , чтобы прекратить отправку сигнала f_2 в модуль MS .

Шаг 4. Когда модуль MS прекратит прием сигнала f_2 , модуль MS прекратит передачу сигнала $*f_2$ своим объектам NC и модулям 1MS .

После выполнения шагов 1—4 результаты вычислений в модулях 1MS остаются в тех NC , которые подключены к этим модулям, и недоступны NC , которые подключены к MS . Чтобы этим NC дать доступ, выполняется шаг 5.

Шаг 5. Предполагается, что в команде $C2$ объект $*U$ получил задачу по сбору данных из NC , которые подключены к модулю 1MS , и собрал требуемые данные.

После этого объект U получает через модуль MS и $*U$ все данные из объектов.

Таким образом, разделение модуля 1MS на части 1MS_a и 1MS_b позволяет взаимодействовать двум асинхронным процессам. Часть 1MS_a обеспечивает подключение модуля 1MS как объекта к MS . Часть 1MS_b позволяет объектам, подключенным к модулям 1MS , работать автономно. По сравнению с MS подчиненные модули 1MS пришлось усложнить.

Шаги 1—5 легко изменяются для включения модулей следующих уровней иерархии — 2MS , 3MS и т. д. Это позволяет создать многоуровневую структуру.

В составном кластере любой компьютер можно заменить составным кластером.

Организация составного кластера с иерархической сетевой структурой связей — центральная задача статьи. Иерархическая сетевая структура характерна для многих современных распределенных компьютерных систем. Но рассмотренный выше составной кластер при наличии в нем n компьютеров n -кратно ускоряет синхронизацию и ряд видов распределенных вычислений.

3.3. Быстрые изменения в структуре кластера

Рассмотрим типичные варианты изменений в структуре кластера.

Смена лидера. Для проведения в кластере вычислений (§ 4) часто нужен объект NC — лидер, управляющий действиями других объектов NC кластера. Если лидер перестает работать, требуется выбор другого лидера за минимально возможное время. Для этого достаточно выполнить следующие действия.

Объектам NC присваивают различные двоичные номера. Цифра номера, равная единице, будет передаваться сигналом f_1 , а цифра ноль — сигналом f_0 . Выполняется алгоритм из двух шагов.

Шаг 1. Если в течение времени $2 * T_{\max}$ объекты NC не обнаруживают сигнал f_0 или f_1 , то они переходят к шагу 2.

Если объект обнаруживает сигнал f_1 , и его старшая цифра равна нулю, тогда он прекращает выполнение алгоритма. В противном случае он переходит к шагу 2.

Шаг 2. Объекты NC передают старшую цифру своего номера, которую получают все NC и ожидают в течение времени $2 * T_{\max}$. Если при этом NC , который передал сигнал f_0 , получает сигнал f_1 , то он прекращает выполнение алгоритма. Иначе NC повторяет шаг 2, передавая следующую цифру своего номера. Алгоритм завершается после передачи объектами NC последней цифры.

После завершения алгоритма будет выделен единственный NC . Он становится лидером или передает функции лидера другому NC . Число повторений шага 2 логарифмически зависит от числа объектов NC . Переход к представлению чисел, показанному в § 4, дает дальнейшее ускорение благодаря уменьшению числа обменов сообщениями в сети. Более сложные действия по выбору лидера изложены в работе [9].

Смена модуля связи. До сих пор мы рассматривали случай, когда модуль MS действует как центр, что делает кластер зависимым от его работоспособности. Снимем это ограничение.

Вначале соединение между модулями связи будем считать беспроводным (см. рис. 1, *a*). Рассмотрим общий случай — сбой или отказ MS или первоначальный запуск еще не сформированного кластера. Будем считать, что имеется несколько MS , один из них работает в данный момент времени. Остальные следят за его работоспособностью и при отказе проводят выбор нового MS , подобно выбору лидера среди NC .

При начальном запуске лидер после выполнения алгоритма требует от всех включенных в кластер NC определить T_i и T_{\max} . Существенно, что начальный запуск создает кластер полностью децентрализованно.

Если соединения оптоволоконные, то применяется структура соединений, представленная на рис. 1, *б*. Работающий и резервные MS объединены каналом связи согласно рис. 1, *б*. Выбор нового MS выполняется, как в предыдущем варианте для рис. 1, *a*, но с посылкой сигналов в соответствии с § 1.

Глобальный обмен сообщениями. Полученные в каком-либо NC данные в составном кластере непосредственно доступны NC , соединенными с тем же модулем связи. Другие NC получают доступ к этим данным только через указанную в п. 3.1 и 3.2 цепочку переключений в структуре MS . Для дальнейшего ускорения вычислений, воспользуемся объединением всех NC дополнительной связью в соответствии с рис. 1, *a* или 1, *б*. Эта связь включается по команде основного модуля связи нулевого уровня. В результате составной кластер преобразуется в простой кластер, действия которого описаны выше.

3.4. Управление группой распределенных конвейерных вычислений

В обычных конвейерных системах компьютеры соединены в цепочку, через которую продвигаются обрабатываемые данные. Каждый следующий компьютер цепочки использует результаты вычислений предыдущего компьютера. В предлагаемом кластере применена иная организация одновременно действующей группы конвейеров. В ней на

каждом шаге процесса любому компьютеру доступна информация, адресованная любому компьютеру любого кластера, и допустимо изменять состав конвейеров.

Конвейерные вычисления начинаются с отправки команды Cr всем объектам для предварительной настройки конвейера. Команда Cr укажет каждому объекту его конвейер, место в цепочке конвейера и начальные данные для запуска процесса. После получения команды Cr объекты в указанном порядке выполняют этапы конвейера и передают результаты расчета в MS . Все объекты получают эти результаты от MS и используют их в расчетах следующих шагов.

Возможно синхронное и асинхронное продвижения конвейера. При синхронном процессе продолжительность отдельных шагов может различаться, однако они известны всем компьютерам кластера. Переход к следующему шагу не требует отправки дополнительных синхронизирующих сигналов. В асинхронном конвейере применяется барьерная синхронизация (см. § 2). Каждый шаг начинается после завершения предыдущего шага, с исчезновением получаемого от MS сигнала $*f_2$.

Вся необходимая для очередного шага информация от всех участников передается синхронно в одном сообщении, что существенно ускоряет настройку шага процесса. Изложенные в § 4 распределенные операции используют короткое сообщение с объединением разрядов сообщений источников. Все приемники сообщений получают сообщение группы источников одновременно.

Приведенное ускорение требует применения синхронизации, описанной в § 2.

В публикациях, модифицирующих сетевые взаимодействия в суперкомпьютерах [7, 8], дано более гибкое и быстрое решение, но существенно более сложное в технической реализации.

4. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СЕТЕВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Далее приведены примеры быстрых распределенных вычислительных операций, разработанных ранее для систем из публикаций [7–10] и настоящей статьи. Состав операций расширяется при переходе к новым видам и применениям систем. Поэтому § 4 служит ориентиром для создания новых полезных сетевых операций.

4.1. Формат данных в выполняемых кластером распределенных операциях

Для представления двоичных единиц и нулей применяются соответственно сигналы двух частот f_1 и f_0 (см. § 1).



В ряде операций для представления цифр применяется также двоичная шкала, в которой число битов равно основанию данной системы счисления. Только один бит в шкале, соответствующий значению цифры, равен 1, остальные равны 0. Например, для десятичной системы счисления и цифры 7 шкала равна 001000000. Для двоичной системы мы получаем обычное двоичное представление чисел. Увеличение базы системы счисления ускоряет работу, поскольку уменьшает количество обменов сообщениями.

4.2. Распределенные цифровые операции

Битовые логические операции И и ИЛИ. Объекты NC синхронно передают биты в MS , используя представление двоичных цифр 1 и 0 сигналами f_1 и f_0 . Если MS при выполнении операции I получает только сигналы f_1 , то результат наложения сигналов считается единицей. При приходе в MS сигналов f_1 и f_0 или f_0 результат равен нулю.

В операция $ИЛИ$ при приходе в MS только сигнала f_0 результат равен нулю. При приходе в MS только сигнала f_1 или сигналов f_1 и f_0 результат равен единице.

Операции выполняются в MS без задержки сигнала за время, не зависящее от числа участников операции. Для вычислений MS не применяет логические элементы.

Операции MAX и MIN . Чтобы вычислить MAX , объекты передают в MS наибольшую цифру своего номера, которая представлена в виде шкалы из п. 4.1. В результате наложения шкал может появиться шкала с несколькими единицами в разных позициях шкалы. В ней объекты выбирают наибольшее значение цифры. Следующую цифру передают объектами, ранее передавшие наибольшую цифру, MAX определяется после передачи всех цифр чисел. Для расчета MIN объекты определяют минимальные значения цифр.

4.3. Распределенные аналого-цифровые операции

Рассмотрим операции аналого-цифрового суммирования. Эти операции существенно расширяют возможности цифровых операций (см. п. 4.2).

Добавим в модуль MS аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Каждой цифре суммируемых чисел, представленной в произвольной системе счисления, выделим шкалу из п. 4.1. Шкалы цифр всех суммируемых чисел поступают в MS с побитным их совмещением. Приемник сигналов f_1 в MS для каждого бита шкалы объединяет энергию принятых сигналов f_1 и передает результат на АЦП, который выдает цифровое значение, соответст-

ующее уровню принятой АЦП энергии, соответствующей энергии одного, двух и т. д. сигналов. Модуль MS отправляет эти числовые значения (частичные суммы) объектам. Объекты одновременно суммируют частичные суммы для получения окончательного результата.

Время для вычисления в MS состоит из двойного интервала времени передачи сигналов между MS и наиболее удаленным объектом и времени перевода «аналог — цифра».

Приведем пример сложения трех десятичных чисел $S = 68 + 58 + 68$. Они представлены шкалами: число 68 представлено шкалой младшего разряда $R_1 = [010000000]$ и шкалой старшего разряда $R_2 = [000100000]$; число 58 представлено соответственно $R_3 = [010000000]$ и $R_4 = [000010000]$; еще раз число 68 представлено $R_5 = [010000000]$ и $R_6 = [000100000]$. Вначале на MS поступают три шкалы R_2, R_4, R_6 младших цифр чисел, которые в результате наложения создают общую шкалу $[0(3)0000000]$. Здесь в круглых скобках указана суммарная энергия поступивших сигналов f_1 . Эту

шкалу АЦП переводит в цифровую шкалу ${}^1R = [030000000]$, где цифра 3 указывает, сколько сигналов поступило в данный разряд от объектов NC . Эти данные направляются всем NC . Заметим, что энергия сигналов не обязательно идентична, и АЦП должен вносить соответствующую коррекцию. Для упрощения модуля связи АЦП может передавать в NC только цифровые измерения уровня энергии, где они будут переведены в число сигналов. Аналогично обрабатываются шкалы R_1, R_3, R_5 с образованием шкалы $[000(2)10000]$, которая будет направлена объектам NC как ${}^2R = [000210000]$. По шкалам 1R и 2R объекты получают из частичных сумм полную сумму $S = 10(2 \cdot 6 + 5) + 3 \cdot 8 = 194$.

Аналогично выполняется вычитание.

Часто полезно в АЦП только подсчитывать число полученных сигналов f_0 . Это, например, позволит быстрее узнать, сколько объектов NC участвовало в операции.

Пример аналогового суммирования — гистограммы. Пусть группа NC оценивает некоторое событие по совокупности признаков. Каждому признаку объект NC присваивает количественное значение, и всю последовательность признаков NC передает в MS как единое сообщение — шкалу. Все шкалы передаются синхронно, с совмещением двоичных разрядов.

В процессе передачи в MS выполняется сложение. В результате все объекты получают гистограмму, каждый отсчет которой дает суммарную оценку конкретного параметра события. Число участни-

ков операции также легко подсчитывается, что даст гистограмму для средних значений параметров.

Часто признакам дается только двоичная оценка 1 и 0. Для получения гистограммы в этом случае сложение вырождается в операцию счета.

При участии n компьютеров в операциях из § 4 время выполнения каждой операции не зависит от числа участвующих в ней компьютеров и не отличается от времени с участием только одного или двух компьютеров (в зависимости от вида операции).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты реализуют поставленные во Введении цели обеспечить быструю работу распределенного составного компьютерного кластера как распределенного компьютера. Кластер выполняет аппаратно с высокой скоростью следующие операции.

- Обеспечение точной синхронизации обменов сообщениями, позволяющей отправлять сообщения группы компьютеров получателям как единое общее сообщение двух видов: сообщение, состоящее из следующих одно за другим без временных задержек сообщений; сообщение, объединяющее одноименные двоичные разряды всех сообщений одинаковой разрядности в общее сообщение той же разрядности.
- Аппаратное выполнение барьерной синхронизация асинхронных процессов, обычно выполняемое программно.
- Устранение конфликтов доступа компьютеров к сети также аппаратно путем посылки короткого сообщения для одновременного разрешения группы конфликтов.
- Выполнение распределенных вычислений с одновременным участием в общей операции данных из многих сообщений. Выполнение операции во время передачи только одного сообщения с наложением одноименных двоичных разрядов.

Эти результаты решают поставленные во Введении задачи: сети должны эффективно работать с короткими сообщениями; сетевые средства должны быть простыми, не содержать компьютеры; при этом они должны выполнять распределенные вычислительные и управляющие операции в сетевых средствах с высокими скоростями, близкими к достижимым в компьютере.

Полученные решения могут быть полезны при создании алгоритмов обработки данных и качественно отличаются от известных. Обычно хороший алгоритм должен по возможности реже обращаться к сетевым средствам, применение которых весьма

замедляет его выполнение. В рассмотренной структуре применение сети ускоряет выполнение алгоритма. Как показано в § 2 и 4 ускорению способствует замена поочередной передачи сообщений многих источников синхронизированной передачей единственного сообщения с совмещением одноименных разрядов всех сообщений.

Подчеркнем в завершение, что предложенные технические сетевые средства простые, не содержат программируемые устройства.

Дальнейшее направление исследований может быть связано с созданием применяющих сетевые обмена алгоритмов и оценкой их эффективности. Такая оценка представляет собой отдельную сложную задачу, требующая для ее решения участия специалистов, создающих сложные прикладные алгоритмы, и заинтересованных в их ускорении с привлечением новых технических средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tennenhouse, D.L.* Towards an Active Network Architecture // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. — 1996. — 26 (2).
2. *Kreutz, D., Ramos, F.M.V., Verissimo, P., et al.* Software-Defined Networking. A Comprehensive Survey // Proc. of the IEEE. — 2015. — Vol. 103, no. 1, January. — P. 14–76.
3. *Tokusashi, Y., Huynh, Tu Dang, Pedone, F., et al.* The Case for In-Network Computing on Demand // Dresden, Germany. EuroSys'19. March 25–28. — 2019. — <https://doi.org/10.1145/3302424.3303979>
4. *Sapio, A., Abdelaziz, I., Aldilajan, A., et al.* In-Network Computation is a Dumb Idea Whose Time Has Come // Proceedings of the 16th ACM Workshop on Hot Topics in Networks — HotNets-XVI. — 2017. — <http://dx.doi.org/10.1145/3152434.3152461>
5. *Ports, D.R.K., Nelson, J.* When Should the Network Be the Computer? // Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS'19), May 13–15, Bertinoro, Italy. — 2019. — <https://doi.org/10.1145/3317550.3321439>
6. *In-Network Computing and Next Generation HDR 200G Infiniband Whitepaper* // Mellanox Technologies. — 2018. — https://www.mellanox.com/pdf/whitepapers/WP_In-Network_Computing_Next_Generation_HDR_200G_IB.pdf
7. *Стецюра Г.Г.* Компьютерная сеть с быстрой распределенной перестройкой своей структуры и обработкой данных в процессе их передачи // Проблемы управления. — 2017. № 1. — С. 47–56. — http://pu.mtas.ru/archive/Stetsyura_117.pdf [*Stetsyura, G.G.* A Computer Network with Fast Distributed Reconfiguration and Data Processing During Transfer // Automation and Remote Control. — 2018. — Vol. 79, iss. 4. — P. 713–724. — DOI: 10.1134/S0005117918040124]
8. *Stetsyura, G.* Means for Fast Performance of the Distributed Associative Operations in Supercomputers // Communications in Computer and Information Science: Springer International Publishing AG. — 2017. — Vol. 793. — P. 27–39. — https://doi.org/10.1007/978-3-319-71255-0_3
9. *Стецюра Г.Г.* Сетевая информационно-вычислительная поддержка взаимодействия подвижных роботов // Проблемы управления. — 2018. — № 5. — С. 56–65. — DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2018.5.6> [*Stetsyura, G.G.* Network Information-Computing Support of Automatic Mobile Objects Interaction // Automation and Remote Control. — 2019. —

Vol. 80, iss. 6. — P. 1134—1147. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117919060110>

10. Патент РФ 2697729 С1. Способ и система управления взаимодействием автономных мобильных технических объектов с быстрой реакцией на изменение состояния объектов и внешней среды. [Patent RF. 2697729 С1. Method and control system for the interaction of autonomous mobile technical objects with a quick reaction to a change in the state of objects and the environment.]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневым.

Поступила в редакцию 03.12.2019, после доработки 15.04.2020.
Принята к публикации 3.06.2020.

Стецюра Геннадий Георгиевич — д-р техн. наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ✉ gstetsura@mail.ru.

THE COMPUTER CLUSTERS WITH FAST SYNCHRONIZATION OF MESSAGES AND WITH FAST DISTRIBUTED COMPUTING BY THE NETWORK HARDWARE

G.G. Stetsyura

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ gstetsura@mail.ru

Abstract. The network structure and methods for the rapid interaction of computers in a distributed composite cluster are proposed. The composite cluster is organized hierarchically and consists of a group of simple clusters, one of which gives tasks to simple clusters. Simple clusters perform tasks synchronously and asynchronously. In the simple cluster, a group of processors also acts synchronously or asynchronously, using fast barrier synchronization. The activities of simple cluster computers are controlled by a leading computer. The composite cluster quickly performs the processes of synchronization of messages sent, processes of resolving conflicts of computer access to network tools, distributed logical operations, the distributed definition of *max* and *min*, distributed addition and subtraction operations. These operations do not require message delay to complete. The duration of operations does not depend on the number of cluster computers participating in them. To do this, computers send messages simultaneously, creating a group message in which the bits of the same name are combined in time. Acceleration of the above mentioned distributed computing and synchronization is achieved with intensive computer access to the cluster network, which distinguishes the proposed solutions from the existing practice of using a computer network. The proposed operations allow creating faster algorithms for real-time tasks, including tasks for managing the cluster.

Keywords: computer cluster, hierarchical network structure, fast computing in the network, dynamic reconfiguration, distributed synchronization, barrier synchronization, the distributed accelerator of computing.

Аспирантура Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН Направления подготовки

09.06.01 — «Информатика и вычислительная техника»

Специальности:

- 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) — по техническим наукам;
- 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации) — по физико-математическим наукам;
- 05.13.05 — Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления — по техническим наукам;
- 05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) — по техническим наукам;
- 05.13.10 — Управление в социальных и экономических системах — по техническим наукам;
- 05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей — по техническим наукам;
- 05.13.12 — Системы автоматизации проектирования (по отраслям) — по техническим наукам;
- 05.13.15 — Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети;
- 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ — по техническим наукам.

38.06.01 — «Экономика»

Специальности:

- 08.00.05 — Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в том числе управление инновациями);
- 08.00.13 — Математические и инструментальные методы экономики.

01.06.01 — «Математика и механика»

Специальность:

- 01.01.02 — Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление.

Более подробная информация на <https://www.ipu.ru/aspirantura/postgraduate/about>

ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА¹

Л.А. Мартынова, Н.К. Киселев, Г.Г. Безрук

Аннотация. Отмечено, что для движения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) применяются различные исполнительные устройства, отличающиеся не только принципом действия, но и током потребления, меняющимся во времени. Поэтому необходимы различные по принципу действия источники питания, и управление движением АНПА порождает необходимость решения задачи эффективного управления системой генерации и распределения энергии, под которым понимается определение необходимого состава и параметров источников питания, а также распределения потребителей по шинам в условиях жесткого ограничения по времени. Цель работы — разработка эффективного управления системой генерации и распределением энергии АНПА для обеспечения его движения с заданными параметрами. В результате анализа подключения/отключения потребителей выявлено, что все ситуации можно свести к двум типам управления: первый — когда заранее неизвестно, какой из потребителей будет подключен и какой ток он будет потреблять; второй — когда известен состав потребителей и объем потребляемого ими тока. Для определения управления переключениями потребителей задача формализована как задача об упаковке в контейнеры, для решения которой существуют эвристические алгоритмы. Анализ существующих алгоритмов применительно к решаемой задаче позволил определить, что алгоритмы Best Fit и Best Fit Decreasing обеспечивают эффективное управление системой генерации и распределения электроэнергии. Приведен пример управления гибридной системой генерации и распределения электроэнергии при изменении параметров движения аппарата.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гибридная система генерации и распределения электроэнергии, эвристический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологий создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к возможности разработки многоскоростного АНПА для преодоления значительных расстояний в несколько сотен километров [1]. Поступательное движение АНПА происходит благодаря тяге, создаваемой маршевым движителем, а

маневрирование АНПА — благодаря применению исполнительных устройств. Для движения АНПА заданными курсом и скоростью на заданной глубине в системе управления АНПА определяются исполнительные устройства (маршевый движитель, рули, подруливающие устройства), способные обеспечить движение АНПА с требуемыми параметрами. Определение исполнительных устройств зависит от скорости движения АНПА, так как из-за повышенной плотности морской среды на низких скоростях движения для маневрирования чаще применяются подруливающие устройства и уравнительно-дифференциальная система, а при

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-08-00130).



повышенных скоростях — кормовые и носовые рули.

Перечисленные исполнительные устройства отличаются не только принципом действия, но и током потребления, меняющимся во времени. Из-за различного потребления тока необходимы различные по принципу действия источники питания, поскольку одним источником питания обеспечить движение АНПА во всем диапазоне скоростей невозможно. Так, аккумуляторная батарея (АБ) способна вырабатывать высокие токи и тем самым обеспечивать движение АНПА на высокой скорости, но в течение существенно ограниченного времени, другой источник — электрохимический генератор (ЭХГ), использующий реагенты из хранилища, вырабатывает пониженный ток, в результате чего обеспечивает движение АНПА лишь на малой скорости, но зато в течение достаточно длительного времени. Аналогичная ситуация происходит и с потреблением тока при маневрировании АНПА: подруливающие устройства потребляют существенно больше тока, чем рули. Обеспечение током всех подсистем АНПА, включая также навигационную систему для контроля положения АНПА на маршрутной траектории и систему освещения обстановки для обеспечения безопасности плавания, выполняет гибридная система генерации и распределения электроэнергии (СГРЭ), в функции которой входит генерация энергии и распределение ее по токопроводящим шинам (далее по тексту — шинам). В результате оказывается, что управление исполнительными устройствами для движения АНПА тесно взаимосвязано с управлением гибридной СГРЭ.

В гибридной СГРЭ применяются два типа источников питания: АБ и ЭХГ [2]. Источники питания питают шины, к которым подключены потребители. Управление СГРЭ заключается в выборе источников питания для генерации электроэнергии, распределения ее по шинам и распределении подключения потребителей к этим шинам.

Особенность подключения потребителей к шине состоит в том, что если на шине потребителей больше, чем допускает ее номинальный ток, то возникают помехи, оказывающие влияние на работу навигационной системы и системы управления АНПА, что недопустимо. Формирование на шине повышенного номинального тока, что называется, «с запасом», приводит к повышению массогабаритов шины, повышению мощности источника питания, что, в свою очередь, приводит к неоправданному перерасходу электроэнергии. Увеличение числа шин приводит к возникновению неиспользуемых свободных ресурсов каждой шины, что также экономически неоправданно. Поэтому управление СГРЭ необходимо организовать таким образом, чтобы:

- все потребители получили требуемый ток;
- потребляемые токи не превышали номинальные токи шин;
- число задействованных источников тока, питающих шины, было минимальным.

Если бы состав потребителей и потребляемые ими токи были постоянными или их изменение было бы заранее известно, то задачу определения необходимых источников питания и распределения потребителей по шинам достаточно было бы решить один раз перед началом выполнения АНПА маршрутного задания.

Однако в процессе выполнения маршрутного задания состав потребителей и потребляемый ими ток меняются с течением времени. Так, может оказаться, что работающие исполнительные устройства не обеспечивают движение АНПА с заданными параметрами, в связи с чем может потребоваться подключение дополнительных исполнительных устройств. Это приведет к изменению состава потребителей. Кроме того, при смене параметров движения или скоростного режима АНПА также может измениться состав исполнительных устройств. В этом и заключается специфика АНПА — для различных режимов движения необходимо применять различные исполнительные устройства, отличающиеся принципом действия и токопотреблением.

В связи с этим складывается ситуация, при которой управление движением АНПА порождает необходимость решения задачи эффективного управления СГРЭ, под которым понимается определение необходимого состава и параметров источников питания, а также распределения потребителей по шинам. Время на выработку решения по управлению — доли секунд, практически мгновенно, как только поступила команда на изменение параметров движения АНПА или как только система диагностики выявила на одной из шин превышение потребляемым током ее номинального значения.

Ввиду новизны разработки многоскоростного АНПА и применения гибридной СГРЭ ранее в такой постановке задача не рассматривалась. Применение гибридной СГРЭ на обитаемом подводном объекте [3] предусматривает управление со стороны обслуживающего персонала. При управлении движением автономного необитаемого подводного аппарата выработка параметров исполнительных устройств происходила без учета их энергопотребления, полагая, что энергоресурса на борту аппарата достаточно. Ранее практически все разрабатываемые АНПА предусматривали движение в режиме экономичного хода — до 4 узлов. Высокоскоростные автономные подводные аппараты одноразового применения также, несмотря на движение в двух режимах — поисковом и маршевом —

применяли одни и те же исполнительные устройства и источник электроэнергии — АБ, поскольку время жизни таких аппаратов исчислялось минутами. В отечественной и зарубежной литературе публикации по разработке многоскоростного АНПА практически отсутствуют из-за новизны задачи и новизны технического решения, связанного с применением гибридной СГРЭ на борту АНПА. В зарубежных источниках, например, [4, 5], уделено достаточно внимания особенностям применения гибридных СЭО на борту АНПА, однако в них не раскрываются детали принятых технических и алгоритмических решений.

В связи с этим для управления движением многоскоростного АНПА необходимо решить задачу эффективного управления гибридной СГРЭ.

Цель работы — разработка эффективного управления системой генерации и распределение энергии АНПА для обеспечения его движения с заданными параметрами.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть АНПА в момент времени t движется с установленными параметрами — курсом, скоростью и глубиной. Задействованы источники питания, которые подключены к шинам, и к этим же шинам подключены исполнительные устройства для обеспечения жизнедеятельности АНПА и его движения, например, в режиме экономичного хода. Каждый потребитель характеризуется током потребления, который в общем случае меняется с течением времени. Полагаем, что диапазоны изменения известны.

Пусть состояние гибридной СГРЭ характеризуется составом источников тока, номинальными токами шин и распределением потребителей по шинам.

Пусть распределение потребителей по шинам в момент времени t оптимально.

В процессе движения АНПА изменение состояния гибридной СГРЭ возможно по трем причинам. Одна из них связана с увеличением потребляемого тока с течением времени у одного из потребителей, например, у маршевого движителя на разгонном участке траектории, в результате чего происходит увеличение общего потребляемого тока, что может привести к превышению номинального тока шины, к которой подключен маршевый движитель. В этом случае необходимо переключение потребителей между шинами так, чтобы исключить превышение номинального тока. Возникает задача определения плана переключения потребителей между шинами.

Другая причина связана с подключением дополнительных исполнительных устройств, напри-

мер, из-за попадания АНПА в подводное течение, в результате чего для удифференцирования АНПА необходимо дополнительное изменение параметров уравнильно-дифференциальной системы. В этом случае в дополнение к работающим исполнительным устройствам добавляется еще один дополнительный потребитель — в данном случае уравнильно-дифференциальная система. Возникает задача выбора шины для подключения этой системы. Если подключать ее к имеющимся шинам, на которых отсутствует свободный ресурс, возникает превышение номинального тока. Запускать для подключения новую шину — экономически затратно, тем более что превышение номинального тока может быть временным. В этом случае также возникает задача определения плана переключения потребителей между шинами так, чтобы исключить превышение номинального тока данной шины.

Наконец, третья причина связана с поступлением команды на изменение параметров движения АНПА для перехода, например, в высокоскоростной режим. Это приведет к изменению состава исполнительных устройств, обеспечивающих движение АНПА с заданными параметрами, и, следовательно, к изменению токопотребления. Причем потребление этими новыми устройствами с течением времени может меняться. Возникает задача определения состава источников тока и плана переключения потребителей между шинами так, чтобы: все потребители были обеспечены током, исключить превышение номинального тока данной шины и число задействованных источников тока было минимальным.

В результате появления перечисленных причин может оказаться, что в момент времени $t + 1$ необходимо либо дополнительно подключать к имеющимся шинам потребителей, либо полностью пересмотреть состояние гибридной СГРЭ — состав источников электропитания, шины и распределение потребителей по шинам.

И в том, и в другом случае возникает необходимость решения двух задач: одна из них — определение оптимального подключения на момент $t + 1$; другая — перевод гибридной СГРЭ из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t + 1$.

При решении задачи определения оптимального подключения на момент $t + 1$ очевидно, что наиболее эффективное подключение будет наблюдаться тогда, когда потребляемые токи на каждой шине будут в точности совпадать с номинальными токами. Очевидно, что из-за переменного состава потребителей и потребляемого ими тока такое равновесное состояние невозможно. Поэтому будем считать подключение оптимальным, если при распределении потребителей по шинам разность сум-



марного номинального тока по шинам и суммарного тока потребления минимальна:

$$\Delta_t = \sum_{i=1}^{B_t} V_i - \sum_{j=1}^{m_t} I_j \rightarrow \min \quad \forall t \in [0, T], \quad (1)$$

где V_i — номинальный ток i -й шины; I_j — ток потребления j -м потребителем; B_t — число задействованных в момент t шин; m_t — число потребителей, подключенных к шинам в момент времени t ; T — длительность выполнения маршрутного задания.

Минимизация разности (1) при условии обеспечения всех потребителей током достигается путем минимизации суммарного номинального тока шин. Суммарный номинальный ток шин определяется числом шин, подсоединенным к источникам тока. Поэтому необходимо так организовать подключение потребителей к шинам, чтобы число шин было минимальным.

При решении второй задачи — управления гибридной СГРЭ — разделим всех потребителей условно на два множества — множество постоянных потребителей и множество переменных потребителей. Постоянными потребителями назовем устройства, приборы и механизмы, без которых движение АНПА невозможно и удельное потребление тока которых с течением времени не меняется, например, система управления, вычислительные модули и др.; переменными назовем потребителей, которые периодически включаются/выключаются: носовые рули, уравнительно-дифференциальная система и др.

Пусть модель подключений потребителей к шинам имеет вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu.$$

Состояния подключений всех потребителей к шинам запишем в виде матрицы вида:

$$A = [A_c \ A_v],$$

где A_c — матрица постоянных потребителей размерности $j \times j_c$, $0 < j_c < j$; A_v — матрица переменных потребителей размерности $j \times (j - j_c)$.

$$A_c = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j_c} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j_c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & a_{jj_c} \end{bmatrix}, \quad A_v = \begin{bmatrix} a_{1j_c+1} & a_{1j_c+2} & \dots & a_{1j} \\ a_{2j_c+1} & a_{2j_c+2} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{jj_c+1} & a_{jj_c+2} & \dots & a_{jj} \end{bmatrix}.$$

Строки матрицы A содержат значения токов всех постоянных потребителей. Значения токов переменных потребителей равны нулю. Матрица B по структуре полностью совпадает с матрицей A ,

однако значения элементов матрицы B отличаются: на местах постоянных потребителей стоят нули, а на местах переменных потребителей — значения потребляемых ими токов.

Обозначим элементы матриц A и B через a_{ij} , $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$; i — номер шины, j — номер потребителя, подключенного к i -й шине, n — число потребителей, характеризуемых током потребления.

Состояние x_t характеризуется оптимальным подключением потребителей к шинам в момент времени t , при котором целое число шин B_t минимально, и разбиение множества $\{1, \dots, n\}$ на B_t подмножеств $S_1 \cup \dots \cup S_{B_t}$ такое, что $\sum a_{ij} \leq V_k$, $k = 1, \dots, K$. Индекс k обозначает различные типы источников тока, характеризующиеся ограничениями по току, K — число типов источников тока. Оптимальность подключения в формализованном виде выразим таким образом:

состояние x_t в момент времени t таково, что:

$$B_t = \sum_{i=1}^n y_i \rightarrow \min \quad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq V_k y_i, \\ i \in \{1, \dots, n\}, \quad j \in \{1, \dots, n\}, \quad k \in \{1, \dots, K\},$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j \in \{1, \dots, n\},$$

$$y_i \in \{0; 1\}, \quad i \in \{1, \dots, n\},$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad j \in \{1, \dots, n\},$$

где $y_i = 1$, если потребитель подключен к i -й шине, $y_i = 0$ — если не подключен; $x_{ij} = 1$, если потребитель j подключен к шине i и $x_{ij} = 0$, если не подключен.

Пусть в момент времени $t + 1$ часть потребителей больше не нуждается в электропитании, а другая часть, наоборот, требует подключения к шинам. Обозначим оптимальное состояние подключения потребителей к шинам в момент времени $t + 1$ через x_{t+1} .

Необходимо найти эффективное управление u_t , переводящее подключения потребителей тока из одного оптимального состояния x_t в другое оптимальное состояние x_{t+1} . Иными словами, необходимо определить такое u_t , при котором B_{t+1} было бы минимальным $\forall t \in [0, T]$. Минимальное значение B_t далее будем обозначать opt [6].

Таким образом, для нахождения эффективного управления гибридной СГРЭ необходимо определить:

- оптимальное распределение потребителей между шинами в момент времени $t + 1$;
- эффективное управление гибридной СГРЭ, переводящей ее из оптимального состояния в момент времени t — в оптимальное состояние на момент времени $t + 1$.

2. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Анализ причин возникновения необходимости управления гибридной СГРЭ показал:

— при увеличении потребления одним из уже подключенных к шине потребителей возможно два исхода: первый — имеющаяся шина допускает увеличение тока потребления и второй — увеличение тока потребления приводит к превышению номинального тока данной шины;

— при включении/выключении дополнительных потребителей возможны также два исхода: первый — подключение к произвольной шине, допускающей такое подключение, и второй — отсутствие свободного ресурса среди задействованных шин, который позволил бы подключить дополнительного потребителя без превышения номинального тока. В этом случае необходимо либо запускать новую шину и переключать потребителя к ней, либо провести полное переключение имеющихся потребителей с целью высвобождения свободного ресурса для подключения нового потребителя. Выбор подключения при этом зависит от дальнейшего развития событий. Если новый потребитель имеет постоянное потребление, например, переключатель руля, то перераспределение потребителей по шинам оправдано. Если же потребление переменное, например, подруливающим устройством с переменной скоростью вращения винтов, то уже с учетом этого — рассмотреть возможные варианты решения, исходя из предельного потребления тока этим исполнительным устройством;

— при полном изменении подключений всех потребителей к шинам необходим полный пересмотр состояния гибридной СГРЭ в части используемых источников питания и подключений потребителей к шинам.

Таким образом, по результатам анализа причин и последствий выявлено, что все рассмотренные ситуации можно свести к двум типам управления: первый — при котором заранее неизвестно, какой из потребителей будет подключен и какой ток он будет потреблять; второй — при котором известен состав потребителей и объем потребляемого ими тока, например, при смене скоростного режима движения АНПА.

Рассмотрим существующие в настоящее время подходы к решению задач, подобных описанным.

По своей сути рассматриваемая задача эффективного подключения потребителей к шинам близка к «задаче об упаковке элементов в контейнеры» [6], которая заключается в необходимости размещения элементов по контейнерам так, чтобы совокупный объем элементов в каждом контейнере не превышал его объем, а число заполненных контейнеров оказалось минимальным. В данном случае контейнерами служат шины, а элементами — потребители. Задача часто встречается в прикладных областях, например, в задаче планирования в системах связи [7] и при оптимизации загрузки транспортного средства [8]. Такая задача является NP-трудной комбинаторной задачей [8, 9]. Для решения задачи упаковки в контейнеры имеется большое число разнообразных решений, одно из которых — метод простого перебора [10, с. 39—42]. Такой подход целесообразен при небольшом числе элементов — в пределах десятка. С увеличением же числа элементов возрастает число перебираемых вариантов, и решение уже не укладывается в разумное время. В рассматриваемой задаче число одних только исполнительных устройств, вычислительных модулей и других потребителей, обеспечивающих движение АНПА — свыше полусотни. Поэтому метод перебора для решения рассматриваемой задачи неприемлем.

Поскольку принятие решения о распределении потребителей по шинам должно приниматься в реальном масштабе времени и практически мгновенно, то альтернативой методу простого перебора служат эвристические алгоритмы. Все существующие эвристические алгоритмы решения задачи об упаковке в контейнеры основаны на жадном алгоритме, в котором на каждом шаге делается локально наилучший выбор в предположении, что итоговое решение будет оптимальным.

Для двух вариантов ситуации с управлением необходимо выбрать наиболее подходящие алгоритмы: первый — при внезапном добавлении нового потребителя или его переключении на другую шину и второй — в случае планового изменения состава потребителей.

Для выбора наиболее подходящего решения из имеющихся рассмотрим подробнее особенности имеющихся эвристических алгоритмов.

3. ОПТИМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В этом случае заранее множество используемых исполнительных устройств, являющихся элементами, неизвестно, и необходимость подключения исполнительных устройств наступает последова-



тельно. Для таких условий наиболее известными являются алгоритмы [7, 10, с. 30, 11]:

- следующий подходящий Next Fit (NF);
- первый подходящий First Fit (FF);
- лучший подходящий Best Fit (BF).

В соответствии с алгоритмом «следующий подходящий (NF)» элемент назначается в текущий выбранный контейнер, если имеется достаточно емкости, в противном случае — к следующему контейнеру. Для рассматриваемой задачи это означает, что новый потребитель подключается к текущей шине при отсутствии превышения номинального тока, в противном случае — к анализу возможности подключения к следующей по порядку шине и анализ возникновения превышения номинального тока. Так продолжается до тех пор, пока не будет найдена шина, к которой возможно подключение без превышения номинального тока.

В соответствии с алгоритмом «первый подходящий (FF)» для каждого элемента контейнеры рассматриваются в порядке поступления (без сортировки) и выбирается первый контейнер с достаточным количеством свободного ресурса. Переходя к потребителям, это означает, что новый потребитель подключается к первой по порядку шине при отсутствии превышения номинального тока, в противном случае — к анализу следующей по порядку шине и анализ отсутствия превышения номинального тока и т. д.

В соответствии с алгоритмом «лучший подходящий (BF)» элементы рассматриваются в произвольном порядке, на каждом шаге из всех контейнеров выбирается контейнер с наименьшим достаточным количеством емкости. Переходя к потребителям, это означает, что новый потребитель подключается к шине, у которой наименьший свободный ресурс среди шин, к которым он мог бы быть подключен при отсутствии превышения номинального тока.

Жадные алгоритмы характеризуются асимптотической точностью. Асимптотическая точность определяется как отношение в наихудшем случае числа контейнеров, назначаемое процедурой, к числу контейнеров, получаемому оптимальным алгоритмом при стремлении числа элементов к бесконечности. Согласно известным теоретическим результатам [9], алгоритм NF имеет асимптотическую точность 2, алгоритмы FF и BF — асимптотическую точность 1,7 [10, с. 30].

Алгоритм NF подходит для применения на текущий момент без учета прогнозных оценок, и может оказаться, что в каждой шине имеется небольшой свободный ресурс. Поэтому если в следующий момент времени появится еще один потребитель, то среди оставшихся небольших свободных

ресурсов найти возможность для его подключения будет сложнее. Поэтому целесообразно было бы подключить потребителя так, чтобы он заполнил одну из шин до предела, тогда останется свободный ресурс для подключения дополнительных потребителей без увеличения числа шин. При предложенном подходе свободные ресурсы могут оказаться во многих шинах, но они будут такими малыми, что не позволят подключить дополнительного потребителя. Аналогичные соображения можно высказать по алгоритму FF: да, можно найти шину со свободным ресурсом, но если прогнозировать на будущее, то из всех вариантов надо выбрать такой, чтобы как можно большее число контейнеров имело наименьшие свободные ресурсы. Именно такому подходу соответствует алгоритм FD, особенность которого состоит в подключении к шине, у которой после этого останется минимальный свободный ресурс. Это означает, что в данном случае для данного контейнера разность между номинальным током и током потребления — минимальна. Кроме того, из-за того, что элемент не поместили в первый достаточный контейнер (FD), то в нем образовался свободный ресурс, который можно при необходимости использовать при непрерывном увеличении тока потребления потребителя, подключенного к данной шине.

Поэтому наиболее подходящим для рассматриваемой задачи является алгоритм FD.

Алгоритм распределения потребителей по шинам, основанный на применении алгоритма FD, в рассматриваемой задаче содержит следующие шаги.

Шаг 1. Берем очередную по списку шину из всех задействованных.

Шаг 2. Оцениваем возможность подключения текущего потребителя;

Шаг 3. Анализируем:

— если потребитель может быть подключен к выбранной шине, то анализируем дальше, для чего переходим к шагу 4;

— в противном случае переходим к шагу 1.

Шаг 4. В случае возможности подключения текущего потребителя оцениваем оставшийся ресурс и его запоминаем:

— если это не последняя шина, то переходим к шагу 1;

— в противном случае (т. е. когда рассмотренная шина последняя) переходим к шагу 5.

Шаг 5. Сортируем шины по убыванию свободного ресурса, переходим к шагу 6.

Шаг 6. Выбираем шину с наименьшим свободным ресурсом, который возникает после подключения, и подключаем нового потребителя к этой шине.

По результатам описанного эвристического алгоритма удается сформировать шину с нулевым свободным ресурсом или с минимальным свободным ресурсом.

4. ОПТИМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Для распределения потребителей по шинам в случае полного пересмотра параметров гибридной СГРЭ лучше всего подходят алгоритмы, ориентированные на использование полной информации о подключаемых потребителях. Такими алгоритмами являются стратегия «первый подходящий по убыванию» First Fit Decreasing (FFD) и «лучший подходящий по убыванию» Best Fit Decreasing (BFD) [7, 10, с. 30, 11].

В алгоритме FFD элементы рассматриваются в порядке убывания требуемого свободного ресурса тока и назначаются в *первый контейнер*, куда они помещаются.

В алгоритме BFD элементы рассматриваются в порядке убывания требуемого свободного ресурса и назначаются в *контейнер с наименьшим достаточным количеством свободного ресурса*.

По сравнению с алгоритмом FFD, алгоритм BFD позволяет сформировать такую упаковку, при которой элементы упорядочиваются по убыванию размеров и постепенно упаковываются в контейнер, в котором после этого останется минимальный свободный объем. В рассматриваемой задаче использование такого подхода означает, что для данной шины разность между номинальным током и током потребления выражения (1) — минимальна. Кроме того, из-за того, что элемент не поместили в первый достаточный контейнер (FFD), то в нем образовался свободный ресурс, который можно при необходимости использовать по методу FD при непрерывном увеличении тока потребления.

Согласно известным теоретическим результатам [9], FFD и BFD имеют асимптотическую точность $11/9$.

В соответствии с предложенным алгоритмом потребителей упорядочивают по не возрастанию потребляемого тока и последовательно подключают к той шине, у которой после подключения остается наименьший свободный ресурс. Распределение потребителей по шинам с использованием алгоритма BFD в рассматриваемой задаче выглядит следующим образом:

- 1) сортируем шины в порядке убывания токов, пропускаемых ими;
- 2) сортируем потребителей в порядке убывания потребляемого ими тока;
- 3) берем шину с самым большим током из имеющихся;

4) берем потребителя с самым большим потребляемым током из имеющихся;

5) анализируем:

— если потребитель может быть подключен к выбранной шине, то его подключаем; переходим к п. 4;

— если потребитель не может быть подключен к выбранной шине, то берем следующего за ним потребителя из множества потребителей и переходим к п. 5;

— если в результате полного перебора потребителей не нашлось ни одного, ток потребления которого меньше свободного ресурса, то переходим к п. 3.

Процесс завершается тогда, когда все потребители оказываются подключенными к шинам.

По результатам описанного эвристического алгоритма удается заполнить шины так, что свободный ресурс — нулевой или минимальный, и одну шину — с максимальным свободным ресурсом.

Шина с максимальным свободным ресурсом может быть впоследствии удачно использована при возможном дополнении этой шины вновь подключаемыми потребителями: чем больше свободный ресурс, тем больше шансов подключить нового потребителя к данной шине.

Получение оптимального распределения потребителей по шинам в различных ситуациях позволяет перейти к решению задачи оптимального управления гибридной СГРЭ при переходе из одного состояния в другое.

5. ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СГРЭ

Управление гибридной СГРЭ заключается в изменении ее состояния, определяемого параметрами — числом источников питания, а значит, и шин, и распределением потребителей по шинам.

Пусть АНПА движется с постоянными параметрами, движение устойчивое. Пусть в некоторый момент времени возникла необходимость переключения потребителей. Для определения эффективного управления, переводящего подключения из оптимального состояния на момент времени t в оптимальное состояние на момент времени $t + 1$, проанализируем, к какому из вариантов можно отнести сложившуюся ситуацию:

— увеличение потребления в пределах номинального тока той шины, к которой подключен данный потребитель;

— увеличение потребления, приведшее к выходу за пределы номинального тока, в связи с чем требуется переключение;

— полное переключение потребителей.

В первом случае никаких переключений производить не требуется. Во втором случае отключаем потребителя с увеличивающимся уровнем потреб-



ления, из-за которого произошло превышение номинального тока и в соответствии с предложенным решением ВФ пытаемся найти ему место на других шинах. Если такой шины не находится, то дополнительно запускаем новую шину и подключаем его к ней. В третьем случае происходит полный пересмотр подключений, и для выбора нового эффективного подключения применяем алгоритм ВFD. При полном переключении целесообразно сохранить преемственность подключений, поэтому при выборе варианта подключения к конкретным шинам необходимо сначала проанализировать и выбрать вариант с наибольшим числом совпадений подключений потребителей к шинам на моменты времени t и $t + 1$. Для этого в цикле по каждому используемому ранее потребителю перебираем шины, используемые в момент t : если потребитель был подключен к рассматриваемой шине, то подключаем его к этой же шине, где он был. И далее к этой шине подключаем тех потребителей, которые определены на момент времени $t + 1$ принадлежат на момент t этой же шине. Соответственно, из дальнейшего рассмотрения изымаем вновь подключенных на момент $t + 1$ потребителей. Далее переходим к рассмотрению следующего еще неподключенного используемого в момент t потребителя и в цикле по оставшимся шинам определяем его подключение. Так происходит до тех пор, пока все используемые ранее потребители не будут подключены к шинам. Оставшихся новых потребителей на момент $t + 1$ подключаем на оставшиеся шины.

Тем самым будет достигнуто оптимальное состояние подключений на момент времени $t + 1$. В результате будет получено состояние x_{t+1} , выраженный оптимальным подключением потребителей к шинам на момент $t + 1$.

В формализованном виде оптимальное управление определяется следующим образом.

Пусть в момент t оптимальное решение по приведенному выше алгоритму имеет вид B_t , а вектор y_t имеет вид: $y_t(t) = [y_1(t) \dots y_n(t)]$.

Пусть в процессе выполнения задания известно, что в момент $t + 1$ необходимо отключить одних потребителей и подключить других. Тогда следуя формуле (2), на момент $t + 1$ в результате применения предложенного эвристического алгоритма получим решение $y_t(t + 1) = [y_1(t + 1) \dots y_n(t + 1)]$ такое, при котором:

$$B_{t+1} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $B_{t+1} = \sum_{i=1}^n y_i(t + 1)$. Тогда искомое управление u_t определяется выражением $u(t) = y(t + 1) - y(t)$.

Продemonстрируем на примере применение предложенного эвристического алгоритма управления гибридной СГРЭ.

6. ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СГРЭ

Рассмотрим выполнение АНПА маршрутного задания, включающего в себя два этапа, отличающихся параметрами движения АНПА. На первом этапе АНПА движется с высокой скоростью для скорейшего прибытия в заданный район, и в момент времени t поступает команда о переходе к моменту времени $t + 1$ на второй этап. На втором этапе АНПА от скоростного движения переходит в режим позиционирования практически с нулевой скоростью — для осуществления поисковых работ (обследование дна, трубопровода и др.) с помощью активного гидролокатора. Необходимо определить эффективное управление СГРЭ.

Для определения эффективного управления СГРЭ проанализируем, к какому варианту следует отнести переход от первого этапа (момент времени t) ко второму (момент времени $t + 1$). Поскольку полностью сменился скоростной режим, то данная ситуация подпадает под вариант полного переключения потребителей по шинам, поэтому для решения применяется эвристический алгоритм ВFD.

Пусть матрица A_c состоит из элементов — постоянных потребителей:

— движения: кормовые рули (КР) — 1 А, уравнительно-дифференциальная система (УДС) — 2 А;

— источников тока: ЭХГ — 3 А, хранилище реагентов (ХР) — 4 А;

— вспомогательные системы в обеспечение движения: подсистема навигации (ПН) — 9 А; (для безопасности движения), пассивный режим освещения обстановки (ПОО) — 10 А (для безопасности движения);

— общие обеспечивающие элементы: вычислительные модули (ВМ) — 11 А.

Потребление постоянными потребителями выражается множеством из 7 элементов с потреблением (в амперах): {1 2 3 4 9 10 11}; всего суммарное потребление составило 40 А.

Множество переменных потребителей зависит от конкретной ситуации.

На этапе движения АНПА в заданную точку работают: носовые рули (НР) — 5 А, лаг абсолютный (ЛА) — 6 А, лаг относительный (ЛО) — 7 А, гидроакустическая навигационная система (ГАНС) — 8 А. Общее потребление переменными потребителями составило 26 А.

При прибытии в заданную точку перечисленные выше системы отключаются, зато подключаются: вертикальные подруливающие устройства (ВПУ) — 5 А, горизонтальные подруливающие устройства (ГПУ) — 6 А, активное освещение обстановки (АОО) — 14 А. Общее потребление переменными потребителями составило 25 А.

Таким образом, на первом и втором этапах переменные потребители характеризуются: различным составом, различным числом потребителей: 4 на первом этапе и 3 — на втором этапе, различным суммарным потреблением: 26 и 25 А.

На первом этапе общее потребление постоянными и переменными потребителями составило 66 А, на втором — 65 А.

Матрица A , описывающая рассматриваемый тактический эпизод, содержит 7 постоянных и 7 переменных потребителей; из переменных потребителей 4 использовались на первом этапе, а 3 использовались на втором этапе.

Пусть ток шин одинаковый и равен 34 А.

Матрица A в момент времени t имеет вид:

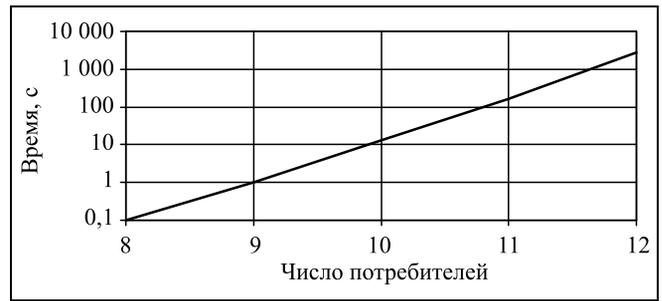
$$A = [A_{\text{КР}} A_{\text{УДС}} A_{\text{ЭХГ}} A_{\text{ХР}} A_{\text{ПН}} A_{\text{ВМ}} A_{\text{ПОО}} A_{\text{НР}} A_{\text{ЛА}} A_{\text{ЛО}} A_{\text{ГАНС}} A_{\text{ВПУ}} A_{\text{ГПУ}} A_{\text{АОО}}].$$

После подстановки вместо элементов соответствующих значений потребляемого тока матрица A примет вид:

$$A = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \end{array} \right] \end{array}$$

постоянные потребители
переменные потребители на 1 этапе
переменные потребители на 2 этапе

Вертикальные линии отделяют постоянных и переменных потребителей. Переменные потребители, в свою очередь, также разграничены вертикальной линией на потребителей, задействованных на первом этапе, и потребителей, задействованных на втором этапе.



Зависимость времени счета от числа потребителей

При алгоритме полного перебора потребовалось бы проанализировать $11!$ вариантов на первом этапе и $10!$ — на втором этапе, что составило бы 39 916 800 и 3 628 800 вариантов соответственно. При использовании процессора персонального компьютера $i3$ зависимость времени счета от числа вариантов представлена на рисунке.

Видно, что на перебор в случае 10-ти потребителей потребовалось бы около 20 с, а при 11-ти потребителях — свыше 3 мин.

Для применения разработанного эвристического алгоритма сформировано множество элементов, включающих в себя постоянных (выделены полужирным шрифтом) и переменных потребителей на первом и втором этапах:

{**1 2 3 4 9 10 11** 6 7 8 0 0} на первом этапе;
 {**1 2 3 4 9 10 11** 0 0 5 6 14} на втором этапе.

Было получено решение y_{ij} и B_i на момент времени t на первом этапе — при переходе АНПА в заданную точку.

Результатом решения оказалась подключение 11-ти потребителей к двум шинам:

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad B_t = 2.$$

Оптимальное распределение 11 потребителей по шинам таково — к первой шине подключены: хранилище реагентов (4 А), подсистема навигации (9 А), вычислительные модули (10 А), пассивный режим освещения обстановки (11 А) — всего в сумме 34 А, поэтому у первой шины свободного ресурса не осталось; ко второй шине подключены: рули кормовые (1 А), уравнительно-дифференциальная система (2 А), электрохимический генератор (3 А), пассивный режим освещения обстановки (5 А), лаг абсолютный (6 А), лаг относительный (7 А), гидроакустическая навигационная система (8 А) — всего 32 А, поэтому свободный ресурс составил 2 А.

Для сравнения задача оптимального распределения потребителей по шинам решалась с помощью алгоритма простого перебора, гарантирующе-



го получение оптимального решения. По результатам полного перебора был выбран оптимальный вариант подключения потребителей к шинам, число которых также оказалось равным двум, как и при работе разработанного эвристического алгоритма. Таких вариантов, в которых число шин равно двум, оказалось несколько.

Затем определялось оптимальное распределение потребителей по шинам на втором этапе — на момент времени $t + 1$. По результатам применения разработанного эвристического алгоритма было получено решение y_{ij} и B_{t+1} . Оказалось, что в момент времени $t + 1$ потребители также распределились по двум шинам:

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$B_{t+1} = 2.$$

Распределение произошло следующим образом. К первой шине подключены: активное освещение обстановки (14 А), пассивный режим освещения обстановки (11 А), подсистема навигации (9 А), всего в сумме 34 А, поэтому свободного ресурса на первой шине — не осталось. Ко второй шине подключены: кормовые рули (1 А), уравнительно-дифференциальная система (2 А), электрохимический генератор (3 А), хранилище реагентов (4 А), вертикальные подруливающие устройства (5 А), горизонтальные подруливающие устройства (6 А), вычислительные модули (10 А), всего в сумме 31 А, поэтому свободный ресурс составил 3 А.

Для формирования эффективного управления, переводящего подключение из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t + 1$, сравнивались результаты распределения потребителей по шинам на указанные моменты времени, соответствующие каждому из этапов. В результате сравнения оказалось, что три элемента матрицы изменили свои значения, так как переключение по шинам поменялось, и кроме того, поменялось четыре знакоместа из-за подключения совершенно других потребителей.

Эффективное управление $u(t)$, переводящее подключение из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t + 1$, определялось с помощью выражения (3):

$$u_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Время счета, затраченное при работе предложенного эвристического алгоритма, составило доли секунды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача управления гибридной системой генерации и распределения электроэнергии, работающей синхронно с системой управления движением многоскоростного автономного необитаемого подводного аппарата. Проанализированы возможные причины переключения потребителей между токопроводами, которые подключены к источникам тока. Предложено эффективное управление системой генерации и распределения электроэнергии на основе эвристических алгоритмов Best Fit и Best Fit Decreasing, применение которых определяется текущей ситуацией. На численном примере наглядно показано определение эффективного управления гибридной системой генерации и распределения электроэнергии, обеспечивающей управление движением автономного необитаемого подводного аппарата при смене одного скоростного режима на другой. Показано многократное преимущество применения предложенного эффективного управления на основе эвристических алгоритмов по сравнению с методом простого перебора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Апполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.* О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сб. материалов XIII Всерос. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления». — Ростов-на-Дону — Таганрог, ЮФУ. — 2018. — С. 34—42. [*Appolonov, Ye.M., Bachurin, A.A., Gorokhov, A.I., Ponomarev, L.O.* On the possibility and necessity of creating an extra-large uninhabited underwater vehicle // Sat. XIII All-Russian materials. scientific-practical conf. «Perspective systems and management tasks». — Rostov-on-Don — Taganrog, SFU. — 2018. — P. 34—42. (In Russian)]
2. *Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Сурин С.Н.* Использование электрохимических генераторов на автономных необитаемых подводных аппаратах // Системы управления и обработки информации. СПб. — 2018. — Вып. 1 (40). — С. 61—68. [*Bakumenko, L.G., Dyadik, A.N., Surin, S.N.* The use of electrochemical generators on autonomous uninhabited underwater vehicles // Control and Information Processing Systems. SPb. — 2018. — Iss. 1 (40). — P. 61—68. (In Russian)]
3. *Пат. RU № 2534470.* Электроэнергетическая система для перспективных неатомных подводных лодок / Никифоров Б.В. Батрак Д.В., Чигарев А.В., Игнат'ев К.Ю. — 2014. — 6 с. [*Pat. RU No. 2534470.* Electric power system for advanced non-nuclear submarines / Nikiforov, B.V. Batrak, D.V., Chigarev, A.V., Ignat'yev, K.Yu. — 2014. — 6 s. (In Russian)]
4. *Bradley, A.M., Feezor, M.D., Singh, H., Sorrell, F.Y.* Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering 26 (4). — P. 526—538. — DOI: 10.1109/48.972089.
5. *Mendez, A., Leo, T.J., Herreros, M.A.* Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // Energies. — 2014. — No. 7. — P. 4676—4693. — DOI: 10.3390/en7074676.
6. *Смирнов А.В.* О задаче упаковки в контейнеры // Успехи математических наук. — 1991. — Т. 46. — № 4. —

- С. 173—174. [*Smirnov, A.V.* On the task of packaging in containers // *Uspekhi Matematicheskikh Nauk.* — 1991. — Vol. 46, no. 4. — P. 173—174. (In Russian)]
7. *Левин М.Ш.* Упаковка в контейнеры (перспективные модели, примеры) // Информационные процессы. — 2017. — Т. 17. — № 1. — С. 43—60. [*Levin, M.Sh.* Packaging in containers (perspective models, examples) // *Information processes.* — 2017. — Vol. 17, — no. 1. — P. 43—60. (In Russian)]
8. *Полева Е.А.* Оптимизация загрузки транспортного средства // Вопросы науки. — 2016. — Т. 1. — С. 79—85. [*Poleva, E.A.* Vehicle loading optimization // *Science issues.* — 2016. — Vol. 1. — P. 79—85 (In Russian)]
9. *Coffman, E.G., Garey, M.R., Johnson, D.S.* Approximation algorithms for bin packing: A survey // *Approximation algorithms for NP-hard problems.* — Boston: PWS Publishing Co., 1996. — P. 46—93.
10. *Вдовин П.М.* Жадные алгоритмы и стратегии ограниченного перебора для планирования вычислений в системах с жесткими требованиями к качеству обслуживания // Дисс. канд. физ.-мат. наук. — М., 2016. — 127 с. [*Vdovin, P.M.* Greedy algorithms and limited search strategies for planning computations in systems with strict requirements for the quality of service // *Diss. Cand. Phys.-Math. sciences.* — М., 2016. — 127 s. (In Russian)]
11. *Курейчик В.М., Потарусов Р.В.* Проблема одномерной упаковки элементов // Известия ТРТУ. Технические науки. — 2006. — № 8 (63). — С. 88—93. [*Kureichik, V.M., Potarussov, R.V.* The problem of one-dimensional packing of elements // *News of TRTU. Technical science.* — 2006. — No. 8 (63). — P. 88—93. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.В. Мещеряковым.

Поступила в редакцию 23.12.2019, после доработки 2.06.2020.
Принята к публикации 15.06.2020.

Мартынова Любовь Александровна — д-р техн. наук,
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург,
✉ martynowa999@bk.ru,

Киселев Николай Константинович — аспирант,
АО «ЦКБ «Лазурит», г. Санкт-Петербург,
✉ kiselevu@gmail.com,

Безрук Георгий Григорьевич — канд. воен. наук,
НИИ «Оперативно-стратегических исследований
строительства ВМФ», г. Санкт-Петербург, ✉ geoint99@mail.ru.

EFFECTIVE CONTROL OF A HYBRID SYSTEM OF GENERATION AND DISTRIBUTION OF ELECTRICITY FOR A MOVING AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

L.A. Martynova¹, N.K. Kiselev², G.G. Bezruk³

¹ CCRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

² CDB «Lazurit», St. Petersburg, Russia

³ RI OSSC Navy, St. Petersburg, Russia

¹✉ martynowa999@bk.ru, ²✉ kiselevu@gmail.com, ³✉ geoint99@mail.ru

Abstract. For the movement of an autonomous underwater vehicle (AUV), various actuators are used, which differ not only in the principle of operation, but also in the current consumption that varies over time. Because of this, power sources that are different in principle of action are needed. In this regard, the movement control of AUVs necessitates solving the problem of effective control of the energy generation and distribution system, which is understood as determining the necessary composition and parameters of power sources, as well as the distribution of consumers on buses under strict time limits. The purpose of the work is the development of effective control of the AUV energy generation and distribution system to ensure its movement with specified parameters. The analysis of connecting/disconnecting consumers revealed that all situations can be reduced to two types of control: the first one takes place when it is not known in advance which of the consumers will be connected and how much current it will consume; the second one takes place when the composition of consumers and the amount of current consumed by them are known. To determine the management of consumer switching, the task is formalized as the task of packing in containers, for the solution of which heuristic algorithms exist. An analysis of existing algorithms in relation to the problem to be solved allowed us to determine that the Best Fit and Best Fit Decreasing algorithms provide effective control of the power generation and distribution system. An example is given of controlling a hybrid system for generating and distributing electricity when changing the movement parameters of the apparatus.

Keywords: autonomous underwater vehicle, hybrid power generation and distribution system, heuristic algorithm.

Funding. The work was performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (project no. 20-08-00130).

