

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3/2019

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,
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. Угольниковский,
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.),
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. Пашенко

Редактор

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 Прохоров О. В.

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабикова

Отпечатано в ООО «Авансд седлюшнз»
Заказ № РВ319

Подписано в печать
16.05.2019 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

3.2019

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Коньков А.Е., Патров М.И.
Управление плазмой в токамаках. Ч. 3.1. Системы магнитного
управления плазмой в ITER 3

Анализ и синтез систем управления

Квинто Я.И., Хлебников М.В. Верхние оценки отклонений траекторий
в линейной динамической системе с ограниченными внешними
возмущениями 16

Управление в социально-экономических системах

Топка В.В. Расширенная модель инновационного проекта при бинарном
взаимном воздействии его работ 22

Егорова Л.Г., Мячин А.Л. Структура российского сообщества
экономистов и его отношение к российским экономическим журналам.
Ч. 1. Анализ методами латентных классов и теории коллективного
выбора 30

Стельмах В.С. Разработка и апробация логистической модели оценки
банкротства промышленных предприятий 43

Информационные технологии в управлении

Чесноков М.Ю. Поиск аномалий в задаче повышения качества
открытых данных 53

Управление сложными технологическими процессами и производствами

Промыслов В.Г., Семенков К.В., Шумов А.С. Синтез архитектуры
кибербезопасности для систем управления атомных электростанций . . . 61

Управление подвижными объектами и навигация

Ефремов А.Ю., Легович Ю.С. Стайное управление малыми
беспилотными летательными аппаратами в среде с препятствиями . . . 72

Хроника

80 лет Институту проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН . . . 81

**XXVI международная конференция «Проблемы управления
безопасностью сложных систем»** 83



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

Editors

N. E. Maksimova, 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 Prokhorov O. V.

Printed by Advanced Solutions LLC

Order No. PB319

Approved for print on 16.05.2019

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
on the platform Web of Science
and in the list of peer-reviewed
scientific publications of the HAC

The journal is included into the Russian
Science Citation Index (RSCI in Web
of Science). 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

3.2019

CONTENTS

Surveys

Mitrishkin, Y.V., Kartsev, N.M., Konkov, A.E., Patrov, M.I. Plasma Control
in Tokamaks. Part 3.1. Plasma Magnetic Control Systems in ITER 3

Analysis and Synthesis of Control Systems

Kvinto, Ya.I., Khlebnikov, M.V. Upper Bounds of the Trajectories Deviations
in Linear Dynamical System with Bounded Exogenous Disturbances 16

Control in Social and Economic Systems

Topka, V.V. Extended Model of the Innovative Project with Binary
Interaction of its Activities 22

Egorova, L.G., Myachin, A.L. Structure of Russian Scientific Economic
Community and its Attitude to Russian Economic Journals. Part 1: Analysis
by Methods of Latent Classes and Social Choice Theory 30

Stelmakh, V.S. Development and Testing of Logit-Model to Estimate
Bankruptcy of Industrial Enterprises 43

Information Technologies in Control

Chesnokov, M.Yu. Anomaly Detection for Open Data Quality
Improvement 53

Control of Complex Technological Processes and Productions

Promyslov, V.G., Semenov, K.V., Shumov, A.S. Security Model
for Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants 61

Moving Objects Control and Navigation

Efremov, A.Yu., Legovich Yu.S. Flocking Control of Small Unmanned Aerial
Vehicles in Obstacle Field 72

Chronicle

80 Years Anniversary of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
of Russian Academy of Sciences 81

XXVI International Conference «The Problems of Complex Systems
Security Control» 83

УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМОЙ В ТОКАМАКАХ¹

Ч. 3.1. Системы магнитного управления плазмой в ITER²

Ю.В. Митришкин, Н.М. Карцев, А.Е. Коньков, М.И. Патров

Аннотация. Представлены системы магнитного управления плазмой для ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor — Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор — ИТЭР). Системы включают в себя оригинальные технические решения систем управления положением, током и формой плазмы для двух версий ITER — ITER-1 и ITER-2, в том числе предложенные и выполненные в ИПУ РАН. Отмечено, что в ITER-1 положение и форма плазмы управлялись всеми RF-обмотками и робастными H_{∞} -регуляторами, а для снижения пиков мощности управления при подавлении малых срывов применялся дополнительный нелинейный контур без существенного изменения отклонений зазоров между сепаратрисой плазмы и первой стенкой. В ITER-2 для стабилизации вертикальной скорости плазмы относительно нуля применен специальный контур с быстрым выпрямителем напряжения, а для управления током и формой плазмы разработаны каскадные системы управления с развязкой и без развязки каналов управления, с робастными H_{∞} -регуляторами и прогнозирующей моделью, а также с адаптивной стабилизацией вертикального положения плазмы. Для увеличения области управляемости по вертикали внутрь вакуумной камеры ITER-2 введены дополнительные обмотки горизонтального поля и исследованы возможности системы с новыми контурами управления вертикальным положением плазмы в присутствии шумов.

Ключевые слова: токамак, плазма, магнитное управление плазмой, ITER.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время флагманом в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза является ITER — International Thermonuclear Experimental Reactor (Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор, ИТЭР) [3]. Токамак-реактор ITER сооружается во Франции (г. Кадараш) международным консорциумом в составе Евросоюза, США, Японии, России, Китая, Индии и

Южной Кореи. Все наиболее продвинутые токамаки работают в поддержку ITER, чтобы обеспечить основное физическое понимание возможностей его надежной эксплуатации, в том числе, с помощью систем магнитного и кинетического управления плазмой.

Со стороны России для ITER был разработан ряд систем магнитного управления положением, током и формой плазмы, которые были промоделированы на плазмозфизических кодах DINA (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Троицк) и PET (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург). Ввиду своеобразия полоидальной системы ITER, связанной со сверхпроводящими обмотками полоидального поля, силами ИПУ РАН были разработаны робастные системы магнитного управления плазмой, способные работать в условиях неопределенности, вызванной немоделируемой динамикой плазмы как сложного не полностью

¹ В первой части [1] обзора рассматривались токамаки с плазмой в их магнитном поле совместно с диагностикой и управляющими устройствами как объекты управления. Во второй части [2] представлены системы для магнитного управления положением, током и формой плазмы, а также резистивными пристеночными модами в действующих токамаках.

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-08-00293 (Введение, § 1, 2) и РНФ, грант № 17-19-01022 (§ 3, 4, Заключение).

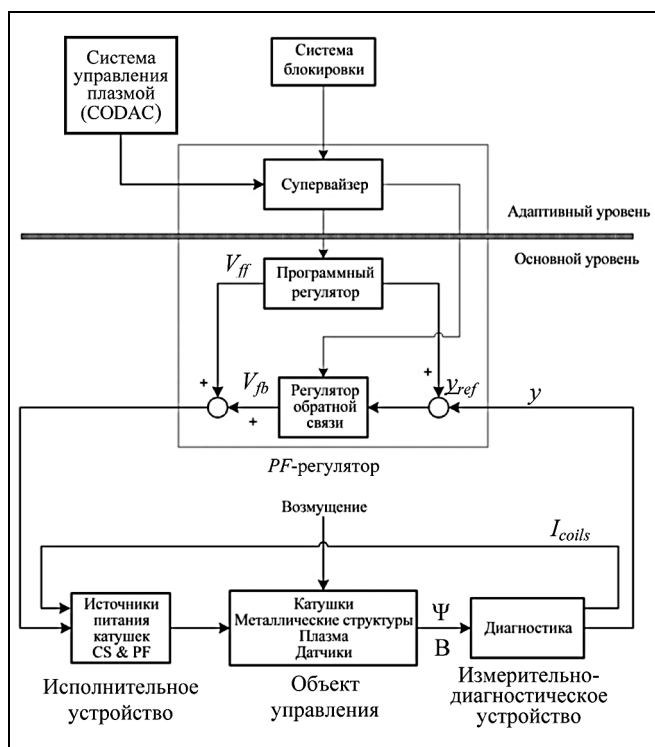


Рис. В.1. Структурная схема иерархической системы магнитного управления плазмой в ITER

изученного динамического объекта управления, в общей иерархической структурной схеме системы управления плазмой в ITER с учетом структурной схемы управления положением, током и зазорами между сепаратрисой плазмы и первой стенкой вакуумной камеры (рис. В.1) [4].

В структурной схеме магнитного управления плазмой в ITER (рис. В.1) устройство управления полоидальными полями (PF-регулятор, PF — Poloidal Fields) предположительно будет состоять из трех отдельных блоков, а именно: супервайзера, находящегося на верхнем (адаптивном) уровне управления, программного регулятора и регулятора обратной связи нижнего (основного) уровня. Основной уровень (контур) системы управления полоидальными полями включает в себя объект управления, состоящий из плазмы, катушек полоидального магнитного поля, пассивных металлических структур, датчиков, измерительно-диагностического устройства, исполнительного устройства, представляющего собой источники питания для центрального соленоида и катушек полоидальных полей; регулятора обратной связи и программного регулятора. Супервайзер, взаимодействуя с системой управления плазмой и системой блокировки, управляет работой основного уровня. Он выдает программные сигналы в темпе наблюдений и осуществляет адаптивную коррекцию регулятора

обратной связи примерно в 10 раз медленнее работы основного контура.

В настоящее время для первой термоядерной электростанции DEMO (DEMOstration Power Plant) также разрабатываются системы магнитного управления плазмой [5]. Здесь важна разработка полоидальной системы, которая бы не вынуждала вводить дополнительные обмотки для управления положением плазмы внутрь вакуумной камеры, как это было сделано в ITER-2 (см. § 1), что снижает надежность работы термоядерного реактора в стационарном режиме. Обмотки для эффективного управления положением плазмы, обеспечивающие достаточный диапазон области управляемости по вертикали при заданном ограничении на питающее напряжение при неустойчивости плазмы в вертикальном направлении, можно установить между вакуумной камерой и обмоткой тороидального магнитного поля, как это сделано в токамаке ASDEX Upgrade и проекте токамака T-15МД [2]. В японском DEMO [5] такие обмотки не предусмотрены, что требует дальнейшей разработки и исследования полоидальной системы DEMO.

1. ВАРИАНТЫ ПРОЕКТА И СЦЕНАРИЕВ РАБОТЫ ITER

В проекте ITER изначально разрабатывалась версия с самоподдерживающейся термоядерной реакцией ITER-1 с $Q = \infty$, а с 1998 г. — версия ITER-2 с $Q = 10$ (рис. 1.1, на третьей странице обложки, табл. 1.1) [4], где $Q = P_{out}/P_{in}$ — отношение выходной мощности термоядерного синтеза P_{out} к введенной мощности P_{in} .

В ITER было предложено управлять границей плазмы в диверторной конфигурации (нижняя X-точка) посредством управления расстояниями (в дальнейшем называемыми *зазорами*) между сепаратрисой и первой стенкой в шести различных

Таблица 1.1

Параметры плазмы в двух версиях ITER

Плазменные параметры	ITER-1	ITER-2
Ток плазмы, МА	21	15
Большой радиус, м	8,1	6,2
Малый радиус, м	2,8	2,0
Вытянутость	1,6	1,85
Мощность термоядерного синтеза, ГВт	1,5	0,5
Q	∞	более 10
Продолжительность горения, с	1000	400
Постоянная времени вертикальной неустойчивости плазмы, с	1,1	0,1

«УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМОЙ В ТОКАМАКАХ

Ч. 3.1. Системы магнитного управления плазмой в ITER» (с. 3–15)

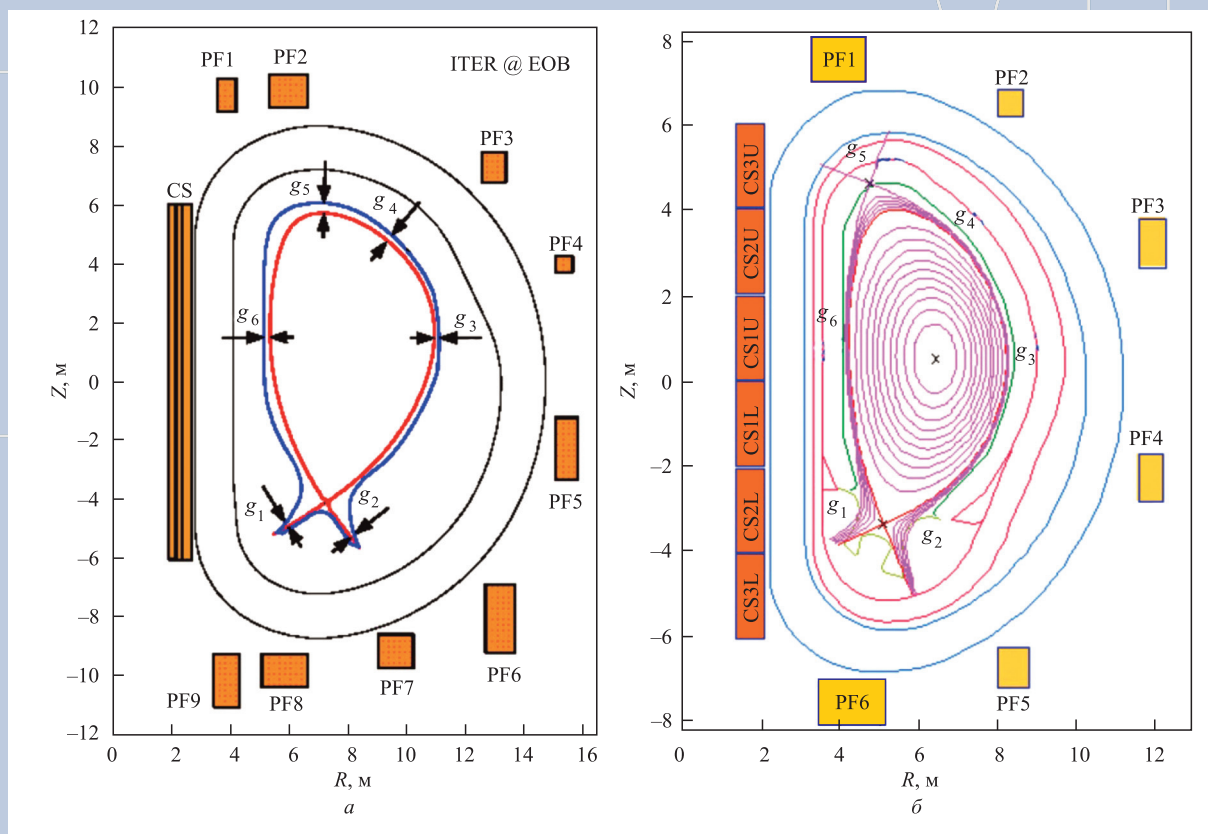


Рис. 1.1. Полоидальные системы и расположение управляемых зазоров g_1 – g_6 между сепаратрисой плазмы и первой стенкой: a – ITER-1; b – ITER-2

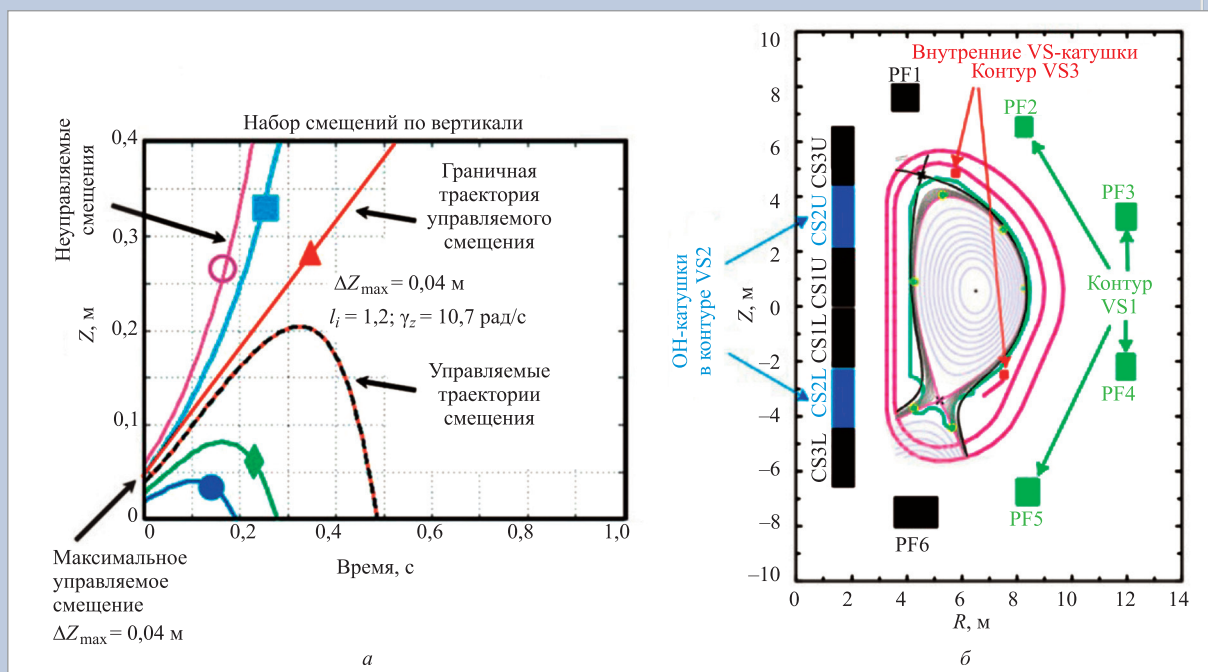


Рис. 4.1. Исследование области вертикальной управляемости и ITER-2 и ее расширение: a – экспериментальный метод оценки области управляемости ΔZ_{max} [24]; b – упрощенная концепция источника питания VS3 для обмотки горизонтального поля внутри камеры токамака [25]



точках, включая точки пересечения сепаратрисы с диверторными пластинами. Поперечное сечение плазмы, расположение девяти обмоток полоидального магнитного поля (PF1 — PF9) в ITER-1 и шести PF-обмоток (PF1 — PF6) в ITER-2, сплошного центрального соленоида (CS — Central Solenoid) в ITER-1 и шестисекционного CS в ITER-2, а также расположение управляемых зазоров между плазменной границей и поверхностью окружающих элементов представлены на рис. 1.1.

Отклонения сепаратрисы от заданного положения должны находиться в пределах ± 10 см, что составляет менее 5 % от большого радиуса плазмы. Расположения зазоров, показанные на рисунках, выбраны для обеспечения достаточно хорошего общего качества управления формой плазмы и, в то же время, для точного управления в ключевых точках, таких как диверторные ударные точки (g_1 , g_2) и граница плазмы перед ионно-циклотронной радиочастотной нагревающей антенной (g_3). Все катушки полоидального поля сверхпроводящие с относительно малой площадью поперечного сечения. Каждая катушка управляется преобразователем переменного тока в постоянный ток.

В ITER-1 неустойчивое вертикальное положение плазмы управляется всеми PF-обмотками и центральным соленоидом CS.

В ITER-2 для управления вертикальным положением плазмы или его скоростью предусмотрен специальный контур, а в последующей версии для этой цели добавочные обмотки горизонтального поля введены внутрь вакуумной камеры.

Сценарий работы ITER-2 включает в себя следующую последовательность фаз [3]: плазменный старт и рост плазменного тока, диверторное (X-точка) формирование, нагрев до зажигания, непрерывное управляемое горение, управляемое снижение термоядерной мощности и плазменного тока, прекращение существования X-точки, плазменное выключение (прекращение разряда). Требуемая эволюция плазменной конфигурации создается программным изменением полоидальных токов (программными компонентами) и добавлением управления посредством обратной связи. Можно определить две основные фазы, которые в наибольшей степени отличаются в смысле требований к управлению:

- лимитерная фаза, характеризующаяся ограниченной лимитером плазмой с относительно низким содержанием тепловой и магнитной энергии: требования к управлению не очень жесткие в течение такой фазы, и необходимо, в основном, только подавление вертикальной неустойчивости плазмы;
- диверторная фаза, в течение которой высокое содержание тепловой и магнитной энергии

представляет потенциальную опасность сохранению внешнего слоя плазмы и окружающих ее элементов; на этой фазе необходимо точное управление формой и током плазмы.

2. СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ITER-1

PF-регулятор (см. рис. В.1) должен быть способен управлять с заданным качеством базовыми (референсными) зазорами между плазмой и первой стенкой при действии специфицированных возмущений типа малого срыва (MD — Minor Disruption). При этом регулятор должен гарантированно стабилизировать вертикальное неустойчивое положение плазмы в ИТЭР-1 или стабилизировать вертикальную скорость плазмы относительно нулевого значения в ИТЭР-2.

Разработана H_∞ -система робастного управления током, положением и формой плазмы для версии термоядерного реактора ITER-1 с $Q = \infty$ [4, 6, 7] с H_∞ -NCF-регулятором в обратной связи (NCF — Normalized Comprime Factorization (взаимно-простая факторизация)). Робастная система слабо чувствительна к ошибкам и неопределенностям модели плазмы в токамаке. Она сохраняет устойчивость при большем разбросе магнитных конфигураций плазмы в ITER по сравнению с классическими системами, в частности, линейно-квадратичного управления. Впервые методом математического моделирования на плазмозфизическом коде DINA показано, что большой запас робастной устойчивости многомерной системы управления обеспечивает большее число магнитных конфигураций из базы данных ITER, для которых система управления стабилизирует положение сепаратрисы при действии MD-возмущений на диверторной фазе разряда [6, 7]. Исследование влияния возмущений типа ELM (Edge Located Modes — моды, локализованные на краю) показало незначительное увеличение амплитуды токов в обмотках полоидального поля по сравнению с их естественной амплитудой без обратной связи.

Дополнительно к линейному H_∞ -NCF-робастному регулятору в системе с обратной связью был разработан нелинейный блок коррекции полной мощности управления (Power Management System — PMS), позволяющий на 30—40 % уменьшать пики мощности при моделировании системы в присутствии MD-возмущений без существенного изменения поведения зазоров [4, 6, 7]. На рис. 2.1 приведена структурная схема замкнутой системы управления с линейным H_∞ -NCF-регулятором в обратной связи и нелинейным блоком коррекции.

Принцип действия блока коррекции состоит в следующем. Сигнал полной мощности управле-

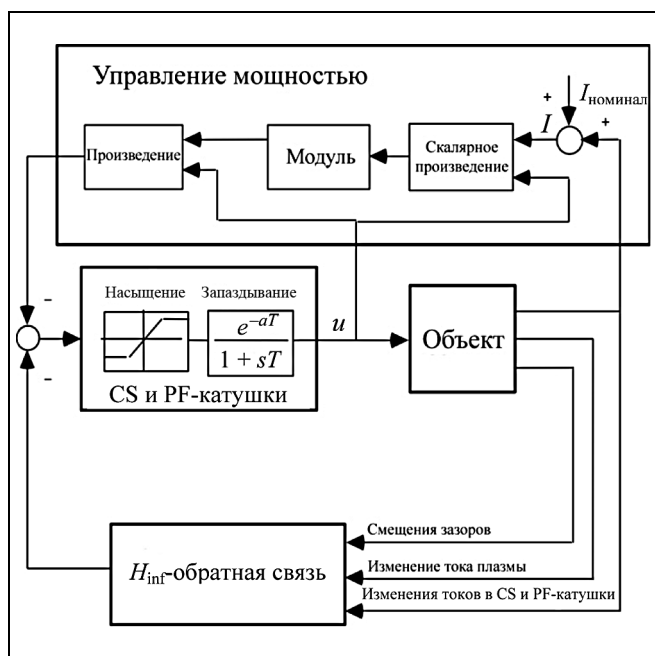


Рис. 2.1. Система управления с блоком коррекции полной мощности управления

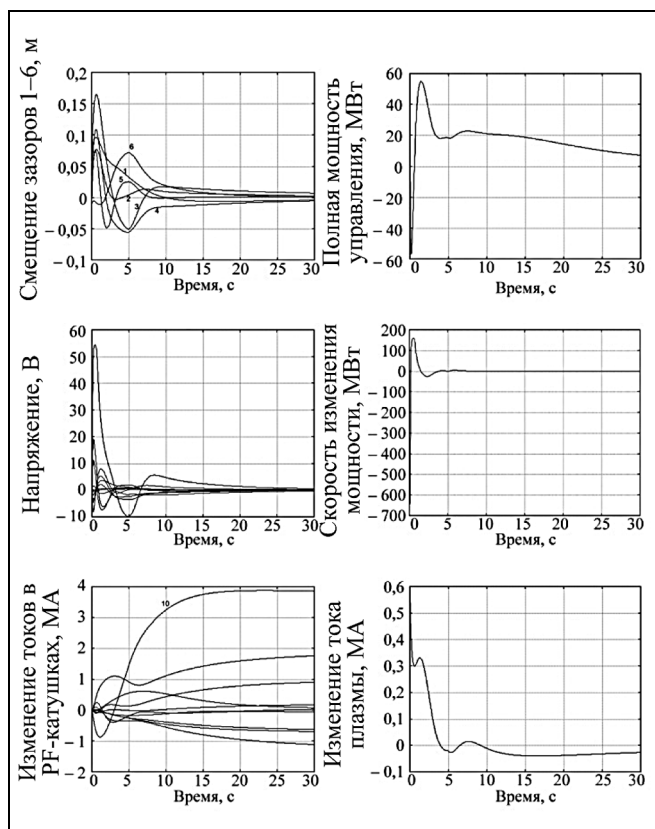


Рис. 2.2. Переходный процесс с H_{∞} -NCF-регулятором при возмущениях типа MDs (PET линейная модель, SOB точка сценария)

ния, представляющий собой сумму произведений токов I_n и напряжений обмоток управления u_n ,

$$p = \sum_{n=1}^{10} I_n u_n, \quad I_n = I_{eqn} + \delta I_n,$$

где I_{eqn} — ток в обмотке полоидального поля, задающий равновесие плазмы (см. рис. 2.1). Вектор корректирующих (добавочных) напряжений создается как произведение модуля мощности и напряжений на катушках управления в соответствии с зависимостью $\Delta u = -|p|u$. Этот вектор вводится в обратную связь для уменьшения входных напряжений при сильном возрастании мощности, что снижает пики мощности при действии возмущений.

Разработанные регуляторы были промоделированы в замкнутых системах управления на линейных (CREATE-L, PET-L, TSPS-L, CORSICA-L) и нелинейных (TSC, DINA, CORSICA, PET, MAXFEA, TSPS) моделях объекта при действии специфицированных возмущений типа MD и ELM. Моделирование показало, что системы с разработанными регуляторами отвечают техническим требованиям. В качестве примера на рис. 2.2 для системы с H_{∞} -NCF-регулятором в точке сценария SOB (Start of Burn — начало горения) на линейной модели PET-L приведены графики переходных процессов после малого срыва для вариаций зазоров, напряжений, токов полоидальных обмоток, полной мощности управления, ее производной, вариации плазменного тока.

3. СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ITER-2

Были предложены и применены новые принципы и системы управления плазмой для ITER-2, которые развивались при решении задач моделирования систем магнитного управления плазмой в ITER. Направленность развития систем связана с повышением их надежности, живучести и качества управления (быстродействия и точности).

(1) Синтез H_{∞} -системы управления на основе структурной схемы отражения внешнего возмущения (рис. 3.1—3.3) [4, 8, 9]. Структурная схема системы управления приведена на рис. 3.1, а [3]. Она состоит из двух контуров управления: первый скалярный контур служит для стабилизации вертикальной скорости плазмы относительно нуля, а второй многомерный контур предназначен для управления током плазмы и ее формой: шестью зазорами между сепаратрисой плазмы и первой стенкой (рис. 1.1, б). Для стабилизации вертикальной скорости плазмы применяется специальная схема (см. рис. 3.1, б), состоящая из параллельного соединения катушек PF2 — PF5 с соответствующ-

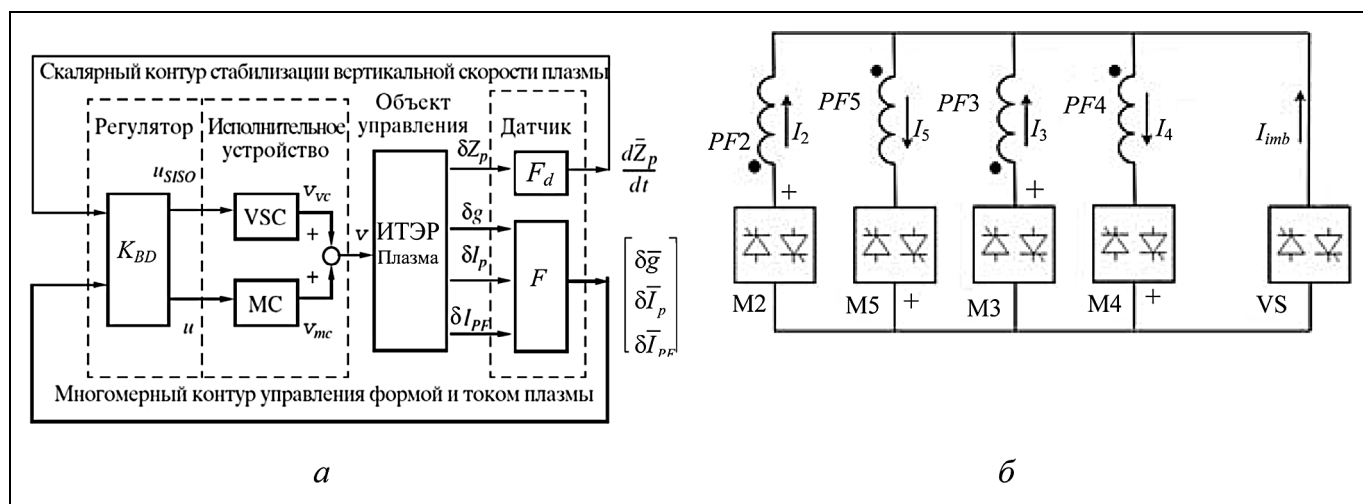


Рис. 3.1. Двухконтурная магнитная система управления ITER: *a* — VSC (Vertical Stabilization Converter) — преобразователь вертикальной стабилизации, MC (Main Converter) — основной преобразователь, K_{BD} (block-diagonal controller) — блок-диагональный регулятор, F_d — дифференцирующий фильтр, F — фильтр; *б* — схема подключения быстрого преобразователя напряжения для подавления вертикальной скорости плазмы, VS — тиристорный выпрямитель вертикальной стабилизации плазмы, M2–M5 — основные выпрямители для катушек PF2–PF5

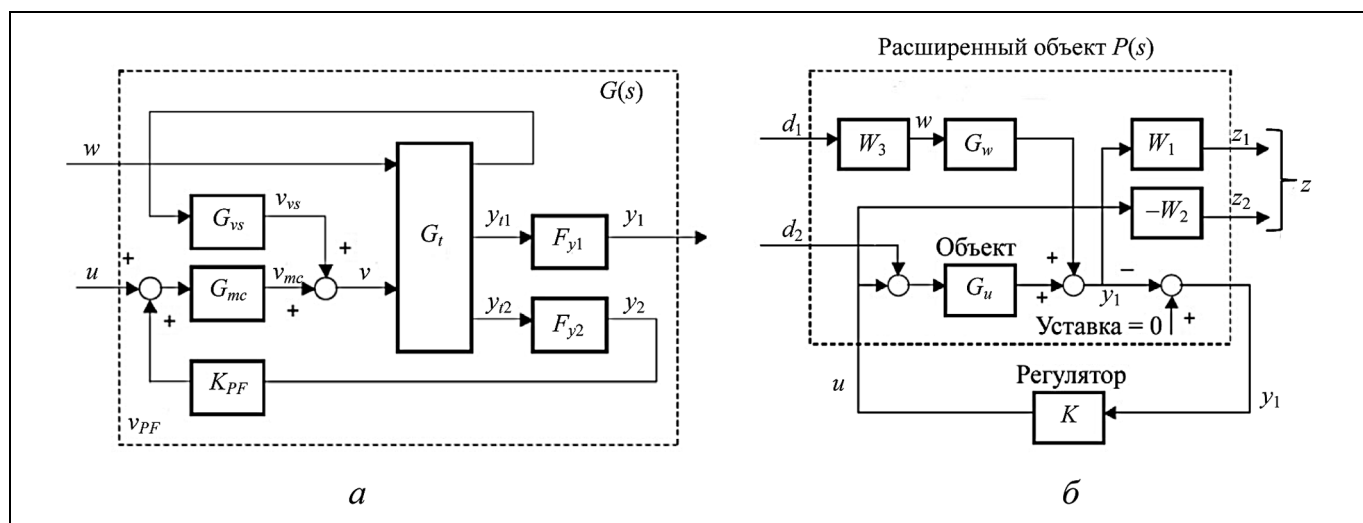


Рис. 3.2. Структурные схемы синтеза регуляторов: *a* — токов в CS&PF-обмотках, *б* — тока и формы плазмы

щей направленностью и медленными выпрямителями, к которым подключен быстрый выпрямитель VS (Vertical Stability — вертикальная устойчивость), непосредственно воздействующий на вертикальную скорость плазмы.

Вначале методом *loop shaping* разомкнутой системы [10] и смешанной чувствительности [11] были синтезированы робастные регуляторы и посредством μ -анализа сравнены между собой, а также с LQG-, Lead-Lag- и P-регуляторами. Регулятор типа *loop shaping* показал наименьший пик величины μ , т. е. наибольший запас робастной устойчивости [8].

Затем были синтезированы два блок-диагональных регулятора для управления скоростью вертикального движения, током и формой плазмы с каскадом токов в обмотках полоидального поля (рис. 3.2, *a*) и без данного каскада (рис. 3.2, *б*) [4, 9]. Системы были испытаны в различных точках сценария ITER на линейных моделях, полученных с плазмозфизического кода PET, при действии MD-возмущения. Типичный переходный процесс при таком тестировании показан на рис. 3.3 для регулятора без каскада с PF-токами, когда после всплеска зазоров они входят в специфициро-

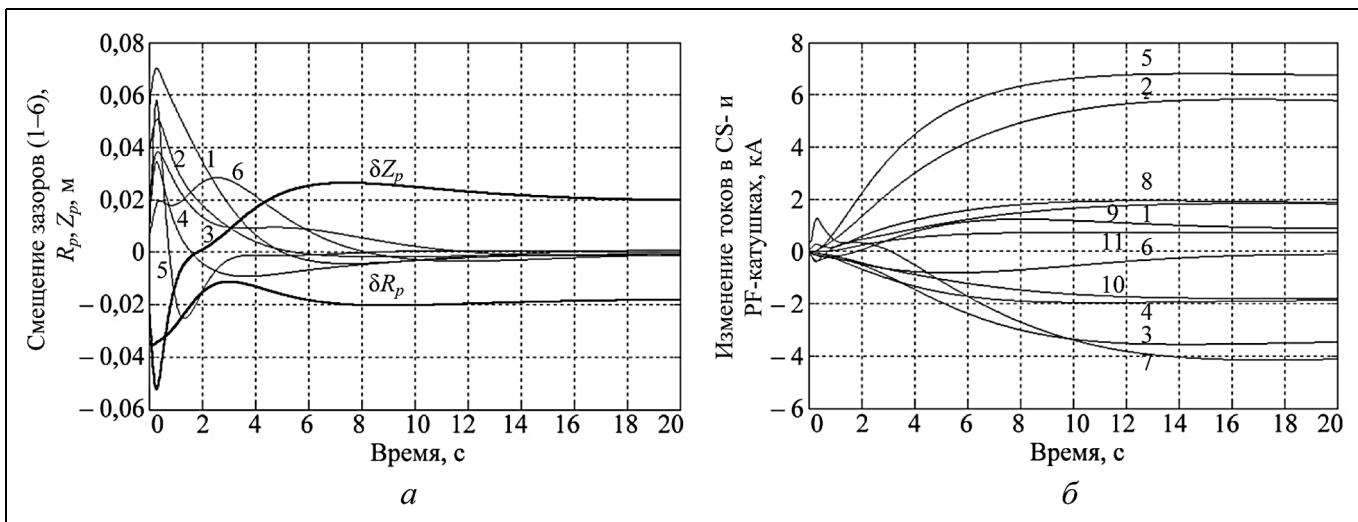


Рис. 3.3. Вариации выходных сигналов системы управления при малом срыве в точке сценария SOF (Start Of Flattop): а — зазоров, вертикального и горизонтального положений плазмы; б — CS&PF-токов

ванную трубку, а положения плазмы по вертикали и горизонтали приходят к некоторым уровням, согласованным с формой плазмы, при стабилизации вертикальной скорости плазмы относительно нуля. Токи в центральном соленоиде и в обмотках

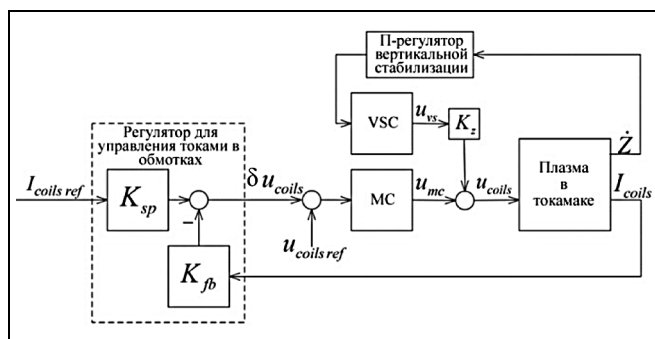


Рис. 3.4. Структурная схема внутреннего каскада (нижнего уровня) управления токами в CS/PF-обмотках

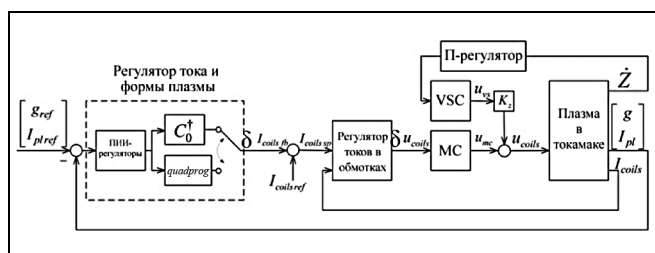


Рис. 3.5. Структурная схема внешнего каскада (верхнего уровня) управления током и параметрами формы плазмы

полоидального поля приходят к некоторому новому уровню, соответствующему компенсации возмущения. Данный регулятор показал наилучшие робастные свойства при сравнении его с другими регуляторами, для которых применялись LQG-подход и развязка каналов управления [4, 9].

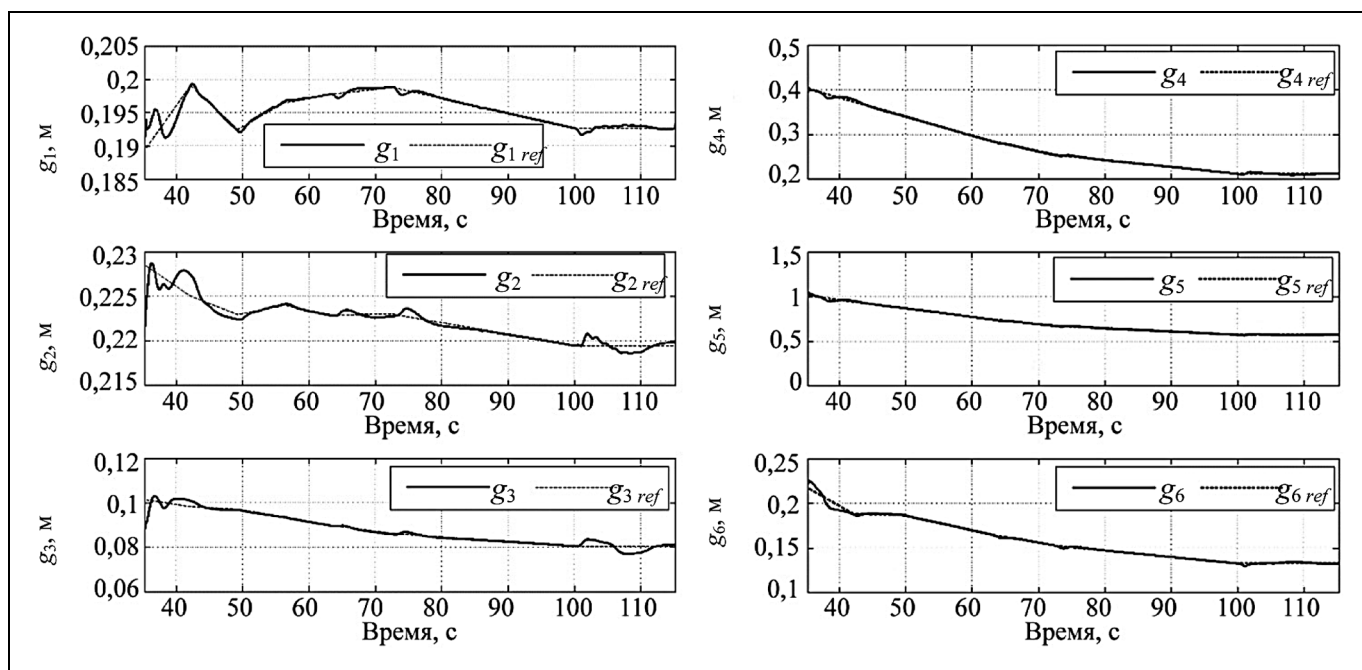
(2) Минимизация H_∞ -нормы смешанной функции чувствительности для линеаризованной модели плазмы при стабилизации вертикальной скорости плазмы относительно нуля и одновременном управлении формой и током плазмы для синтеза робастных скалярного и многомерного регуляторов (см. рис. 3.1) [12]. На следующем этапе был синтезированы скалярный и многомерный регулятор при минимизации H_∞ -нормы смешанной чувствительности

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} \xrightarrow{K(s)} \min, \text{ где } S(s) \text{ — передаточная функция чувствительности замкнутой системы, } K(s) \text{ — регулятор.}$$

Блок-диагональный регулятор был испытан как на линейной модели, полученной линеаризацией плазмозфического кода DINA, реализующего уравнения плазмы в частных производных, так и на самом нелинейном коде, что отличает данную работу от предыдущих результатов. Графики процессов при малом срыве были получены аналогичные представленным на рис. 3.3.

(3) Каскадное управление (рис. 3.4—3.6) [13—15]. Дальнейший прогресс связан к переходу к каскадному управлению и решению задачи слежения за сценарными значениями зазоров.

Здесь во внутреннем каскаде проводится оригинальная развязка токов управления (см. рис. 3.4),

Рис. 3.6. Слежение за зазорами $g_1 - g_6$

а во *внешнем* каскаде посредством псевдообратной матрицы Мура — Пенроуза устанавливается связь между смещениями зазоров между первой стенкой и сепаратрисой и вариацией тока плазмы с токами управления через диагональный ПИИ-регулятор, при этом для избежания насыщения токов управления решалась нелинейная задача квадратичного программирования (повышение живучести системы) (см. рис. 3.5). На рис. 3.6 показана работа каскадной системы управления положением, током и формой плазмы с развязкой каналов в режиме слежения за зазорами на коде DINA с достаточно высокой точностью.

(4) Управление с прогнозирующей моделью. Данное управление привлекательно тем, что при синтезе регулятора учитываются ограничения на входные и выходные сигналы, что избавляет от разработки специализированных подходов, в частности, для предотвращения насыщения токов управления плазмой. В связи с этим был предложен подход, при котором не делалось разделения на два контура управления вертикальной скоростью плазмы и ее формой с током плазмы (рис. 3.7) [16], и в этой конфигурации учитывались ограничения на токи управления. Моделирование работы системы с прогнозирующей моделью на нелинейном коде DINA показало, что из-за естественного учета ограничений и решения оптимальной задачи на каждом шаге управления система с прогнозирующей моделью дает меньшие отклонения по зазорам при действии малого срыва [16].

Подход с прогнозирующей моделью для управления плазмой в токамаках продолжает развиваться. Так, разрабатывается и моделируется скалярная система стабилизации скорости вертикального положения плазмы в ITER относительно нуля с прогнозированием [17], для управления током и формой плазмы в ITER применяется метод с прогнозирующей моделью, предусматривающий сингулярное разложение матриц [18], прогнозирование применялось для управления профилем запаса устойчивости в ITER с переменными ограничениями на коде RAPTOR [19], а также для управления вертикальным положением плазмы на модели токамака T-15MD с переменным параметром [20].

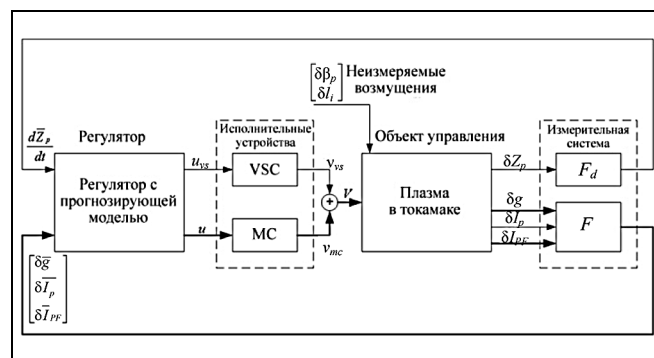


Рис. 3.7. Структурная схема системы магнитного управления плазмой в ITER с прогнозирующей моделью

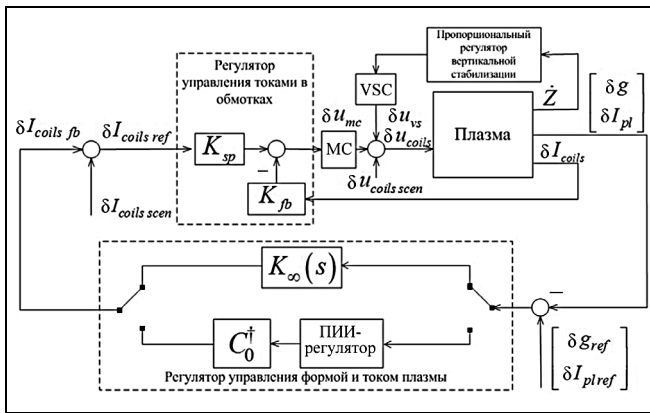


Рис. 3.8. Схема каскадной системы управления формой и током плазмы в токамаке: ключи обеспечивают возможность переключения регуляторов во внешнем каскаде

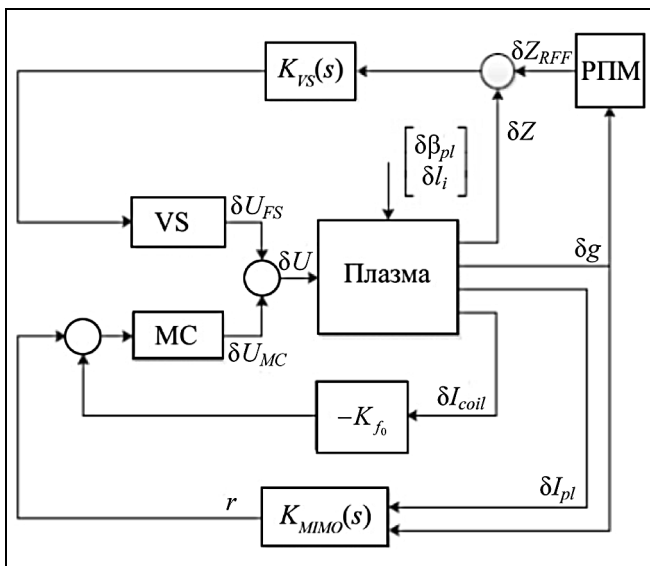


Рис. 3.9. Схема иерархической системы магнитного управления плазмой с адаптацией в ITER: РПМ — регулятор с прогнозирующей моделью

(5) Каскадная система управления с развязкой каналов во внутреннем каскаде для управления токами в обмотках полоидального поля и робастным регулятором во внешнем каскаде (рис. 3.8) [21]. Каскадное управление формой и током плазмы приводит к тенденции повышения запасов робастной устойчивости системы, что связано с повышением надежности системы. Для достижения этой цели внешний каскад был синтезирован как робастный при решении задачи минимизации H_∞ -нормы смешанной чувствительности. Затем на линейных моделях было проведено сравнение синтезированной системы с системой из п. (3) по критериям запасов робастной устойчивости и ро-

бастного качества управления. Результат показал, что робастная система превосходит систему из п. (3) по робастным критериям примерно в пять раз. Моделирование робастной системы на коде DINA в режиме слежения за заложенными параметрами показало результат по точности слежения близкий к системе из п. (3) (см. рис. 3.6).

(6) Иерархическое управление плазмой с многомерным робастным контуром управления током и формой плазмы, синтезированным методом Мак-Фарлея — Гловера, и адаптивным контуром управления вертикальным положением плазмы с прогнозирующей моделью (рис. 3.9) [22, 23]. В предыдущих подходах стабилизировалась скорость вертикального положения плазмы относительно нуля, а не само положение. Такому подходу присущи два недостатка. Один из них связан с тем, что данный подход не дает возможности удерживать положение плазмы в ограниченной области управляемости по вертикали, так как ограниченность этой области возникает из-за неустойчивости плазмы и ограничения на напряжение управления. Другой недостаток связан с тем, что при таком управлении система не является строго устойчивой, так как стабилизируется скорость, а не положение плазмы по вертикали. По этим причинам была разработана система управления положением, током и формой плазмы, в которой стабилизируется вертикальное неустойчивое положение плазмы. Для избежания противоречия между формой плазмы и ее положением был добавлен адаптивный контур с регулятором на основе прогнозирующей модели, который адаптирует положение плазмы к ее форме (см. рис. 3.9).

Краткое сравнение примененных подходов. Для магнитного управления плазмой в ITER применялись различные принципы и структуры систем управления (1)–(6). Это связано с тем, что плазма в ITER представляет собой сложный объект с распределенными и переменными во времени параметрами, имеющий параметрические и структурные неопределенности, что заставляет искать наиболее эффективные методы многосвязного иерархического управления плазмой.

Прежде всего, чтобы противостоять неопределенностям моделей плазмы, разработаны робастные системы управления на основе H_∞ -теории оптимизации (1), (2), (5) и (6). Предложены различные структуры систем: (1) отражение внешнего возмущения; (2) минимизация H_∞ -нормы смешанной функции чувствительности; (5) развязка каналов управления токами и H_∞ -регулятор для управления формой плазмы. Все эти схемы применялись со стабилизацией вертикальной скорости плазмы относительно нуля, чтобы исключить противоречия между положением плазмы и ее формой. Данные схемы приводили к примерно близ-



кому качеству управления током и формой плазмы, обеспечивая определенные запасы робастной устойчивости благодаря H_∞ -регуляторам. Системам с управлением вертикальной скоростью плазмы, а не ее вертикальным положением, свойственен недостаток: они не являются строго устойчивыми, и вертикальное положение может неуправляемо изменяться в переходных процессах. По этой причине было предложено управлять непосредственно вертикальным положением плазмы для преодоления данного недостатка в контуре вертикальной стабилизации (6). Поэтому была разработана адаптация вертикального положения плазмы к ее форме (6).

В то же время разрабатывались системы с развязкой каналов управления как во внутреннем каскаде управления токами в обмотках полоидального поля, так и во внешнем каскаде управления током и формой плазмы (3). Это связано с тем, что при развязке каналов проще проводить настройку каждого канала управления, в то время как в сравнении с H_∞ -теорией оптимизации синтезируется многосвязный регулятор при минимизации одного H_∞ -критерия качества, что затрудняет понимание работы всей системы в целом, хотя и дает большие запасы робастной устойчивости.

Была применена система управления током, положением и формой с прогнозирующей моделью (4). Этот подход перспективен тем, что при нем можно учитывать ограничения на входные и выходные величины объекта управления, так как эти ограничения закладываются в алгоритм с прогнозированием на входном и выходном горизонтах. Кроме того, метод с прогнозирующей моделью может быть применен для создания многомерной адаптивной системы управления током и формой плазмы, если имеется возможность в каждый момент времени идентифицировать линейную модель плазмы.

4. СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ITER-2 С ВНУТРЕННЕЙ ОБМОТКОЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ

Установлено [24], что область управляемости плазмы по вертикали в ITER ограничена относительно малой величиной, а именно, 4 см, что составляет 2 % от малого радиуса ITER. Идея оценки области управляемости представлена на рис. 4.1, а (см. третью страницу обложки). Она состоит в том, что при одних и тех же условиях и одном и том же напряжении насыщения, подаваемого на катушки горизонтального поля ITER по схеме, представленной на рис. 4.1, б, плазма выпускалась из раз-

ных начальных условий по вертикали, причем знак напряжения выбирался таким, чтобы оно противодействовало нарастанию вертикального смещения. Если начальное условие было в пределах области управляемости, то напряжение через некоторый интервал времени заставляло изменяться вертикальное смещение в обратную сторону. Данное исследование было проведено, в частности, на коде CORSICA (США).

Были выдвинуты и исследованы четыре предложения [25], как увеличить область управляемости плазмы по вертикали:

- увеличение напряжения VS источника питания с 6 до 9 кВ;
- введение второй VS-цепи с использованием двух секций CS: CS2L и CS2U;
- добавление внутри вакуумной камеры стабилизирующих колец;
- введение внутрь камеры специальных обмоток управления.

Эти предложения были изучены и сравнены между собой в работе [25]. Наиболее эффективным средством оказались обмотки внутри камеры. По этой причине в конце 2013 г. в проекте ITER внутри вакуумной камеры были установлены специальные обмотки, чтобы приблизить их как можно ближе к плазме, тем самым расширить область управляемости по вертикали и повысить надежность работы системы магнитного управления плазмой (см. рис. 4.1, б) [24].

Исследованы две системы стабилизации вертикальной скорости плазмы относительно нуля с внешними и внутренними обмотками [26]. Для моделирования авторы воспользовались соединенными вместе транспортным кодом JIN-TRAC (JET) и кодом равновесия со свободной границей CREATE-NL. В первом случае закон управления выбирался в виде

$$VS_1(s) = -15\,000 \frac{1+s/18}{(1+s/60)^2} Z_{dot}(s),$$

где $VS_1(s)$ — изображение Лапласа функции напряжения внешней катушки, $Z_{dot}(s)$ — изображение Лапласа функции скорости вертикального движения центра тока плазмы, а во втором случае закон управления в области изображений по Лапласу выбирался так:

$$VS_3(s) = -8000 \frac{1+s/40}{1+s/6} [Z_{dot}(s) - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot I_{S3}(s)],$$

где $VS_3(s)$ — изображение Лапласа функции напряжения на внутренней катушке, $I_{S3}(s)$ — изображение Лапласа функции тока внутренней катушки.

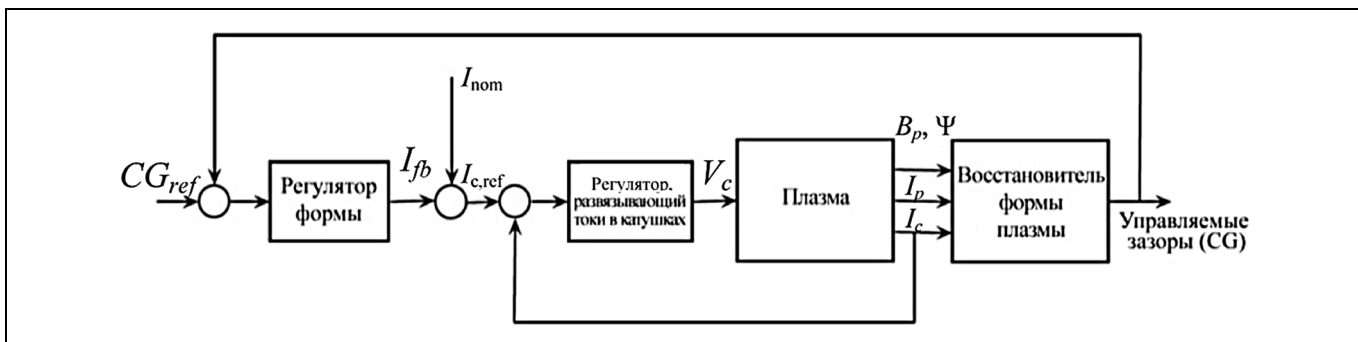


Рис. 4.2. Структурная схема системы управления формой плазмы, подобная схеме eXtreme Shape Controller в токамаке JET (Великобритания)

Был выбран случай 1 сценария, L -мода, SOF (Start of Flattop — начало пологой фазы), $I_p = 15$ MA, $l_i = 0,88$, $\beta_{pol} = 0,06$. Результаты моделирования

Таблица 4.1

Характеристики системы управления, полученные при анализе

	VDE_{max} , мм	m_ϕ	ω_r , рад/с	m_{GU} , дБ	m_{GL} , дБ
Внешняя катушка	34	22°	13	5,6	-4,0
Внутренняя катушка	Более 200	65°	78	13	-18

Таблица 4.2

Наилучшее качество управления при наличии шума, полученное при анализе

Конфигурация	VDE_{max} , мм	
Уровень шума σ , мм/с	210	430
VS_1 (6 кВ)	28	24
VS_3 (2,3 кВ)	148	141

Таблица 4.3

Показатель качества $\max(Z_0)$ и постоянная времени неустойчивости [26]

Плазма 15 MA		Плазма 1 $l_i(3) = 1,2$, $\beta_p = 0,1$	Плазма 2 $l_i(3) = 1,0$, $\beta_p = 0,1$	Плазма 3 $l_i(3) = 0,73$, $\beta_p = 0,6$
$\max Z_0$	VS1	15	30	137
	VS3 + VS1	160	175	255
Постоянная времени неустойчивости, мс		56	78	171

сведены в табл. 4.1, где VDE_{max} (Vertical Displacement Event — явление вертикального смещения) — максимально возможное начальное положение плазмы в вертикальном направлении, которое может быть стабилизировано (область управляемости), m_ϕ — запас устойчивости по фазе, ω_r — частота среза, m_{GU} и m_{GL} — верхняя и нижняя границы запаса устойчивости по амплитуде. Результаты показали, что область управляемости VDE_{max} значительно больше для случая внутренней катушки, примерно в 5–6 раз.

В табл. 4.2 представлены значения VDE_{max} в присутствии шума с ограниченной полосой в 1 кГц, нулевым средним, стандартной девиацией $\sigma = 210$ мм/с и $\sigma = 430$ мм/с. Машинная конфигурация довольно нечувствительна к шуму: при рассматриваемом уровне шума наблюдается пренебрежимо малое ухудшение качества управления в терминах VDE_{max} .

В ITER продолжается разработка и уточнение сценариев с применением систем магнитного управления плазмой на плазмозфизических кодах как с учетом только внешних катушек для управления вертикальным положением плазмы [27], так и с учетом внутренней катушки [26, 28].

На рис. 4.2 приведена структурная схема системы управления формой плазмы, которая применялась в работе [26] для моделирования переходных процессов при переходе из моды L (15 MA) в моду H (15 MA) и наоборот на линейной модели CREATE-L. В работе [26] представлена эволюция внутреннего g_6 и внешнего g_3 зазоров (см. рис. 1.1, б на третьей странице обложки) для случаев: прямая связь обновляется при $T = 1$ с; прямая связь обновляется при $T = 5$ с; прямая связь обновляется при $T = 1$ с точно после перехода и затем при $T = 9$ с; прямая связь обновляется при $T = 1$ с и транспортным запаздыванием 0,2 с; прямая связь вычисляется как функция β_{pol} .



Исследования области управляемости плазмы по вертикали для ITER по методике [24] были продолжены в работе [27] на коде PET более детально для различных вариантов плазмы. Результаты сведены в табл. 4.3, из которой видно, что при использовании только внешних катушек и источников питания VS1, диапазон области управляемости находится в пределах 1,5–13,7 см. Если же задействованы как внешние катушки VS1, так и внутренние VS3, то диапазон заметно увеличивается до 16–25,5 см.

Исследованы системы магнитного управления плазмой с учетом шума и различных комбинаций обмоток стабилизации вертикального положения плазмы в ITER на коде DINA [27]: внешние катушки VS1; внутренние катушки VS3; одновременное применение внешних и внутренних катушек. Исследования были основаны на ограниченном анализе данных с токамаков C-Mod, JET, и ASDEX-U, что дало возможность задать для плазменной активности в ITER модель шума вертикальной скорости плазмы dZ/dt в виде случайного сигнала, равномерно распределенного на отрезке частот $[0, 1]$ кГц со среднеквадратическим отклонением 0,6 м/с. Моделирование было проведено с инъекцией низкочастотного шума в диагностический сигнал dZ/dt , который применялся в обратной связи вертикальной стабилизации плазмы. При этом среднеквадратическое отклонение равномерно распределенного шума увеличилось до тех пор, пока система вертикальной стабилизации не теряла устойчивости или один из инженерных параметров не достигал своего проектного ограничения.

Наилучший результат дал вариант комбинации обмоток внутренних и внешних катушек. При этом на вход регулятора вертикальной стабилизации подавались два сигнала: dZ/dt и I_{VS3} . Максимально дозволенное значение среднеквадратического отклонения для шума в данном случае составило 3 м/с, среднеквадратическое отклонение тока I_{VS3} — около 10 кА, среднеквадратическое отклонение вертикального смещения плазмы в течение полой фазы тока плазмы — около 44 мм. Система управления плазмой была синтезирована по стандартной методике LQG [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей части обзора уделено внимание разработке и моделированию систем управления положением, током и формой плазмы в ITER, при этом выделен вклад ИПУ РАН в эту работу. Приведенные результаты показывают тенденцию развития данных систем, связанную с повышением точности и быстродействия при отслеживании спе-

нарных сигналов и отражении возмущений типа малого срыва. Тенденция отражает повышение запасов робастной устойчивости, что в свою очередь ведет к повышению надежности и живучести систем управления плазмой в ITER.

Введение обмоток горизонтального поля внутри вакуумной камеры ITER расширяет область управляемости в вертикальном направлении движения плазмы, что при заданных ограничениях на напряжения обмоток управления, спецификации на возмущения типа «малый срыв» и неустойчивости плазмы по вертикали позволяет заметно отдалить замкнутую систему магнитного управления плазмы от границ потери устойчивости.

Системы магнитного управления плазмой в действующих токамаках, а также для ITER, продолжают развиваться по разным направлениям. Одно из таких направлений связано с развитием высокоточных методов решения обратных задач диагностики плазмы, данные которых служат входными данными для систем управления внутренними параметрами плазмы, и апробацией систем управления именно на этих данных, а не на данных прямых задач, когда все параметры плазмы известны достаточно точно [30, 31].

В части 3.2 будут представлены экспериментальная обработка сценариев для ITER на токамаках DIII-D (США) и WEST (Франция), подходы в моделировании и реализации систем управления плазмой в ITER, подготовка системы управления плазмой в ITER к пуску и эксплуатации. Будут показаны дорожные карты разработки и создания первой термоядерной электростанции DEMO (последующего за ITER шага), которые указывают два направления разработки DEMO: на традиционных токамаках с относительно большим аспектным отношением и сферических токамаках модульного типа, позволяющих заметно сократить время создания DEMO. Там же будут приведены основные тенденции в разработке полоидальных систем DEMO, а также показана начальная версия системы магнитного управления плазмой в DEMO.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митришкин Ю.В., Корнев П.С., Прохоров А.А. и др. Управление плазмой в токамаках. Часть 1. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Токамаки. Компоненты систем управления // Проблемы управления. — 2018. — № 1. — С. 2—20. [Mitrishkin, Y.V., Korenev, P.S., Prokhorov, A.A., et al. Plasma Control in Tokamaks. Part 1. Controlled thermonuclear fusion problem. Tokamaks. Components of control systems // Advances in Systems Science and Applications. — 2018. — Vol. 18, No. 2. — P. 26—52.]
2. Митришкин Ю.В., Корнев П.С., Прохоров А.А. и др. Управление плазмой в токамаках. Часть 2. Системы магнитного управления плазмой // Проблемы управления. — 2018. —

- № 2. — С. 2—30. [Mitrishkin, Y.V., Kartsev, N.M., Pavlova, E.A., et al. Plasma Control in Tokamaks. Part. 2. Magnetic Plasma Control Systems // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2018. — Vol. 18, No. 3. — P. 39—78.]
3. ITER. — URL: <https://www.iter.org>.
4. Митришкин Ю.В. Управление плазмой в экспериментальных термоядерных установках: Адаптивные автоколебательные и робастные системы управления. — М.: КРАСАНД, 2016. — 400 с. — ISBN 978-5-396-00694-2. [Mitrishkin, Y.V. *Upravlenie plazmoy v ehkspperimentalnykh termoyadernykh ustanovkakh: Adaptivnye avtokolebatelnye i robastnye sistemy upravleniya*. — Moscow: KRASAND, 2006. — 400 p. (In Russian)]
5. Takase, H., Utohab, H., Sakamoto, Y., et al. Analysis of plasma position control for DEMO reactor // *Fusion Engineering and Design*. — 2016. — Vol. 109—111. — P. 1386—1391.
6. Митришкин Ю.В., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р. Система робастного управления током, положением и формой плазмы в ИТЭР // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. — 2005. — № 1. — С. 61—81. [Mitrishkin, Y.V., Lukash, V.E., Khayrutdinov, R.R. Plasma Current, Position and Shape Robust Control System in ITER // *Problems of Atomic Science and Technology. Series Thermonuclear Fusion*. — 2005. — No. 1. — P. 61—81. (In Russian)]
7. Mitrishkin, Y.V. Comprehensive Design and Implementation of Plasma Adaptive Self-Oscillations and Robust Control Systems in Thermonuclear Installations // *Proc. of 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*. — Orlando, FL, USA, 2004. — Vol. XV. — P. 247—252.
8. Mitrishkin, Y.V. and Kimura, H. Plasma Vertical Speed Robust Control in Fusion Energy Advanced Tokamak // *Proc. of 40th IEEE Conf. on Decision and Control*. — Florida, USA, 2001. — P. 1292—1297.
9. Mitrishkin, Y.V., Kurachi, K., Kimura H. Plasma Multivariable Robust Control System Design and Simulation for a Thermonuclear Tokamak-Reactor // *International Journal of Control*. — 2003. — Vol. 76. — No. 13. — P. 1358—1374.
10. McFarlane, D., Glover, K. Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. — Springer-Verlag, 1990. — 212 p.
11. Safonov, M. Robust Control / *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* (ed. J.G. Webster). — Vol. 18. — NY: Wiley, 1999. — P. 592—602.
12. Докука В.Н., Кадурин А.В., Митришкин Ю.В., Хайрутдинов Р.Р. Синтез и моделирование H_∞ -системы магнитного управления плазмой в токамаке-реакторе // *Автоматика и телемеханика*. — 2007. — № 8. — С. 126—145. [Dokuka, V.N., Kadurin, A.V., Mitrishkin, Y.V., Khayrutdinov, R.R. Synthesis and modeling of the H_∞ -system of magnetic control of the plasma in the tokamak-reactor // *Automation and Remote Control*. — 2007. — Vol. 68, iss. 8. — P. 1410—1428.]
13. Mitrishkin Y.V., Korostelev A.Y., Sushin I.S., et al. Plasma Shape and Current Tracking Control System for Tokamak // *Proc. of 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. — Moscow, 2009, Fr-C7.1. — P. 2133—2138.
14. Митришкин Ю.В., Коростелев А.Я. Каскадная система слежения за током и формой плазмы в токамаке с развязкой каналов управления // *Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение*. — 2010. — Т. 79, № 2. — С. 21—38. [Mitrishkin, Y.V., Korostelev, A.Y. Kaskadnaya sistema slezheniya za tokom i formoy plazmy v tokamake s razvyazkoy kanalov upravleniya // *Vestnik BMSTU*. — 2010. — Vol. 79, No. 2. — P. 21—38. (In Russian)]
15. Митришкин Ю.В., Коростелев А.Я., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. Синтез и моделирование двухуровневой системы магнитного управления плазмой токамака-реактора // *Физика плазмы*. — 2011. — Т. 37, № 4. — С. 307—349. [Mitrishkin, Y.V., Korostelev, A.Y., Dokuka, V.N., Khayrutdinov, R.R. Synthesis and simulation of a two-level magnetic control system for tokamak-reactor plasma // *Plasma Physics Reports*. — 2011. — Vol. 37, No. 4. — P. 279—320.]
16. Митришкин Ю.В., Коростелев А.Я. Система с прогнозирующей моделью для управления формой и током плазмы в токамаке // *Проблемы управления*. — 2008. — № 5. — С. 19—25. [Mitrishkin, Y.V., Korostelev, A.Y. System with Predictive Model for Plasma Shape and Current Control in a Tokamak // *Control Sciences*. — 2008. — No. 5. — P. 19—25. (In Russian)]
17. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Стабилизация плазмы на базе прогноза с устойчивым линейным приближением // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. — 2011. — Сер. 10. — Вып. 1. — С. 116—133. [Veremei, E.I., Sotnikova, M.V. Plasma stabilization on the base of Model Predictive Control with the linear closed-loop system stability // *Vestnik S.-Petersburg Univ. Ser. 10. Prikl. Mat. Inform. Prots. Upr.* — 2011. — No. 1. — P. 116—133. (In Russian)]
18. Gerkišič, S., Pregelj, B., Perne, M., et al. Model predictive control of ITER plasma current and shape using singular value decomposition // *Fusion Engineering and Design*. — 2018. — Vol. 129. — P. 158—163.
19. Maljaars, E., Felici, F., Baar, M.R., et al. Control of the tokamak safety factor profile with time-varying constraints using MPC // *Nuclear Fusion*. — 2015. — Vol. 55, No. 2.
20. Митришкин Ю.В., Голубцов М.П. Гибридная система управления неустойчивым нестационарным объектом с прогнозирующей моделью // *Автоматика и телемеханика*. — 2018. — № 11. — С. 67—82. [Mitrishkin, Y.V., Golubtsov, M.P. A Hybrid Control System for an Unstable Non-Stationary Plant with a Predictive Model // *Automation and Remote Control*. — 2018. — No. 11. — Vol. 79, P. 2005—2017.]
21. Кадурин А.В., Митришкин Ю.В. Многомерная система каскадного управления формой и током плазмы в токамаке со встроенным H_∞ -регулятором // *Автоматика и телемеханика*. — 2011. — № 10. — С. 52—71. [Kadurin, A.V., Mitrishkin, Y.V. Multidimensional system of cascaded control of plasma form and current in tokamak with channel decoupling and H_∞ -controller // *Automation and Remote Control*. — 2011. — Vol. 72. — P. 20—53.]
22. Mitrishkin, Y.V., Kartsev, N.M. Hierarchical Plasma Shape, Position, and Current Control System for ITER // *Proc. of the 50th IEEE Conf. on Decision and Control and European Control Conf.* — Orlando, FL, USA, 2011. — TuA13.2. — P. 2620—2625.
23. Карцев Н.М., Митришкин Ю.В., Патров М.И. Иерархические робастные системы магнитного управления плазмой в токамаках с адаптацией // *Автоматика и телемеханика*. — 2017. — № 4. — С. 149—165. [Kartsev, N.M., Mitrishkin, Y.V., Patrov, M.I. Hierarchical robust systems for magnetic plasma control in tokamaks with adaptation // *Automation and Remote Control*. — 2017. — Vol. 78, iss. 4. — P. 700—713.]
24. Humphreys, D.A., Casper, T.A., Eidietis, N., et al. Experimental vertical stability studies for ITER performance and design guidance // *Nuclear Fusion*. — 2009. — Vol. 49, No. 11.
25. Albanese, R., Ambrosino, G., Ariola, M., et al. ITER vertical stabilization system // *Fusion Engineering and Design*. — 2009. — Vol. 84. — P. 394—397.
26. Cavinato, M., Ambrosino, G., Figini, L., et al. Preparation for the operation of ITER: EU study on the plasma control sys-



- tem // Fusion Engineering and Design. — 2014. — Vol. 89. — P. 2430–2434.
27. Casper, T., Gribov, Y., Kavin, A., et al. Development of the ITER baseline inductive scenario // Nuclear Fusion. — 2014. — Vol. 54, No. 1.
 28. Gribov, Y., Kavin, A., Lukash, V., et al. Plasma vertical stabilization in ITER // Nuclear Fusion. — 2015. — Vol. 55. — No. 7.
 29. Belyakov, V., Kavin, A., Kharitonov, V., et al. Linear Quadratic Gaussian Controller Design for Plasma Current, Position and Shape Control System in ITER // Fusion Engineering and Design. — 1999. — Vol. 45. — P. 55–64.
 30. Zaitsev, F.S., Shishkin, A.G., Lukianitsa, A.A., et al. The Basic Components of Software-Hardware System for Modeling and Control of the Toroidal Plasma by Epsilon-Nets on Heterogeneous Mini-Supercomputers // Commun. Comput. Phys. — 2018. — Vol. 24. — No. 1. — P. 1–26.
 31. Shishkin, A.G., Stepanov, S.V., Suchkov, E.P., et al. Distributed Access to the Resources of Plasma Modelling and Control Complex HASP CS // 2018 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET). — Beijing, China, August 18–20, 2018. — P. 193–197.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Я. Рубиновичем.

Поступила в редакцию 22.01.2019, после доработки 25.02.2019.
Принята к публикации 5.03.2019.

Митришкин Юрий Владимирович — д-р техн. наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ yvm@mail.ru,

Карцев Николай Михайлович — канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ n.kartsev@yandex.ru,

Коньков Артем Евгеньевич — аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ✉ konkov@physics.msu.ru,

Патров Михаил Иванович — канд. физ.-мат. наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, ✉ michael.patrov@mail.ioffe.ru.

PLASMA CONTROL IN TOKAMAKS

Part 3.1. Plasma Magnetic Control Systems in ITER

Y.V. Mitrishkin^{1,2,#}, N.M. Kartsev², A.E. Konkov¹, M.I. Patrov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Russia

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Ioffe Institute of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

[#] ✉ yvm@mail.ru

Abstract. The plasma magnetic control systems for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) are presented. The systems comprise original engineering solutions for plasma position, current and shape control for the two versions of ITER: ITER-1 and ITER-2, including those designed in V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS. It is noted that in ITER-1 the plasma position and shape were controlled by all PF-coils and robust H_∞ -controllers, while to decrease peaks of control power for suppressing the minor disruption the additional non-linear circuit was used without significant changes in displacements of the gaps between the plasma separatrix and the first wall. In ITER-2 the special circuit with a fast voltage rectifier was used for plasma stabilization about zero, while for plasma current and shape control the special cascade control systems were designed with and without the control channels decoupling, with robust H_∞ -controllers and predictive model, and with adaptive stabilization of the plasma vertical position as well. To increase the plasma controllability region in vertical direction the additional horizontal field coils were introduced into the ITER-2 vacuum vessel and the capabilities of the system with the new circuits to control the plasma vertical position at the noise presence were investigated.

Keywords: tokamak, plasma, plasma magnetic control, ITER.

Funding. The work is performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (grant No. 17-18-00293) and Russian Science Foundation (grant No. 17-19-01022).

ВЕРХНИЕ ОЦЕНКИ ОТКЛОНЕНИЙ ТРАЕКТОРИЙ В ЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВНЕШНИМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ¹

Я.И. Квинто, М.В. Хлебников

Аннотация. Исследован практически важный эффект всплеска в линейных динамических системах при ненулевых начальных условиях. Рассмотрена линейная динамическая система, подверженная воздействию произвольных ограниченных внешних возмущений. На основе техники линейных матричных неравенств и концепции инвариантных эллипсоидов установлены оценки максимального отклонения траекторий и предложен подход к синтезу обратной связи, минимизирующий отклонение. Эффективность рассмотренного подхода продемонстрирована на численных примерах. Результаты численного моделирования показали низкую степень консерватизма полученных оценок.

Ключевые слова: линейная динамическая система, отклонения траекторий, ограниченные внешние возмущения, линейные матричные неравенства, инвариантный эллипсоид.

ВВЕДЕНИЕ

Статья продолжает серию работ, посвященных исследованию эффекта больших отклонений в линейных динамических системах. Так, в работе [1] был исследован эффект больших отклонений для линейных систем без неопределенностей и получены верхние оценки отклонений. В работах [2, 3] с помощью техники линейных матричных неравенств и концепции инвариантных эллипсоидов [4–6] были получены оценки отклонений для линейных систем в непрерывном и дискретном времени, содержащих структурированную матричную неопределенность. При этом техника линейных матричных неравенств оказалась весьма эффективным инструментом, позволяющим синтезировать управление, минимизирующее размер отклонения траекторий, а получаемые оценки отклонений обладают низкой степенью консерватизма.

В настоящей работе рассматривается линейная динамическая система, подверженная воздействию произвольных ограниченных внешних возмущений. Для нее установлены оценки максимального отклонения траекторий (§ 1) и предложен

подход к синтезу обратной связи, минимизирующий размер отклонения (§ 2). В § 3 и 4 эффективность рассматриваемого подхода демонстрируется численными примерами.

Идейно близкая задача о подавлении внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов и техники линейных матричных неравенств рассматривалась в работах [7–9]. Отметим, что в данной работе все матричные неравенства понимаются в смысле знакоопределенности матриц.

1. ЗАДАЧА АНАЛИЗА

Рассмотрим линейную непрерывную динамическую систему

$$\dot{x} = Ax + Dw, \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $A \in R^{n \times n}$ и $D \in R^{n \times m}$ — заданные матрицы, матрица A устойчива (гурвицева), пара (A, D) управляема; $x(t) \in R^n$ — фазовое состояние, $w(t) \in R^m$ — внешнее возмущение, ограниченное в каждый момент времени:

$$|w(t)| \leq 1 \text{ для всех } t \geq 0, \quad (2)$$

где $|\cdot|$ — евклидова норма. Никаких иных ограничений на возмущение $w(t)$ не налагается: оно не предполагается ни случайным, ни гармоническим.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00140).



Напомним [1], что для непрерывной линейной динамической системы максимальное отклонение траектории от нуля в переходном режиме дается выражением

$$\xi \doteq \max_{t \geq 0} \frac{|x(t)|}{|x(0)|}. \quad (3)$$

Рассмотрим семейство эллипсоидов

$$E_P = \{x \in R^n: x^T P^{-1} x \leq 0\}$$

с матрицами $P > 0$, удовлетворяющими линейному матричному неравенству

$$AP + PA^T + \alpha P + \frac{1}{\alpha} DD^T \leq 0 \quad (4)$$

при некотором значении параметра $\alpha > 0$.

Согласно работе [5], если начальное условие $x(0)$ лежит в эллипсоиде E_P , то траектория системы (1) будет оставаться в этом эллипсоиде для всех моментов времени при всех допустимых внешних возмущениях (2). Эллипсоид E_P называется *инвариантным эллипсоидом* для системы (1), (2).

Заметим, что по лемме Шура матричное неравенство (4) представимо в эквивалентном виде

$$\begin{pmatrix} AP + PA^T + \alpha P & D \\ D^T & -\alpha I \end{pmatrix} \leq 0. \quad (5)$$

Рассмотрим задачу $\min \|P\|_2$ при ограничениях (5) и $P > 0$. Ее решение \hat{P} определяет минимальный инвариантный эллипсоид $E_{\hat{P}}$, содержащий множество достижимости системы (1), (2). Поэтому, если начальное условие $x(0)$ принадлежит этому эллипсоиду, мы получаем простую оценку максимального отклонения траектории системы от нуля:

$$|x(t)| \leq \lambda_{\max}(P) = \sqrt{\|\hat{P}\|_2}.$$

Итак, приходим к следующему утверждению.

Лемма 1. Пусть \hat{P} — решение задачи выпуклой оптимизации $\min \|P\|_2$ при ограничениях

$$\begin{pmatrix} AP + PA^T + \alpha P & D \\ D^T & -\alpha I \end{pmatrix} \leq 0, \\ P > 0,$$

где оптимизация проводится по матричной переменной $P = P^T \in R^{n \times n}$ и параметру $\alpha > 0$.

Тогда для решений системы (1) с начальным условием $x_0 \in E_{\hat{P}}$ справедлива оценка отклонения

$$\hat{\xi} \leq \sqrt{\|\hat{P}\|_2}$$

при всех допустимых внешних возмущениях (2). ♦

Полученный результат легко обобщается на случай произвольных начальных условий. В частности, рассмотрим траектории системы (1), (2) с начальными условиями на границе единичного шара

$$B = \{x \in R^n: |x| \leq 1\}.$$

Из выражения (3) следует, что

$$\xi = \max_{t \geq 0} \max_{|x(0)|=1} |x(t)|,$$

поэтому для получения оценки $\hat{\xi}$ максимального отклонения будем искать инвариантный эллипсоид, удовлетворяющий дополнительному условию $B \subseteq E_P$. Это условие записывается в виде эквивалентного линейного матричного неравенства $P \geq I$; его выполнение гарантирует, что для любого начального условия из шара B траектория системы не покинет эллипсоид E_P , и в каждый момент времени будет верна оценка

$$|x(t)| \leq \sqrt{\|\hat{P}\|_2}.$$

Итак, получен следующий результат.

Лемма 2. Пусть \hat{P} — решение задачи выпуклой оптимизации $\min \|P\|_2$ при ограничениях

$$\begin{pmatrix} AP + PA^T + \alpha P & D \\ D^T & -\alpha I \end{pmatrix} \leq 0, \\ P \geq I,$$

где оптимизация проводится по матричной переменной $P = P^T \in R^{n \times n}$ и параметру $\alpha > 0$.

Тогда для решений системы (1) с начальными условиями $|x_0| \leq 1$ справедлива оценка отклонения

$$\hat{\xi} \leq \sqrt{\|\hat{P}\|_2}$$

при всех допустимых внешних возмущениях (2). ♦

Наконец, для построения инвариантного эллипсоида, содержащего заданную начальную точку $x_0 \neq 0$, необходимо потребовать выполнение условия $x_0^T P^{-1} x_0 \leq 1$, которое представимо в виде эквивалентного линейного матричного неравенства

$$\begin{pmatrix} 1 & x_0^T \\ x_0 & P \end{pmatrix} \geq 0.$$

Остается сформулировать соответствующее утверждение.

Лемма 3. Пусть \hat{P} — решение задачи выпуклой оптимизации $\min \|P\|_2$ при ограничениях

$$\begin{pmatrix} AP + PA^T + \alpha P & D \\ D^T & -\alpha I \end{pmatrix} \leq 0,$$

$$\begin{pmatrix} 1 & x_0^T \\ x_0 & P \end{pmatrix} \geq 0, \quad P > 0,$$

где оптимизация проводится по матричной переменной $P = P^T \in R^{n \times n}$ и параметру $\alpha > 0$.

Тогда для решений системы (1) с заданным начальным условием $x_0 \neq 0$ справедлива оценка отклонения

$$\hat{\xi} \leq \sqrt{\|\hat{P}\|_2}$$

при всех допустимых внешних возмущениях (2).

Замечание. Оптимизационные задачи, сформулированные в леммах 1–3, очевидным образом сводятся к решению задачи полуопределенного программирования (SDP) при фиксированном значении положительного параметра α ; при этом (см. работу [5]) получающиеся задачи оказываются выпуклыми по параметру α .

2. ЗАДАЧА СИНТЕЗА

Перейдем к задаче синтеза и рассмотрим систему управления

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dw, \quad x(0) = x_0, \quad (6)$$

где $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times m}$ — заданные матрицы, пара (A, B) управляема; $x(t) \in R^n$ — фазовое состояние, $u(t) \in R^m$ — управление, $w(t) \in R^m$ — внешнее возмущение, удовлетворяющее условию (2).

Будем искать стабилизирующую статическую линейную обратную связь по состоянию

$$u = Kx, \quad K \in R^{m \times n}, \quad (7)$$

минимизирующую отклонение траекторий замкнутой системы.

Система (6), замкнутая регулятором (7), имеет вид

$$\dot{x} = (A + BK)x + Dw.$$

Для получения оценки $\hat{\xi}$ максимального отклонения траекторий замкнутой системы (8) при

заданной начальной точке $x_0 \neq 0$ воспользуемся леммой 3 из § 2. При этом первое ограничение соответствующей оптимизационной задачи принимает вид

$$\begin{pmatrix} (A + BK)P + P(A + BK)^T & D \\ D^T & -\alpha I \end{pmatrix} \leq 0.$$

Введя вспомогательную матричную переменную $Y = KP$ и исключая K , сформулируем следующий результат.

Теорема 1. Пусть \hat{P} , \hat{Y} — решение задачи выпуклой оптимизации $\min \|P\|_2$ при ограничениях

$$\begin{pmatrix} AP + PA^T + BY + Y^T B^T + \alpha P & D \\ D^T & -\alpha I \end{pmatrix} \leq 0,$$

$$\begin{pmatrix} 1 & x_0^T \\ x_0 & P \end{pmatrix} \geq 0, \quad P > 0,$$

где оптимизация проводится по матричным переменным $P = P^T \in R^{n \times n}$, $Y \in R^{m \times n}$ и параметру $\alpha > 0$.

Тогда для решений системы (6), замкнутой регулятором $\hat{K} = \hat{Y}P^{-1}$, справедлива оценка отклонения

$$\hat{\xi} \leq \sqrt{\|\hat{P}\|_2}$$

при всех допустимых внешних возмущениях (2).

3. ПРИМЕР 1

Рассмотрим задачу о движении двойного пружинного маятника в вязкой среде [5] (рис. 1).

Пусть x_1, v_1, m_1 — соответственно координата, скорость и масса левого тела, x_2, v_2, m_2 — правого тела, k_1, k_2 — коэффициенты жесткости левой и правой пружин, γ — коэффициент сопротивления среды. Обозначим вектор состояния

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}.$$

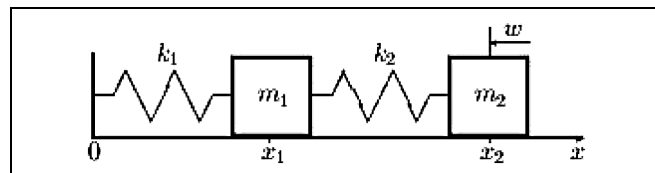


Рис. 1. Отклонения траекторий в системе из примера 1

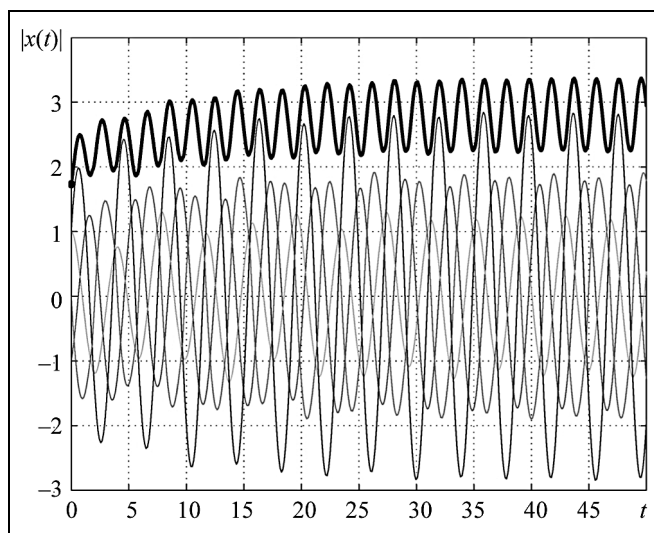


Рис. 2. Отклонения траекторий в системе из примера 1

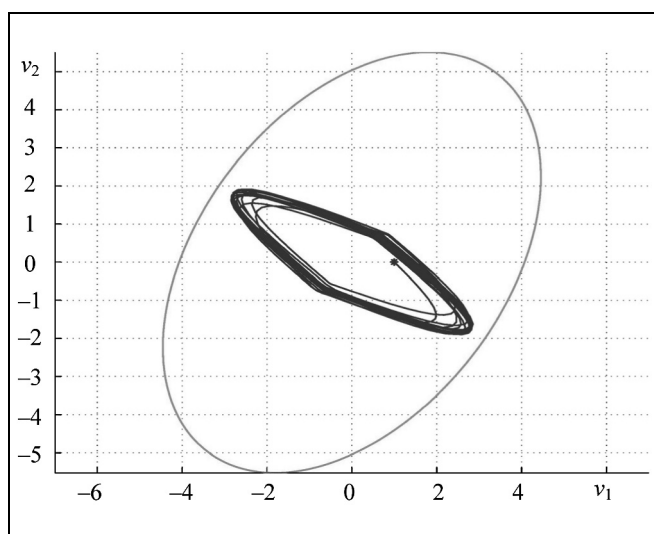


Рис. 3. Проекция инвариантного эллипсоида и траектории системы из примера 1

Полагая, что на правое тело действует ограниченное внешнее возмущение $|w| \leq 1$, приходим к устойчивой системе вида (1) с матрицами

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\gamma & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & 0 & -\gamma \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_2} \end{pmatrix}.$$

Приняв значения

$$m_1 = m_2 = 1, \quad k_1 = k_2 = 1, \quad \gamma = 0,2,$$

воспользуемся леммой 3 при начальном условии

$$x_0 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

В качестве внешнего возмущения выберем так называемое «наихудшее» внешнее возмущение [7]

$$\tilde{w}(t) = \text{sign}(D^T P^{-1} x).$$

Решение соответствующей оптимизационной задачи дает матрицу

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 30,3772 & 40,7626 & -1,5189 & -4,0145 \\ 40,7626 & 71,5351 & -0,0617 & -3,5768 \\ -1,5189 & -0,0617 & 19,8400 & 9,9839 \\ -4,0145 & -3,5768 & 9,9839 & 30,4148 \end{pmatrix}$$

инвариантного эллипсоида и верхнюю оценку отклонения $\hat{\xi} = 9,8515$.

На рис. 2 показана динамика величины $|x(t)|$ (жирная сплошная линия), а также траектории фазовых координат (тонкие линии) системы при «наихудшем» внешнем возмущении. На рис. 3 на плоскости фазовых переменных (v_1, v_2) показана траектория системы, а также проекция соответствующего инвариантного эллипсоида.

4. ПРИМЕР 2

Рассмотрим систему вида (6) с матрицами

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_2} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Фактически, в системе из примера 1 мы положили $\gamma = 0$; при этом система стала неустойчивой. Будем стремиться стабилизировать ее с помощью линейной обратной связи (7) и при этом минимизировать размер всплеска.

Воспользовавшись теоремой 1, для прежней начальной точки x_0 получим матрицу

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} 14,3139 & 1,7928 & -0,1646 & -23,6297 \\ 1,7928 & 23,6592 & 23,5884 & -0,2721 \\ -0,1646 & 23,5884 & 39,6395 & 0,8232 \\ -23,6297 & -0,2721 & 0,8232 & 43,3120 \end{pmatrix}$$

инвариантного эллипсоида, матрицу

$$\hat{K} = (-32,1438 \quad 6,8441 \quad -5,5424 \quad -18,3717)$$

регулятора и соответствующую верхнюю оценку отклонения траекторий замкнутой системы $\hat{\xi} = 7,5216$.

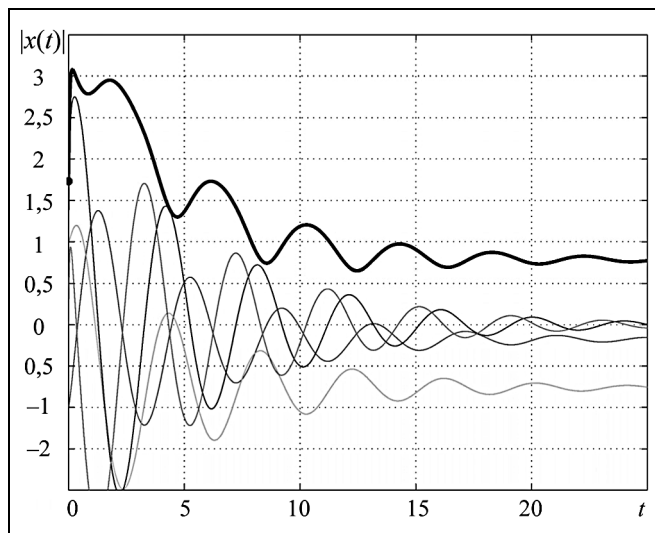


Рис. 4. Отклонения траекторий в замкнутой системе из примера 2

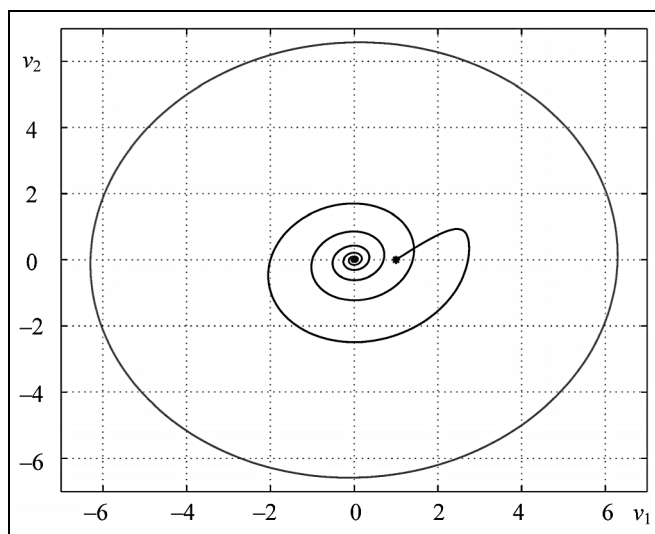


Рис. 5. Проекция инвариантного эллипсоида и траектории замкнутой системы из примера 2

На рис. 4 показана динамика величины $|x(t)|$ для замкнутой системы (жирная сплошная линия), а также траектории фазовых координат (тонкие линии) системы при «наихудшем» внешнем возмущении.

На рис. 5 на плоскости фазовых переменных (v_1, v_2) показана проекция траектории замкнутой системы, а также соответствующего инвариантного эллипсоида.

Численное моделирование проводилось в среде Matlab с помощью программного пакета *svx* [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дальнейшем авторы планируют обобщить полученные результаты на задачи минимизации раз-

мера уклонений с помощью статической линейной обратной связи по выходу системы, а также на различные робастные постановки задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляк Б.Т., Тремба А.А., Хлебников М.В. и др. Большие отклонения в линейных системах при ненулевых начальных условиях // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 6. — С. 18–41. [Polyak, B.T., Tremba, A.A., Khlebnikov, M.V., et al. Large Deviations in Linear Control Systems with Nonzero Initial Conditions // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, No. 6. — P. 957–976.]
2. Квинто Я.И., Хлебников М.В. Верхние оценки больших отклонений в линейных системах при наличии неопределенности // Проблемы управления. — 2018. — № 3. — С. 2–7. [Kvinto, Ya.I., Khlebnikov, M.V. Upper Estimate of Large Deviations in Linear Systems in Presence of Uncertainty // Control Sciences. — 2018. — No. 3. — P. 2–7. (In Russian)]
3. Квинто Я.И., Хлебников М.В. Верхние границы максимального отклонения траектории в линейных дискретных системах: робастная постановка // Управление большими системами. — 2019. — Вып. 77. — С. 59–79. [Kvinto, Ya. I., Khlebnikov, M.V. Upper Bounds of Large Deviations in Linear Discrete-Time Systems: The Robust Statement // Large-Scale Systems Control. — 2019. — Iss. 77. — P. 59–79. (In Russian)]
4. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. — М.: Физматлит, 2007. — 280 с. [Balandin, D.V., Kogan, M.M. Sintez zakonov upravleniya na osnove lineinykh matrichnykh neravenstv (LMI-based Control System Design). — Moscow: Fizmatlit, 2007. — 280 s. (In Russian)]
5. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 560 с. [Polyak, B.T., Khlebnikov, M.V., Shcherbakov, P.S. Control of Linear Systems Subjected to Exogenous Disturbances: An LMI Approach. — Moscow: LENAND, 2014. — 260 s. (In Russian)]
6. Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory. — Philadelphia: SIAM, 1994.
7. Назин С.А., Поляк Б.Т., Топунов М.В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 3. — С. 106–125. [Nazin, S.A., Polyak, B.T., Topunov, M.V. Rejection of Bounded Exogenous Disturbances by the Method of Invariant Ellipsoids // Automation and Remote Control. — 2007. — Vol. 68, No. 3. — P. 467–486.]
8. Поляк Б.Т., Топунов М.В., Щербаков П.С. Идеология инвариантных эллипсоидов в задаче о робастном подавлении ограниченных внешних возмущений // Стохастическая оптимизация в информатике. — 2007. — Т. 3, № 1-1. — С. 51–84. [Polyak, B.T., Topunov, M.V., Shcherbakov, P.S. The Invariant Ellipsoid Ideology in Robust Rejection of Exogenous Bounded Disturbances // Stochastic Optimization in Informatics. — 2007. — Vol. 3, No. 1-1. — P. 51–84. (In Russian)]
9. Хлебников М.В., Поляк Б.Т., Кунцевич В.М. Оптимизация линейных систем при ограниченных внешних возмущениях (техника инвариантных эллипсоидов) // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 11. — С. 9–59. [Khlebnikov, M.V., Polyak, B.T., Kuntsevich, V.M. Optimization of Linear Systems



Subject to Bounded Exogenous Disturbances: The Invariant Ellipsoid Technique // Automation and Remote Control. — 2011. — Vol. 72, No. 11. — P. 2227–2275.]

10. Grant, M., Boyd, S. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, Version 2. 1. — URL: <http://cvxr.com/cvx/>.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.П. Боровских.

Квинто Яна Игоревна — канд. техн. наук, ✉ yanakvinto@mail.ru,

Хлебников Михаил Владимирович — д-р физ.-мат. наук, ✉ khlebnik@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

Поступила в редакцию 27.01.2019.

Принята к публикации 4.04.2019.

UPPER BOUNDS OF THE DEVIATIONS IN LINEAR DYNAMICAL SYSTEM WITH BOUNDED DISTURBANCES

Ya.I. Kvinto[#], M.V. Khlebnikov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia

[#] ✉ yanakvinto@mail.ru

Abstract. A practically significant effect of a surge occurrences in linear dynamical systems under nonzero initial conditions is explored. The linear dynamical system subjected to unknown-but-bounded exogenous disturbances is considered. Using the apparatus of linear matrix inequalities and the invariant ellipsoids concept, the estimations of the upper bounds of the trajectories deviations are obtained, and an approach is suggested to the feedback design that minimizes the deviations. The efficacy of the approach proposed is illustrated on numerical examples.

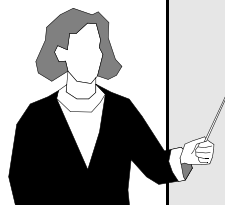
Keywords: linear dynamical system, trajectories deviations, bounded exogenous disturbances, LMIs, invariant ellipsoids.

Funding. The work is performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (grant No. 18-08-00140).



Читайте в ближайших номерах

- ✓ Бабушкина Н.А., Кузина Е.А., Лоос А.А., Беляева Е.В. Математическое моделирование управления противоопухолевой вакцилотерапией
- ✓ Василюк Н.Н. Слабое комплексирование инерциальных и спутниковых измерений при помощи расширенного фильтра Калмана с кватернионным представлением ориентации
- ✓ Егорова Л.Г., Мячин А.Л. Структура российского сообщества экономистов и его отношение к российским экономическим журналам. Ч. 2.
- ✓ Логиновский О.В., Гельруд Я.Д., Голлай А.В. Применение детерминированных и стохастических моделей для замены оборудования промышленных предприятий
- ✓ Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Коньков А.Е., Патров М.И. Управление плазмой в токамаках. Ч. 3.2.
- ✓ Новиков Д.А. Классификации систем управления



РАСШИРЕННАЯ МОДЕЛЬ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА ПРИ БИНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЕГО РАБОТ

В.В. Топка

Аннотация. Рассмотрен инновационный проект, между работами которого имеется взаимодействие — технологическое, ресурсное, вероятностное, бюджетное и пр. Отмечено, что бинарное взаимное воздействие работ по вероятности в рамках проекта приводит к синергетическому эффекту: совместное выполнение двух и более работ проекта может усилить (или ослабить) их результирующий эффект. Для технологической сети инновационного проекта построена логистическая модель учета взаимовлияний (cross-impact), рассмотрена и решена задача нахождения совместных значений вероятностей технического успеха реализации работ проекта, а также задача минимизации стоимости в расширенной модели инновационного проекта.

Ключевые слова: инновационный проект, анализ взаимовлияний, логистическая модель, совместные оценки, стоимость проекта, метод линеаризации.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках работ по планированию исследований и разработок выделяется направление, рассматривающее взаимодействие проектов одной и той же программы, или работ одного и того же проекта. Это взаимодействие может быть технологическим, ресурсным, вероятностным, бюджетным и пр. В работе [1] рассмотрена модель выбора проектов, когда они в пределах программы взаимодействуют между собой в различных формах:

- 1) совместное использование ресурсов;
- 2) техническое вероятностное взаимодействие;
- 3) взаимодействие результатов программы.

Первая из них относится к случаю, когда проекты используют общие ресурсы — оборудование, персонал. Вторая форма осуществляется, когда успех или неудача одного раздела проекта значительно усиливает или задерживает выполнение других разделов проекта операций. При этом вероятность технического успеха некоторой операции является функцией вероятности технического успеха других операций. Наконец, в третьем случае успех обоих проектов приводит к снижению цены выпускаемых товаров. В условиях взаимодействия разделов

проекта ставится задача максимизации функции текущего значения дохода (Present Value — *англ.*) при ограничениях на ассигнования. Эта задача решается методами целочисленного линейного программирования. В статье [2] рассматривается задача формирования портфеля проектов, ряд из которых взаимозависимы в том смысле, что включение обоих проектов дает дополнительный эффект (положительный или отрицательный). На включение в состав портфеля имеется n проектов-претендентов. Обозначим a_i — эффект от проекта i , a_{ij} — дополнительный эффект, если в портфель включены оба проекта i и j , c_i — затраты на проект i . Введем переменные $x_i = \{0; 1\}$. Если проект i включен в проект, то $x_i = 1$, в противном случае $x_i = 0$. Задача заключается в формировании портфеля проектов, имеющего максимальный эффект при ограниченных средствах R на реализацию проектов. В задаче имеется довольно обременительное предположение, что a_i , a_{ij} , c_i — целые числа для всех i, j ; R — целое положительное число. Частный случай изложенной задачи приведен в последующей статье [3]. Другой частный случай приведен в работе [4], где взаимозависимость ин-



терпретируется как способность бизнес-проекта развивать ряд сопутствующих бизнесов, поэтому такие проекты авторы назвали «бизнесобразующими». Верхняя оценка решения задач максимизации из работ [2—4] может быть найдена методом сетевого программирования [5].

1. АНАЛИЗ ВЗАИМОВЛИЯНИЙ

При изучении взаимосвязи социально-экономических явлений ряд авторов (см. книгу [6] и приведенную в ней библиографию) предполагают наличие вектора наблюдений рассматриваемых показателей, что позволяет им широко применять методы корреляционного и регрессионного анализа. При анализе неповторяющихся событий в практике научно-технического прогнозирования применяется подход, именуемый *cross-impact* (анализ взаимовлияний — *англ.*), который основан на обработке экспертных данных о степени их взаимосвязи. Пусть дана система $j, k \in [\overline{1, n}]$ событий, каждому из которых поставлена в соответствие переменная $p_j \in [0, 1]$. Если рассматривается система событий, наступление которых в будущем вероятно, то будем говорить о величине p_j как о вероятности (степени субъективной уверенности) в том, что j -е событие произойдет. Предполагается, что рассматриваемые события влияют друг на друга, и существует некоторая мера оценки влияния вероятности безотказного осуществления события k на вероятность безотказного осуществления события j — число c_{jk} . Эти числа заданы в виде матрицы $\mathbf{C} = (c_{jk})$. Задача состоит в том, чтобы на основании оценки текущего состояния системы при принятых гипотезах относительно ее поведения дать оценку возможного будущего состояния системы. Согласно работе [7] p есть функциональная причина p_j , если существует такая функция P , что $p_j = P(p)$. В литературе предлагаются различные виды функций P , которые имеют эвристическую ценность, однако широко применяются в практике научно-технического прогнозирования.

Предложен подход [8] к анализу взаимовлияний, который приводит к отказу от применения аппарата чистых условных вероятностей в качестве коэффициентов взаимовлияния c_{jk} и в котором используется априорное построение причинных функций. В качестве одной из них была предложена [8] функция, удовлетворяющая уравнению

$$dp_j = p_j(1 - p_j) \sum_{k \neq j}^n c_{jk} dp_k, \quad j, k \in [\overline{1, n}]. \quad (1)$$

Вид функции в правой части уравнения (1) выбирается из тех соображений, что никакие изменения в вероятностях взаимовлияющих событий не могут изменить вероятность события, которое достоверно происходит или достоверно не происходит. Поэтому функция в правой части должна иметь корни p_j и $1 - p_j$. Эмпиризм предлагаемого подхода состоит в том, что остальная часть функции (учитывающая члены высших степеней) принимается равной константе c_{jk} , значение которой определяется путем экспертного опроса.

Решение уравнения (1), как нетрудно показать, представляет собой логистическую функцию

$$p_j = \left[1 + \exp \left(- \sum_{k \neq j}^n c_{jk} p_k + C_j \right) \right]^{-1}.$$

Действительно, представив уравнение (1) в виде $\frac{dp_j}{p_j(1 - p_j)} = \sum_{k \neq j}^n c_{jk} dp_k$, получим

$$\ln \frac{p_j}{1 - p_j} = \sum_{k \neq j}^n c_{jk} p_k + C_j.$$

Граничные условия имеют вид: $p_j|_{(c_{jk})=(0)} = p_j^0$, поэтому последнее соотношение приобретает вид

$$p_j = \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0} \exp \left(- \sum_{k \neq j}^n c_{jk} p_k \right) \right]^{-1}. \quad (2)$$

Поскольку для p_k можно выписать такое же соотношение, то, объединяя их, получим

$$p_j = \left[1 + \frac{1 - p_j^0}{p_j^0} \exp \left(- \sum_{k \neq j}^n c_{jk} \times \left[1 + \frac{1 - p_k^0}{p_k^0} \exp \left(- \sum_{i \neq k}^n c_{ki} p_i \right) \right]^{-1} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Итак, в модели (2), (3) рассматриваются n событий, разработок, между которыми существует взаимодействие, такое что осуществление или принципиальная невозможность осуществления события k влияет на вероятность p_j осуществления события j , и эта связь описывается матрицей взаимовлияний $\mathbf{C} = (c_{jk})$. При этом обоснованность выбора логистической модели подтверждается широтой применения такого рода зависимостей в научно-техническом прогнозировании [9—12], когда показатели, характеризующие рассматриваемую систему, являются монотонно возрастающими с насыщением.

В отсутствие взаимовлияния, вероятность p_j безотказного осуществления разработки j совпадает с индивидуальной вероятностью (показателем надежности) $p_j^0(u_j)$ ее технического успеха и монотонно стремится к единице по мере роста коэффициентов взаимовлияния c_{jk} . Как было показано в работе [13], функция распределения вероятности $p_j^0(u_j)$ подчиняется двухпараметрическому распределению Вейбулла: $p_j^0(u_j) = 1 - \exp(-b_j u_j^{\alpha_j})$, где $\alpha_j > 0$, $\alpha_j \neq 1$ — параметр формы, $b_j > 0$ — параметр масштаба, $u > 0$ — однородный невозобновимый (складируемый) ресурс. Данная модель применяется для повышения обоснованности получаемых традиционными методами вероятностных оценок развития образцов новой техники путем учета перекрестного влияния между некоторыми разработками.

2. РАСШИРЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗНОГО ГРАФА И МЕТОДА РЕШАЮЩИХ МАТРИЦ НА БАЗЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ

Модель (2), (3) предназначена для описания технологических зависимостей между операциями, разработками. Конъюнктивная технологическая сеть $G(E, \Gamma)$, где E — множество вершин-работ, а $\Gamma \subset E \times E$ — множество дуг, задающих технологические отношения частичного порядка предшествования работ инновационного проекта или технологические связи прогнозного графа [14], сочетается с методом решающих матриц $G(t) = (\gamma_{ij}(t))$ [15], которые задают коэффициенты вклада средств j в решение задачи i .

В настоящей работе в дополнение к конъюнктивным технологическим связям основной модели предложена модель синтеза комплекса операций, дополняющая известные модели прогнозного графа В.М. Глушкова, в сочетании с методом решающих матриц Г.С. Пospelова. В этой расширенной модели нетехнологические взаимосвязи дополнительной решающей матрицы (ОКР—ОКР), задающей коэффициенты c_{ki} вклада k -й разработки в решение i -й разработки представлены бинарным взаимным воздействием разработок по методу анализа взаимовлияний.

Модель прогнозного графа В.М. Глушкова [14, с. 152] рассмотрим в конкретной интерпретации — как задачи прогнозирования научно-технического прогресса. Предположим, что требуется оценить вероятное время и пути решения некоторого числа нерешенных сегодня научно-технических проблем. Пусть есть описание научно-техни-

ческих проблем в виде сетевого графика с наличием альтернативных путей (которые не обязательно будут пройдены при реализации графика) и используются вероятностные оценки для продолжительности переходов от одних событий к другим. Предположим далее, что каждой из указанных проблем s_i приписан некоторый весовой коэффициент λ_i , $i = 1, 2, \dots, m$, определяющий относительную важность этой проблемы по сравнению с остальными. Цель состоит в решении всех указанных проблем, а в качестве критерия качества управления — минимизация суммы $\sum_i \lambda_i \tau_i$, где τ_i — срок, потребовавшийся для решения проблемы s_i при заданных суммарных ресурсах R , отпущенных на решение всех этих проблем.

Первоначальная структуризация проблемы состоит в том, чтобы дополнить список поставленных проблем (называемых далее конечными или основными целями) s_1, s_2, \dots, s_m новыми проблемами (промежуточными целями) $s_{m+1}, s_{m+2}, \dots, s_{m+n}$, решение которых может оказаться необходимым или полезным для достижения конечных целей. Каждому из выделенных элементов s_i приписываются два булевых параметра $\alpha_i(t)$ и $\beta_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, m + n$. Первый из них характеризует состояние элемента (проблема s_i решена или не решена), а второй — управляющее воздействие (проблема s_i поставлена в план и финансируется или нет). Вводится также оценка вероятности $P_i(t)$ того, что к моменту времени t проблема s_i окажется решенной, иными словами, вероятность того, что $\alpha_i(t) = 1$, $i = 1, 2, \dots, m + n$. Так же, как и про конечные цели, про промежуточные цели нельзя сказать, что они, в общем случае, являются независимыми.

В методе решающих матриц Г.С. Пospelова [15, с. 213] элементы *матрицы влияния* (задачи — ОКР) $G(t) = (\gamma_{ij}(t))$ (основные цели — промежуточные цели) являются коэффициентами γ_{ij} вклада j -й ОКР в решение i -й задачи, $i, j = \overline{1, n}$, и определяются методами обработки экспертных оценок. Кроме нее, для оценки взаимодействия промежуточных целей будем рассматривать *матрицу взаимовлияния* «ОКР — ОКР» $C = (c_{jk})$. Сетевую модель прогнозного графа, вершинам которой соответствуют проблемы (основные плюс промежуточные цели) $s_1, s_2, \dots, s_m, s_{m+1}, \dots, s_{m+n}$, подлежащие решению с вероятностью безотказного исполнения $P_i(\alpha_i(t) = 1)$, включающую в себя решающую матрицу $G(t) = (\gamma_{ij}(t))$ «задачи — ОКР», дополним матрицей $C = (c_{jk})$ взаимовлияния (ей соответствуют

дуги $(j, k) \& (k, j) \in \tilde{\Gamma}$ сети) промежуточных целей (ОКР — ОКР) — $(s_{m+1}, \dots, s_{m+n})$ и, таким образом, получим расширенную модель, которую будем применять в интересах планирования инновационных проектов. Оценку параметров взаимовлияния промежуточных целей выполним по логистической модели (2) метода анализа взаимовлияний (cross-impact). В работе [14, с. 152] осуществление основных целей прогнозного графа обеспечивается выполнением промежуточных целей (задач), подлежащих решению с вероятностью безотказного исполнения $P_i(\alpha_i(t) = 1)$.

Для решающих матриц выберем их представление в виде ориентированного графа с весами α_{ij} , β_{ij} , γ_{jk} на дугах, а в вершинах заданы вероятности безотказного исполнения $P_i(\alpha_i(t) = 1)$, которые могут служить показателем надежности выполнения данной работы. Между i -ми средствами существует, вообще говоря, взаимное влияние, которое может иметь синергетический (или напротив) эффект. Будем его описывать при помощи матрицы $C = (c_{ki})$, определяющей вероятностную функцию взаимовлияния $P(c_{ki}, u_k, u_i)$ или показатель надежности выполнения k -й разработки, которая для каждого рассматриваемого этапа проводимых исследований и разработок последовательно имеет выражение или $P_{\alpha_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i)$, или $P_{\beta_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i)$, или $P_{\gamma_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i)$. Тогда надежность реализации основных целей определяется слабейшим звеном

$$P_{n+1} = \min_{\mu} \prod_{(i,j) \in \mu} \alpha_{ij} P_{\alpha_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i) \times \beta_{ij} P_{\beta_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i) \gamma_{ij} P_{\gamma_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i). \quad (4)$$

Упростив, единообразно запишем:

$$P_{n+1} = \min_{\mu} \prod_{(i,j) \in \mu} \kappa_{ij} P_{\kappa_{ij}}(c_{ki}, u_k, u_i), \quad (5)$$

где для проводимых исследований и разработок, κ_{ij} в формуле (5) последовательно принимает значения из множества

$$\kappa_{ij} = \begin{cases} \alpha_{ij} & \text{— фундаментальные} \rightarrow \text{прикладные,} \\ \beta_{ij} & \text{— прикладные} \rightarrow \text{ОКР,} \\ \gamma_{ij} & \text{— ОКР} \rightarrow \text{задачи,} \end{cases}$$

и в результате такой записи получается выражение (4).

Таким образом, между этапами научно-технического процесса имеются некоторые «передаточные коэффициенты», задаваемые решающими

матрицами (α_{ij}) , (β_{ij}) , (γ_{ij}) . Наглядно это можно представить так, что промежуточные цели упорядочены в работе [15, с. 213] по подчиненности:

задачи $\tilde{\gamma}_{ij}$ ОКР $\tilde{\beta}_{ij}$ прикладные исследования $\tilde{\alpha}_{ij}$ фундаментальные исследования, где коэффициенты решающих матриц α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} — нормированные по индексу i коэффициенты важности вклада i -го средства в достижение j -й цели.

Взаимное воздействие разработок, среди прочего, включает в себя такие виды, когда повышение вероятности осуществления одной разработки приводит к повышению (понижению) вероятности осуществления другой (вероятностное взаимодействие) или когда операции совместно используют один ресурс (перемещение ресурса на другую операцию).

В качестве общей статической модели (5) зависимости показателя надежности P_{n+1} комплекса разработок от вложенного однородного складированного ресурса $\{u_j\}$, с учетом бинарного (перекрестного) взаимного воздействия вероятности безотказного осуществления разработок, предлагается модель логистического вида:

$$P_{n+1} = \min_{\mu} \prod_{(i,j) \in \mu} \kappa_{ij} \left[1 + \frac{1-p_i^0}{p_i^0} \exp\left(-\sum_{k \neq i} c_{ik} p_k\right) \right]^{-1},$$

где c_{ik} — коэффициенты взаимного влияния разработок, которые определяются для случая взаимодействия по вероятности следующим образом.

Чтобы избежать неточной процедуры шкалирования, возникающей при оценке коэффициентов c_{jk} , воспользуемся граничными условиями в точках $p_k = 1$ и $p_k = 0$ для соотношения (2):

$$p_j = p(j|p_k = 1) = \left[1 + \frac{1-p_j^0}{p_j^0} \exp(-c_{jk}) \right]^{-1},$$

откуда

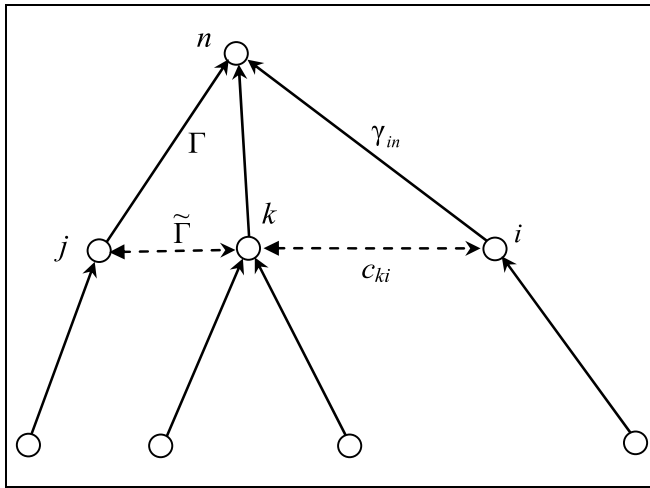
$$\exp(-c_{jk}) = \frac{1-p_j}{p_j} \cdot \frac{p_j^0}{1-p_j^0}.$$

Тогда

$$c_{jk} = \ln \frac{R_{jk}}{1-R_{jk}} - \ln \frac{Q_{jk}}{1-Q_{jk}}, \quad (6)$$

где $R_{jk} = p(j|p_k = 1)$ и $Q_{jk} = p(j|p_k = 0)$.

Таким образом, для получения коэффициентов взаимовлияния c_{jk} необходимо задать исходные данные — значения условных вероятностей



Обобщенная модель технологической сети проекта и взаимного влияния между работами (cross-impact)

$p(j|p_k = 1)$ и $p(j|p_k = 0)$, которые определяются путем опроса высококвалифицированных специалистов — экспертов и последующего представления полученной информации на основе методов обработки экспертных оценок [16].

В настоящей работе в качестве функции содействия применяется логистическая функция (2), удовлетворяющая требованиям непрерывности и ограниченности.

Таким образом, модель, обобщающая в прогнозируемом графе как явление воздействия между исследованиями и разработками по способу задания решающих матриц (по вертикали), так и эффект перекрестного (по горизонтали) взаимовлияния между ними по вероятности, может быть записана в виде:

$$P_{n+1} = \min_{\mu_l} \prod_{(i,j) \in \mu_l} \kappa_{ij} \left[1 + \frac{1-p_i^0}{p_i^0} \exp\left(-\sum_{k \neq i} c_{ik} p_k\right) \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $k \in K = \{k | \exists i \in I: c_{ki} \neq 0\}$, p_i^0 — вероятность технического успеха разработки i в отсутствие взаимовлияния.

При $c_{ik} = 0$ модель (7) редуцируется к модели

$$P_{n+1} = \min_{\mu_l} \prod_{(i,j) \in \mu_l} \kappa_{ij} p_i^0(u_i). \text{ А в общем случае она}$$

описывает функцию распределения вероятности технического успеха, характеризующую степень достижения цели комплекса научно-исследовательских разработок, а также то позитивное/негативное воздействие, которое оказывают некоторые важные разработки на вероятность осуществления других связанных с ними разработок. Пример

сети, иллюстрирующей эту модель, приведен на рисунке.

Здесь сплошными линиями отмечены связи технологического характера, штриховыми — бинарные взаимные вероятностные связи на подмножестве операций.

3. СОВМЕСТНЫЕ ОЦЕНКИ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНАЛИЗА ВЗАИМОВЛИЯНИЙ

Одной из основных задач анализа взаимовлияний является отыскание совместных (непротиворечивых) оценок вероятностей технического успеха p_j при известных c_{ji} ; $i, j \in [\overline{1, r}]$. На координатной плоскости Π_{ij} (двумерный случай) имеем систему из двух уравнений. Координаты p_j^* решения отыскиваются из уравнений вида

$$F_j(p_j) = p_j - \left[1 + \frac{1-p_j^0}{p_j^0} \exp\left(-c_{ji} \frac{1}{1 + \frac{1-p_i^0}{p_i^0} \exp(-c_{ij} p_j)}\right) \right]^{-1} = 0 \quad (8)$$

при помощи одномерного поиска по методу золотого сечения или методу Фибоначчи.

Для уравнения (8) p_j обозначим через x , а c_{ij} определяется по формуле (6). Результаты пяти тестовых расчетов с помощью системы MATLAB (R2009b) приведены в таблице. Видно, что при неизменных значениях p_j^0 и p_i^0 : $p_j = p_i = 0,5$ только благодаря изменению параметров взаимозависимости разработок: условных вероятностей осуществления разработок $R_{ji} = p(j|p_i = 1)$ и $Q_{ji} = p(j|p_i = 0)$ и, соответственно, R_{ij} и Q_{ij} , на основе которых рассчитаны коэффициенты взаимовлияния c_{ji} ; $i, j \in [\overline{1, r}]$ по формуле (6), принимающие значения от $c_{ji} = -4,3944$ до $c_{ji} = +4,3944$, получено изменение показателя $p_j = x1$ (вероятности осуществления разработки) от 0,25 до 0,9871. Эти расчеты наглядно показывают наличие эффекта взаимовлияния.

4. ЗАДАЧА НА МИНИМУМ СТОИМОСТИ В РАСШИРЕННОЙ МОДЕЛИ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

Расширенная сетевая модель (7), учитывающая эффект взаимовлияния по вероятности между некоторыми разработками, которое оказывает воздействие на функцию распределения вероятности



Результаты расчетов

Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4	Пример 5
$R_{ji} = 0,1$	$R_{ji} = 0,2$	$R_{ji} = 0,5$	$R_{ji} = 0,8$	$R_{ji} = 0,9$
$Q_{ji} = 0,9$	$Q_{ji} = 0,8$	$Q_{ji} = 0,5$	$Q_{ji} = 0,2$	$Q_{ji} = 0,1$
$c_{ji} = -4,3944$	$c_{ji} = -2,7726$	$c_{ji} = 0$	$c_{ji} = 2,7726$	$c_{ji} = 4,3944$
$R_{ij} = 0,1$	$R_{ij} = 0,2$	$R_{ij} = 0,5$	$R_{ij} = 0,8$	$R_{ij} = 0,9$
$Q_{ij} = 0,9$	$Q_{ij} = 0,8$	$Q_{ij} = 0,5$	$Q_{ij} = 0,2$	$Q_{ij} = 0,1$
$c_{ij} = -4,3944$	$c_{ij} = -2,7726$	$c_{ij} = 0$	$c_{ij} = 2,7726$	$c_{ij} = 4,3944$
$p_j = 0,5$	$p_j = 0,5$	$p_j = 0,5$	$p_j = 0,5$	$p_j = 0,5$
$p_i = 0,5$	$p_i = 0,5$	$p_i = 0,5$	$p_i = 0,5$	$p_i = 0,5$
$x1 = 0,2500$	$x1 = 0,3021$	$x1 = 0,5$	$x1 = 0,9293$	$x1 = 0,9871$

технического успеха всего планируемого комплекса, в условиях минимизации стоимости комплекса работ имеет вид задачи нелинейного программирования:

$$\sum_{j=1}^n c_j u_j \rightarrow \inf_{\substack{u \in U \\ \varepsilon \leq p \leq 1-\varepsilon}}; \quad u = (u_1, \dots, u_n), \quad p = (p_1, \dots, p_n),$$

$$\varepsilon \leq p_j \leq 1 - \varepsilon, \quad j = \overline{1, n};$$

$$P_{n+1} =$$

$$= \min_{\mu_l} \prod_{(i,j) \in \mu_l} \kappa_{ij} \left[1 + \frac{1-p_i^0}{p_i^0} \exp \left(- \sum_{k \neq i} c_{ik} p_k \right) \right]^{-1} \geq p_0;$$

$$p_j = \left[1 + \frac{1-p_j^0}{p_j^0} \exp \left(- \sum_{k \neq j} c_{jk} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[1 + \frac{1-p_k^0}{p_k^0} \exp \left(- \sum_{i \neq k} c_{ki} p_i \right) \right]^{-1} \right) \right]^{-1};$$

$$p_j^0(u_j) = 1 - \exp(-b_j u_j^{\alpha_j}); \quad \alpha_j, \beta_j > 0, \alpha_j \neq 1;$$

$$p_0 \in (0, 1);$$

$$l = \overline{1, m}; \quad i, j, k = \overline{1, n};$$

$$c_{jk} = \ln \frac{R_{jk}}{1-R_{jk}} - \ln \frac{Q_{jk}}{1-Q_{jk}}. \quad (9)$$

Выполним замену переменных:

$$u_j = \left[\frac{-1}{b_j} \ln(1-p_j^0) \right]^{1/\alpha_j}. \quad (10)$$

Задача (9) принимает вид:

$$f(p^0) = \sum_{j=1}^n c_j \left[\frac{-1}{b_j} \ln(1-p_j^0) \right]^{1/\alpha_j} \rightarrow \inf_{p, p^0},$$

$$g(p) = \ln p_0 - \sum_{j \in \mu_l} \ln p_j - \sum_{(i,j) \in \mu_l} \ln \kappa_{ij} \leq 0,$$

$$p_0 \in (0, 1), (i, j) \in \Gamma, \forall l = \overline{1, m},$$

$$g_j(p, p^0) = p_j - \left[1 + \frac{1-p_j^0}{p_j^0} \exp \left(- \sum_{k \neq j} c_{jk} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[1 + \frac{1-p_k^0}{p_k^0} \exp \left(- \sum_{i \neq k} c_{ki} p_i \right) \right]^{-1} \right) \right]^{-1} = 0,$$

$$p_j^0(u_j) = 1 - \exp(-b_j u_j^{\alpha_j}); \quad \alpha_j, b_j > 0, \alpha_j \neq 1;$$

$$(j, k), (k, j) \in \tilde{\Gamma}; \quad j, k = \overline{1, n};$$

$$c_{jk} = \ln \frac{R_{jk}}{1-R_{jk}} - \ln \frac{Q_{jk}}{1-Q_{jk}}. \quad (11)$$

Данная задача нелинейного программирования решается с помощью локального метода линеаризации в изложении Б.Т. Поляка — квадратичной аппроксимации целевой функции, линеаризации ε -активных ограничений и, при условии неотрицательности части двойственных переменных, сводится к задаче квадратичного программирования, для решения которой применяется метод сопряженных градиентов, сходящийся в этом случае не более чем за $m - n$ шагов. Поскольку данный метод — локальный, то нужно решить задачу для нескольких различных начальных точек и из полученных решений выбрать минимальное.

Эффективный при большом числе выпуклых ограничений типа нестрогих неравенств метод релаксации ограничений [17] или метод сепарабельного программирования в силу того, что в задаче (11) имеются нелинейные невыпуклые ограничения типа равенств, то эти методы становятся неприемлемы для решения данной задачи. Несмотря на то, что задача (9) сложнее рассмотренных ранее [18], она, после замены переменных, разрешима путем применения метода линеаризации в изложении Б.Т. Поляка [19, с. 263]. После того, как в

последней задаче будут найдены оптимальные значения $p_j^0(u_j)$, из выражения (10) определяем оптимальные значения невозобновимых (складируемых) ресурсов $u^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В практике выполнения инновационных проектов не исключено, что часть из работ проекта будет оказывать некоторое влияние (положительное или отрицательное) на результат выполнения других, как-то связанных с ними работ. Поэтому такое бинарное перекрестное взаимовлияние работ проектов следует, вообще говоря, учитывать. Бинарное взаимное воздействие работ по вероятности их осуществления в рамках проекта приводит к синергетическому эффекту: совместное осуществление двух и более работ проекта может усилить (или ослабить) их результирующий эффект. Для этих целей предложено применять известный из научно-технического прогнозирования подход анализа взаимовлияний (cross-impact) в виде логистической модели $p_j = P_j(c_{jk}, p_j^0, p_k)$, в которой функция распределения вероятности $p_j^0 = p_j^0(u_j, \alpha_j, b_j)$ подчиняется двухпараметрическому распределению Вейбулла, где $u_j > 0$ — однородный невозобновимый ресурс $j, k = \overline{1, n}$. Получено соотношение, определяющее коэффициенты взаимовлияния c_{jk} как функцию значений условных вероятностей $p(j|p_k = 1)$ и $p(j|p_k = 0)$, для нахождения которых применяют экспертные оценки и методы их обработки. Предложена расширенная модель, обобщающая в прогнозном графе как явление воздействия между исследованиями и разработками по способу задания решающих матриц (снизу — вверх), так и эффект перекрестного (горизонтального) взаимовлияния между ними по вероятности. Если задана технологическая сеть инновационного проекта, то в работе построена логистическая модель учета бинарных перекрестных взаимных воздействий, рассмотрена здесь и решена задача нахождения совместных значений вероятностей технического успеха реализации работ проекта, а также сформулирована в этих условиях задача нелинейного программирования минимизации стоимости в расширенной модели инновационного проекта, для которой рекомендован эффективный метод ее решения. Данная модель применяется для повышения обоснованности получаемых традиционными методами вероятностных оценок реализации работ инновационных проектов, а, следовательно,

и проектов в целом путем учета перекрестного взаимовлияния между некоторыми разработками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aaker, D.A., Tyebjee, T.T. A model for the selection of interdependent R&D projects // IEEE Trans. on Engineering Management. — 1978. — Vol. 25, No. 2. — P. 30—36.
2. Дранко О.И. Формирование портфеля взаимозависимых проектов // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 7, № 5. — С. 209—212. [Dranko, O.I. Formation of a Portfolio of Interdependent Projects // Bulletin of Voronezh State Technical University. — 2011. — Vol. 7, No. 5. — P. 209—212. (In Russian)]
3. Дранко О.И., Андрианова И.И., Зенищева Г.В. Задача формирования портфеля проектов, ряд из которых взаимозависимы // Системы управления и информационные технологии. — 2012. — Т. 50, № 4.1. — С. 138—141. [Dranko, O.I., Andrianova, I.I., Zenisheva, G.V. The Problem of Forming the Project Portfolio, Some of Which are Interdependent // Management Systems and Information Technology. — 2012. — Vol. 50, No. 4.1. — P. 138—141. (In Russian)]
4. Буркова И.В., Моисеева Ю.В., Цветков А.В., Андрианова И.И. Задача формирования портфеля бизнесобразующих проектов // Экономика и менеджмент систем управления. — 2012. — № 4.3 (6). — С. 349—355. [Burkova, I.V., Moiseeva, Yu. V., Tsvetkov, A.V., Andrianova, I.I. Problem of Formation of the Portfolio Business Forming Projects // Ekonomika i Menedzhment Sistem Upravleniya. — 2012. — No. 4.3 (6). — P. 349—355. (In Russian)]
5. Бурков В.Н., Буркова И.В., Попок М.В., Овчинникова Т.И. Метод сетевого программирования // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 23—29. [Burkov, V. N., Burkova, I.V., Popok, M.V., Ovchinnikova, T.I. Network Programming Techniques // Control Sciences. — 2005. — No. 3. — P. 23—29. (In Russian)]
6. Бородин Ф.М. Статистическая оценка связей экономических показателей. — М.: Статистика, 1968. — 204 с. [Borodkin, F.M. Statistical Evaluation of Economic Indicators. — Moscow: Statistics, 1968. — 204 p. (In Russian)]
7. Suppes, P. Probabilistic Theory of Causality. Acta Philosophical Fennica Fasc. XXIV. — Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1970.
8. Turoff, M. An Alternative Approach to a Cross-Impact Analysis // Technological Forecasting and Social Change. — 1972. — No. 3. — P. 309—339.
9. Бешелев С.Д. Интенсификация научных исследований. — М.: Машиностроение, 1983. — 183 с. [Beshelev, S.D. Intensification of Scientific Research. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1983. — 183 p. (In Russian)]
10. Рабочая книга по прогнозированию / Отв. ред. И.В. Бестужев-Лада. — М.: Мысль, 1982. — 426 с. [Workbook on Forecasting / Ed. I.V. Bestuzhev-Lada. — Moscow: Mysl', 1982. — 426 p. (In Russian)]
11. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. — М.: Прогресс, 1974. — 592 с. [Jantsch, E. Technological forecasting in perspective: a framework for technological forecasting, its techniques and organization. — Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 1967. — 401 p.]
12. Bright, I.R. A Guide to Practical Technological Forecasting. — NY: Prentice-Hall, 1972.
13. Тонка В.В. Лексикографическое решение двухкритериальной задачи планирования проекта при ограничении на показатель его надежности // Изв. РАН. Теория и системы



- управления. — 2014. — № 6. — С. 105–123. [Topka, V.V. Lexicographic Solution of Two-Objective Project Planning Problem Under Constrained Reliability Index // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2014. — Vol. 53, No. 6. — P. 877–895.]
14. Глушков В.М. Введение в АСУ. — Киев: Техника, 1974. — 319 с. [Glushkov, V.M. Introduction to Automated System. — Kyiv: Tekhnika, 1974. — 319 p. (In Russian)]
 15. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление (Введение). — М.: Советское радио, 1976. — 440 с. [Pospelov, G.S., Irikov, V.A. Program-Target Planning and Management (Introduction). — Moscow: Soviet Radio, 1976. — 440 p. (In Russian)]
 16. Литвак Б.Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа. — М.: Радио и связь, 1982. — 184 с. [Litvak, B.G. Expert Information. Methods of Obtaining and Analysis. — Moscow: Radio i svyaz, 1982. — 184 p. (In Russian)]
 17. Топка В.В. Минимизация стоимости проекта большой размерности при ограничении на его показатель надежности и линейных связях между переменными // Тр. Ин-та системного анализа РАН. — 2014. — № 4. — С. 19–32. [Topka, V.V. Minimizing the Cost of the Project of Large Dimension with a Restriction on its Reliability and Linear Relationships Between Variables // Proceedings of Institute for System Analysis of RAS. — 2014. — No. 4. — P. 19–32. (In Russian)]
 18. Топка В.В. Управление стоимостью проекта с учетом показателя его надежности // Информационные технологии. — 2012. — № 2 (186). — С. 60–66. [Topka, V.V. Project Cost Management under Taking into Account its Reliability Index // Information Technologies. — 2012. — No. 2 (186). — P. 60–66. (In Russian)]
 19. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию: изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Ленанд, 2014. — 263 с. [Polyak, B.T. Introduction to optimization: 2nd ed. — Moscow: Lenand, 2014. — 263 p. (In Russian)]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.*
- Топка Владимир Владимирович** — канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ topka3@mail.ru.
- Поступила в редакцию 16.07.2018, после доработки 17.01.2019.
Принята к публикации 6.02.2019.*

EXTENDED MODEL OF THE INNOVATIVE PROJECT WITH BINARY INTERACTION OF ITS ACTIVITIES

V.V. Topka

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ topka3@mail.ru

Abstract. The innovative project is considered, whose activities are in interaction: technological, resource, probabilistic, budgetary, and other. It is noted that the binary mutual impact of activities within the project by probability leads to a synergistic effect: the joint implementation of two or more project activities can enhance (or weaken) their resulting effect. The logistic model of cross-impact registration is constructed for the technological network of the innovative project. The problem of finding the joint probabilities values for the technical success of the project activities implementation is considered and solved, as well as the problem of the cost minimization in the extended model of the innovative project.

Keywords: innovation project, cross-impact analysis, logistic model, joint estimations, project cost, linearization method.



Не забудьте подписаться!

Если Вы не успели подписаться на журнал «Проблемы управления», то подписку можно оформить через редакцию по льготной цене с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Позвоните по телефону (495) 330-42-66 или обратитесь по электронной почте ru@ipu.ru, и подписка будет оформлена за один день. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.

СТРУКТУРА РОССИЙСКОГО СООБЩЕСТВА ЭКОНОМИСТОВ И ЕГО ОТНОШЕНИЕ К РОССИЙСКИМ ЭКОНОМИЧЕСКИМ ЖУРНАЛАМ.

Ч. 1. Анализ методами латентных классов и теории коллективного выбора^{1,2}

Л.Г. Егорова, А.Л. Мячин

Аннотация. Проведен анализ структуры российского академического сообщества экономистов по результатам опроса участников нескольких российских конференций по экономике, а также анализ мнения этого сообщества о некоторых российских научных журналах по экономике и смежным дисциплинам. В первой части работы проведено разбиение сообщества экономистов на три основные группы: преподавателей в университетах, академических исследователей и экспертов-аналитиков, каждую из которых, в свою очередь, условно можно разделить на «продвинутых» и «традиционных» специалистов. На основе мнения данного сообщества о научной важности, престиже и интересе к некоторым экономическим журналам построены их рейтинги, отражающие предпочтения различных групп.

Ключевые слова: экономическое сообщество, экономические журналы, латентные классы, теория коллективного выбора.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы не утихают дискуссии о состоянии и перспективах развития отечественной экономической науки, одной из главных тем которых являются текущее состояние академического сообщества ученых-экономистов и тенденции его развития [1–7]. Не менее острая полемика ведется о методах оценки эффективности работы ученых (см., например, статью [8]) и институтов в целом [9, 10], которая сводится в основном к оценке публикационной активности ученых, а, следо-

вательно, и к необходимости построения рейтингов экономических журналов [11–15].

Анализу российского академического сообщества экономистов (РАСЭ, термин взят из работы [6]) посвящено множество публикаций [см., например, 1–7], авторы которых солидарны в наличии проблем РАСЭ, основные из которых заключаются в слабой интеграции и отставании от мировой экономической науки, а также в неоднородности сообщества и его расслоении на несколько групп ученых: «В стране параллельно сформировалось несколько сообществ экономистов, активно работающих и демонстрирующих научные результаты, важность и полезность которых определяется неодинаковыми критериями. Эти сообщества, как нам кажется, недостаточно взаимодействуют друг с другом» [1, с. 20]. Еще точнее это выразили авторы работы [3, с. 266]: «...наше академическое сообщество, по сути, состоит из двух частей с очень слабым пересечением. Экономисты, публикующиеся за рубежом, в основном не известны в России, и наоборот, те, кто играет ведущие роли в отечественной науке, не пробивают-

¹ Статья подготовлена в рамках Программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) и с использованием средств субсидии в рамках проекта повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов «5-100», а также при поддержке Лаборатории теории выбора и анализа решений Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

² Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, профессору Ф.Т. Алескерову за помощь в написании данной статьи.



ся на мировой рынок, а в массе своей и не пытаются этого делать», откликаясь на статью [2], в которой на основе анализа публикаций российских ученых-экономистов была выявлена и описана неоднородность РАСЭ. Такое разделение экономистов на две группы — «продвинутых», интегрированных в мировую экономическую науку, публикующихся в зарубежных журналах, находящихся в «основном русле исследований» мировой науки, и «традиционных», ориентированных на российскую науку и российские журналы, — было подробно описано и проанализировано в работах [5–7] на основе опросов участников самого сообщества.

Смежная (и не менее важная) проблема — качество российских журналов, напрямую влияющее на оценку работы экономистов, их признание и цитируемость в мире. Был проведен анализ места и роли российских научных экономических журналов в мировой экономической науке на основе различных библиометрических показателей с помощью баз РИНЦ, Web of Science и RePEc [2]. Оказалось, что российские журналы малозаметны в мире и имеют низкие международные рейтинги: «соседями ведущего российского журнала по экономике («Вопросы экономики» — *Авт.*) оказываются зарубежные издания на границе второй и третьей сотни рейтинга журналов по версии WoS» [2, с. 25]. Результат, по объективным причинам, весьма закономерный — в русскоязычных журналах будут публиковаться только участники РАСЭ. Для изменения ситуации и повышения престижа российских экономических журналов требуются большие усилия как со стороны «традиционных» экономистов, так и со стороны «продвинутых».

Однако в связи со спецификой различных целевых групп интересно проанализировать их мнение о российских журналах по экономике, чтобы понять, какие журналы представляют интерес для «продвинутых», и какие — для «традиционных» экономистов, а также исследовать, насколько по-разному могут оценивать журналы ученые в зависимости от их основного вида деятельности — научной, преподавательской или экспертно-аналитической.

В данной работе мы постараемся описать неоднородность российского сообщества экономистов, выделить подмножество экономистов, которых можно считать «продвинутыми» специалистами, обладающих современными знаниями в области экономики и смежных направлений, и которых можно считать экспертами, и учесть эту неоднородность сообщества экономистов при анализе мнения РАСЭ об экономических журналах в России. В первой части работы представлен анализ РАСЭ и выделены группы экономистов по основному виду деятельности, на основе мнений ко-

торых построены различные рейтинги российских научных журналов по экономике. Во второй части работы ранжирование журналов проводится с помощью методов анализа паттернов, в основе которых лежит представление российского академического экономического сообщества о своей структуре.

Статья является частью совместного проекта Института экономики Российской академии наук, Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Новой экономической ассоциации «Стратификация научного сообщества экономистов и ранжирование экономических журналов», разрабатываемого временным коллективом сотрудников в составе: В.С. Автономов (НИУ ВШЭ), Ф.Т. Алескеров (НИУ ВШЭ), Н.А. Бураков (ИЭ РАН), Л.Г. Егорова (НИУ ВШЭ), А.Л. Мячин (НИУ ВШЭ), О.А. Славинская (ИЭ РАН), А.Я. Рубинштейн (ИЭ РАН, руководитель исследования). Результаты работы обсуждались на XIX Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества.

Структура работы. В § 1 приведен обзор литературы по теме статьи, в § 2 описаны данные опроса, теоретические основы метода латентных классов и методов теории коллективного выбора, которые применялись для построения рейтингов журналов. В § 3 приведены результаты разбиения сообщества экономистов на подгруппы и результаты построения рейтингов экономических журналов, отражающие мнения РАСЭ о российских экономических журналах. Подробные описания и расчеты приведены в Приложении 1 по адресу: <https://www.hse.ru/DeCAn/RussianEconomicCommunity>.

1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Структура российского академического сообщества экономистов

Одной из первых работ, посвященных анализу современного экономического сообщества России, была работа [1]. Для формирования рейтинга ведущих российских экономистов авторы воспользовались библиометрическими показателями публикаций ученых (по публикациям в 12-ти ведущих экономических журналах России), экспертными оценками и проанализировали публикации в зарубежных журналах (на основе базы данных RePEc). В результате проведенного анализа «четко выделяются две группы, мало пересекающиеся между собой. Первую группу составляют экономисты, активно публикующиеся в России. Вторую — ученые, имеющие признание в научном сообществе, но не обязательно активно публикующиеся в ведущей российской периодике. Сюда же

входят экономисты, публикующиеся в основном за рубежом» [1, с. 17].

Большая работа по анализу РАСЭ проделана А.А. Муравьевым [2]. Анализируя статистику публикаций и цитирований 100 наиболее публикующихся и 100 наиболее цитируемых экономистов России, а также оценивая место ведущих российских экономических журналов среди мировых экономических журналов, он также пришел к выводу о расслоении сообщества на две группы: «В России сохраняется разделение экономического сообщества на экономистов, интегрировавшихся в мировую экономическую науку (и публикующихся, главным образом, в зарубежных журналах), и заметно более многочисленную группу экономистов, «признающих» исключительно российские журналы» [2, с. 41].

В работе [6] приведены результаты социологического опроса отечественных ученых-экономистов для диагностики неоднородности научного сообщества экономистов. Всего был опрошен 331 экономист из более чем 20-ти научных учреждений по всей России. Авторы оценивали неоднородность РАСЭ в первую очередь на основе анализа внутринаучной специализации ученых и поддерживаемых ими теоретико-методологических принципов, в частности, насколько они относят себя к «мейнстриму» экономической науки (сторонников которых «принято представлять в образе адептов «...святой троицы жадности, равновесия и рациональности» (цит. по работе [6, с. 14])). Оказалось, что лишь 25,7 % респондентов относят себя к мейнстриму, а 39,6 % и 34,7 % респондентов соответственно либо не являются сторонниками основного направления экономической науки, либо затрудняются ответить на этот вопрос. При этом в США, как отмечают авторы для сравнения, доля тех, кто относит себя к «немейнстриму», не превышает 7 %, и в российской диаспоре академических экономистов (РДАЭ), работающих в зарубежных научных и образовательных учреждениях, были получены аналогичные результаты: «Удельный вес представителей «основного русла» среди членов диаспоры в 2,8 раза превышает аналогичный показатель для РАСЭ: 72,7 % против 25,7 % соответственно» [7, с. 343].

Таким образом, у исследователей РАСЭ сложилось единое мнение о разделении сообщества на две группы (условно называемые нами «продвинутыми» и «традиционными»), но пока нет целостного понимания и описания «портрета» представителей этих групп, в частности, где и кем они работают, какие журналы читают и проч. Работа наших коллег [16] также посвящена теме анализа РАСЭ и вопросам рейтингов российских научных экономических журналов и основана на тех же данных опроса членов РАСЭ, которыми мы будем

пользоваться. Однако в ней сделан упор на создание методологии рейтингования научных журналов по экономике на основе социологического опроса их читателей путем построения агрегированного рейтинга с различными весовыми функциями частных рейтингов и итеративной процедуры выделения группы «продвинутых» респондентов. Под «продвинутыми» в данном случае понимаются те ученые-экономисты, которые имеют ученую степень кандидата наук (PhD) или доктора наук, владеют иностранным языком, понимают важность для российских экономистов знания экономико-математического аппарата, читают отечественные и зарубежные журналы и публикуют свои статьи в авторитетных российских изданиях. Классификацию же респондентов авторы проводят исключительно на основе ответов самих респондентов, ограничиваясь составлением социально-демографического портрета.

Первый блок вопросов, на которые отвечали респонденты, подразумевает выявление основного вида деятельности (академические исследования, преподавание или проведение экспертно-аналитических работ) и места работы представителей каждой группы (институт РАН, университет, бизнес-компания или государственные структуры). Определение преимущественного вида деятельности и места работы представителей «продвинутых» ученых важно для выявления потенциальных «точек роста» и развития научных школ вокруг исследователей, находящихся в «основном русле исследований» экономической науки в мире, заметных и читаемых за рубежом и внутри страны. Второй блок вопросов (о российских экономических журналах) интересен с точки зрения изучения мнения о российских экономических журналах у РАСЭ в целом и его различных подгрупп, например, для выявления целевой аудитории этих журналов и таргетирования журналов на свою публику.

Нам представляется, что описание структуры сообщества на основе ответов самоопределения респондентов может быть не вполне точным, по меньшей мере по причине того, что многие ученые совмещают академическую, преподавательскую и экспертно-аналитическую деятельность в различных соотношениях и однозначное самоопределение для них может быть затруднительно. Для решения этой проблемы мы воспользовались методом латентных классов, который был специально разработан для анализа социологических опросов.

1.2. Рейтинги научных журналов

Задача изучения мнения РАСЭ о российских экономических журналах требует прежде всего остановиться на вопросах построения рейтингов журналов вообще. Методологии построения рейтингов можно классифицировать по виду инфор-



мации (на основе библиометрических показателей и на основе экспертного мнения), а также по числу применяемых показателей (однокритериальные и многокритериальные, последние можно подразделять в зависимости от способов их агрегирования — например, с помощью взвешенной суммы критериев, лексикографически и т. п.).

Разные библиометрические показатели оценивают уровень журнала с разных позиций. Например, такие показатели, как импакт-фактор, число цитирований на публикацию, h-индекс и ему подобные, измеряют популярность журнала (т. е. цитируемость и читаемость), а такие показатели, как Eigenfactor, PageRank и SCImago, нацелены на оценку престижа журнала, его авторитетности (журнал тем более престижен, чем больше на него приводится ссылок в других журналах и чем более престижными они, в свою очередь, являются). Известно, что для социальных наук и для экономики в частности ранжирования по этим показателям могут сильно не совпадать [17], что верно также и при ранжировании ученых [18].

Для построения рейтингов научных журналов наряду с библиометрическими показателями широко применяется экспертное оценивание, хотя сравнение ранжирований по библиометрическим показателям и по экспертным рейтингам в западных странах показывает, как правило, сильную корреляцию (см., например, сравнение экспертных рейтингов в Норвегии [19], Финляндии [20] и в Австралии [21] с рейтингами, рассчитанными по различным показателям). В работе [16] показано, что отсутствуют значимые связи между рейтингами российских экономических журналов (частными и агрегированными), построенными по результатам опроса РАСЭ, и их библиометрическими показателями.

При этом, поскольку журналы ранжируются, как правило, по нескольким критериям, агрегировать эти критерии можно разными способами. Например, в работе [16] применяется агрегирование частных рейтингов научного уровня, интереса и престижа журналов с помощью различных весовых функций. Такой вид агрегирования информации с помощью взвешенной суммы частных критериев применяется в рейтингах очень часто [4, 9, 10], хотя известно, что этот метод обладает рядом серьезных неустраняемых недостатков [22] и должен применяться с большой осторожностью.

Второй, менее распространенный подход к агрегированию рейтингов основан на лексикографическом упорядочении нескольких критериев. Например, в 2007—2008 гг. в ВИНТИ РАН проводилось экспертное оценивание российских и зарубежных научных журналов [15], для чего было предложено лексикографическое правило, основанное на трех критериях: «Максимальная оцен-

ка», «Обобщенная оценка» и «Нормированный ранг». Эта статья вызвала в свое время бурную дискуссию, ей был посвящен отдельный сборник с детальным разбором предложенной методики. Критики отметили, что у нее есть ряд недостатков, в частности, неустойчивость к ошибкам экспертов [9] и подверженность манипулированию со стороны экспертов [23]. Также применение суммарных, а не усредненных величин неполных экспертных оценок приводит к их смещению, когда журналы, получившие много низких оценок и одну высокую, могут занять в рейтинге более высокое место по сравнению с журналами, имеющими только высокие оценки, но в малом количестве [9, 24].

Каждый из указанных подходов обладает своими достоинствами и недостатками. Библиометрические показатели для ранжирования очень удобны в применении, хотя известно, что ими легко можно манипулировать и «накручивать» для повышения рейтинга [25]. Применение экспертной информации для оценки и рейтингования журналов поднимает вопрос о подборе экспертов: является ли выборка экспертов представительной и насколько выбранных специалистов можно считать экспертами в данной области? Существующие работы по рейтингованию научных журналов на основе экспертного мнения либо полагаются на метод рекомендаций и метод «снежного кома» при формировании пула экспертов (что не гарантирует полноту и репрезентативность выборки, так как метод сильно зависит от первоначальной выборки экспертов), либо обходят стороной вопрос о выборе экспертов. Например, в работе [15] опрашивались 237 редакторов реферативных журналов ВИНТИ РАН, что обусловлено спецификой поставленной задачи, но не гарантирует компетентности экспертов.

Наша задача состоит в изучении мнения РАСЭ о российских экономических журналах, поэтому мы будем считать полученные результаты анкетирования экспертной информацией и проведем ранжирование журналов на разных выборках наших «экспертов»: среди «продвинутых» и среди «традиционных», а также среди подвыборок тех, кто посвятил себя академической деятельности, преподаванию и экспертной деятельности. Это даст нам полную картину предпочтений разных групп РАСЭ относительно отечественных журналов, связанных с экономикой.

Наша выборка участников трех российских конференций включает более тысячи специалистов, и при поставленной цели изучения их мнения о российских экономических журналах возникла необходимость выбора методики агрегирования частных оценок в единое ранжирование. Для этого мы применяли новаторский подход к построению рейтингов журналов, основанный на методах тео-

рии коллективного выбора [12, 13]. Задача теории коллективного выбора заключается в агрегировании индивидуальных мнений участников голосования в единое коллективное мнение. Известно, что не существует «идеального» правила голосования (теорема Эрроу о невозможности), однако предложен ряд правил принятия коллективных решений, которые обладают «хорошими» свойствами (более подробно о правилах коллективного выбора и их соответствии нормативным свойствам см., например, работу [26]). Подобный подход уже применялся для ранжирования экономических журналов [12, 13], журналов по менеджменту [27] и вклада научных работников [8].

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

2.1. Описание анкеты

В основе нашего исследования лежат результаты анкетирования российского сообщества экономистов, проводившегося в декабре 2016 — апреле 2017 г. На анкету отвечали участники Третьего Российского экономического конгресса (РЭК—2016), XVIII Апрельской международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества, а также участники Московского экономического форума 2017 (МЭФ—2017). Всего получено 1028 ответов, из них 645 — от участников РЭК-2016, 130 — от участников Апрельской конференции и 254 — от участников МЭФ—2017.

Анкета реализована на основе сервиса «Google Forms». Персональный доступ респондентов обеспечен направлением на личную почту каждого из них соответствующей интернет-ссылки. Данная анкета состоит из 30 вопросов, которые можно условно объединить в три блока. Первый блок служит для выявления структуры сообщества экономистов и включает в себя такие вопросы, как наиболее важный вид деятельности респондента, тип организации, в которой он работает, распределение его рабочего времени, его оценку структуры российского экономического сообщества как соотношения между преподавателями, экспертами и академическими исследователями, и др. Второй блок вопросов служит для оценки респондентом предлагаемой выборки журналов — их научного уровня, общественного престижа, интереса к публикациям этих журналов, а также для выявления мнения респондента относительно различных библиометрических показателей. Третий блок включает в себя вопросы для определения социально-демографических характеристик респондентов — пола, возраста, наличия ученой степени и др.

Список журналов, который оценивали респонденты, основан на списке RSCI (раздел «Экономика. Экономические науки», 29 журналов на конец 2016 г.), из которого были исключены 16 из-

даний и добавлены 13 журналов, относящихся к разделам «Междисциплинарные журналы в области общественных и гуманитарных наук», «Организация и управление». Изменение списка связано с желанием авторов проекта учесть известные и значимые журналы смежных с экономической наук, представляющих интерес для экономистов, так как многие специалисты читают эти журналы или публикуются в них. Разнородность списка журналов, относящихся к экономическим дисциплинам, также отметил А.А. Муравьев в своем исследовании [2] при анализе 25 ведущих российских журналов в области экономики в соответствии с импакт-фактором РИНЦ: «...в списке ведущих российских журналов, отнесенных к экономическим дисциплинам, очень много мультидисциплинарных и отраслевых. Особенно заметно смешение экономики и менеджмента. Проблема, по всей видимости, связана с тем, что термин «экономическая наука» в русском языке не эквивалентен термину «Economics» в английском» [2, с. 16].

Также относительно небольшой размер выборки журналов продиктован тем, что при увеличении количества вопросов в анкете и объектов для анализа респондентами снижается вероятность заполнения анкеты и точность оценок. Впрочем, респонденты могли самостоятельно указать, публикации в каких журналах помимо предложенных они считают интересными, и в каких журналах помимо предложенных они публикуются — на каждый из этих вопросов мы получили более сотни ответов. По объективным причинам включить подобный список в анкету было бы невозможно.

2.2. Анализ латентных классов

Метод латентных классов (Latent Class Analysis, LCA) — это статистический метод для нахождения классов (кластеров) в многомерных категориальных данных [28]. Предполагается, что наблюдаемые объекты имеют скрытые (латентные) характеристики, которые позволяют распределить их в однородные группы. Метод латентных классов приписывает каждому объекту вероятности нахождения в каждом из классов. Естественно, далее можно отнести объект к тому классу, вероятность нахождения в котором наибольшая, и получить однозначную классификацию всех исследуемых объектов.

Впервые LCA-метод был описан в 1950 г. [28] как метод построения классов на основе дихотомических наблюдаемых переменных, а в 1974 г. был предложен алгоритм для получения оценок параметров модели по методу максимального правдоподобия [29]. В этой же работе был расширен класс переменных — они могут быть не только дихотомическими, но и многозначными; также предложено расширение модели на случай нескольких



латентных переменных. Общий подход к анализу категориальных данных с помощью дискретных латентных переменных был предложен в работе [30]. Метод латентных классов широко применяется при анализе опросов, например, в политологии для анализа уровня доверия к политической системе [31], в медицине для анализа паттернов выявления заболеваний, в частности, рака [32].

Приведем общее описание метода. Пусть L — число наблюдаемых переменных (число вопросов в анкете, которые применяются для кластеризации), $Y_l, l = 1, \dots, L$ — вопрос анкеты под номером l , y_l — ответы респондента на вопрос Y_l . Обозначим через C число латентных классов, а через X — сами латентные классы $x \in \{1, 2, \dots, C\}$. Также для удобства будем пользоваться векторными обозначениями Y и y для описания совокупности ответов респондента на вопросы анкеты.

Вероятность $P(Y = y)$ получения конкретного ответа y на анкету по формуле полной вероятности

$$P(Y = y) = \sum_{x=1}^C P(X = x)P(Y = y|X = x),$$

где $P(X = x)$ — это доля людей, относящихся к латентному классу x , $P(Y = y|X = x)$ — вероятность получения совокупности ответа y от людей из этого класса.

Модель латентных классов предполагает независимость наблюдаемых переменных, поэтому вероятность получения паттерна ответа y от людей из класса x

$$P(Y = y|X = x) = \prod_{l=1}^L P(Y_l = y_l|X = x).$$

Таким образом, вероятность получения ответов

$$P(Y = y) = \sum_{x=1}^C P(X = x) \prod_{l=1}^L P(Y_l = y_l|X = x).$$

Далее методом максимального правдоподобия оцениваются параметры модели, при большом числе параметров применяются численные методы нахождения экстремума, в частности, ЕМ-метод [29].

После оценки параметров модели по формуле Байеса можно рассчитать вероятности нахождения респондента в определенном классе в зависимости от полученных ответов на вопросы анкеты

$$P(X = x|Y = y) = \frac{P(X = x)P(Y = y|X = x)}{P(Y = y)},$$

что позволяет описать полученные классы объектов.

Для расчета параметров модели создано несколько программных комплексов. Мы пользуемся пакетом roLCA, созданным для языка программирования R (авторы Drew A. Linzer и Jeffrey Lewis [33]).

2.3. Методы ранжирования журналов

Для анализа мнения различных групп респондентов о российских журналах по экономике были рассмотрены ответы респондентов на вопросы второго блока:

1. Какие отечественные издания публикуют наиболее интересные для Вас статьи?
2. Оцените, пожалуйста, научный уровень журналов.
3. Какие российские журналы, на Ваш взгляд, считаются в экономическом сообществе наиболее престижными?

Респонденты выставляли каждому из 26 предложенных в анкете журналов ранги, где 3 обозначал наивысший ранг, 1 — самый низкий ранг и 0 — без оценки.

Для анализа мнения разных групп РАСЭ применялась двухступенчатая схема: на первом этапе строились три частных рейтинга («Интерес», «Научный уровень» и «Престиж»), представляющих мнения всех 1028 участников опроса по трем указанным выше вопросам, а затем на втором этапе с помощью различных правил принятия коллективных решений по этим трем частным рейтингам строилось итоговое агрегированное ранжирование журналов. Каждый метод был применен на всей выборке ответов респондентов, на подвыборках ПУ, ЭА и АИ, а также на подвыборках «продвинутые» и «традиционные».

Построение частных ранжирований по трем вопросам на первом этапе проводилось двумя методами — методом Борда и методом порогового агрегирования. Опишем оба метода на примере построения частного рейтинга «Интерес», остальные два строятся аналогично.

Пусть вектор $v_k^{\text{Интерес}} = (v_k^3, v_k^2, v_k^1, v_k^0)$ описывает полученные журналом k ранги по вопросу «Какие отечественные издания публикуют наиболее интересные для Вас статьи?», где v_k^i обозначает число рангов i , полученных журналом k по данному вопросу. Метод Борда предполагает взвешенное суммирование полученных оценок, и агрегированный рейтинг журнала k рассчитывается как

$r_k^{\text{Интерес}} = \sum_{i=0}^3 i \cdot v_k^i$, т. е. более высокие оценки вносят более весомый вклад в рейтинг журнала. Однако такой механизм агрегирования, хотя и прост в применении, обладает существенным недостатком — компенсируемостью критериев, когда жур-

нал, имеющий много низких оценок (т. е. широко известный, но малоинтересный), может получить более высокий ранг, чем журнал, имеющий небольшое число высоких оценок (т. е. малоизвестный узкоспециализированный журнал, высоко оцениваемый профессионалами). Процедура порогового агрегирования лишена этого недостатка и представляет, по сути, лексикографическое упорядочение вектора полученных оценок, причем возможны две версии этого правила — упорядочение может идти от наибольших рангов к наименьшим и наоборот. Для первой версии ранжирование строится таким образом: журналы ранжируются по убыванию числа максимальных оценок v_k^3 , в случае равенства числа полученных оценок в 3 балла дальнейшее упорядочение ведется по убыванию оценки v_k^2 и т. д. Таким образом, например, журнал, получивший ранги $v_{k1}^{\text{Интерес}} = (17, 12, 30, 1)$, будет в агрегированном рейтинге выше, чем журнал, получивший ранги $v_{k2}^{\text{Интерес}} = (16, 40, 3, 1)$, который, в свою очередь, будет выше, чем журнал $v_{k3}^{\text{Интерес}} = (16, 35, 7, 2)$. Аналогичная процедура возможна по упорядочению в обратную сторону — сначала по убыванию числа оценок 0, затем при равенстве этих значений — по убыванию числа оценок 1 и т. д. Недостатки такой процедуры — чувствительность к ошибкам экспертов и большое влияние отдельно взятого эксперта.

Эти три процедуры агрегирования рассматривают позиции журнала с разных точек зрения: первый вариант порогового агрегирования сосредоточен на важности и значимости журналов (поскольку ранжирует журналы в первую очередь по наибольшему баллам, полученным от респондентов), второй вариант порогового агрегирования оценивает в первую очередь известность журналов (поскольку сначала ранжирует журналы по наименьшему значению оценки 0, которая означает, что респондент либо не знает журнал, либо не в состоянии оценить его уровень), а метод Борда строит некоторую «среднюю» оценку с учетом весов полученных баллов.

На втором этапе из трех частных рейтингов («Интерес», «Научный уровень» и «Престиж») был составлен один агрегированный рейтинг, для чего применялись несколько широко известных правил коллективного выбора — три правила Коупленда, правило Кумбса и правило Нансона. Также на этом этапе можно снова воспользоваться правилами Борда и порогового агрегирования, которые мы применяли для построения агрегированных рейтингов.

Правила Коупленда [34] основаны на построении числовой функции $u(k)$ для каждого журнала

k на основе мажоритарного отношения: журнал k доминирует журнал l по мажоритарному отношению P , если журнал k стоит в большинстве агрегированных рейтингов выше, чем журнал l (пишут kPl). Верхним срезом Pk элемента k называется множество элементов, которые доминируют его по мажоритарному отношению (т. е. $Pk = \{l|lPk\}$). Аналогично, нижним срезом kP элемента k называется множество элементов, которых этот элемент k доминирует по мажоритарному отношению (т. е. $kP = \{l|kPl\}$). Далее рассчитываются мощности нижнего $|kP|$ и верхнего $|Pk|$ срезов для каждого журнала k , т. е. рассчитывается, сколько элементов доминирует по мажоритарному отношению этот журнал k и, наоборот, сколько журналов доминируют его. Первое правило Коупленда ранжирует объекты по убыванию разницы мощностей нижнего и верхнего среза $u(x) = |kP| - |Pk|$, второе — по убыванию мощностей нижнего среза (т. е. $u(x) = |kP|$), третье — по возрастанию мощностей верхнего среза ($u(x) = |Pk|$).

Правило Кумбса состоит в следующем: первоначально из списка альтернатив удаляется журнал k , который считают наихудшим по максимальному числу рейтингов, — этот журнал получит минимальный рейтинг. Затем на суженном множестве альтернатив процедура продолжается. Если невозможно выбрать один исключаемый вариант (такой случай возможен, когда по всем трем рейтингам наихудшими являются три разных журнала), то они все получат одинаковый рейтинг и на этом этапе будут исключены все три этих журнала.

Процедура Нансона — это итеративная процедура, в которой применяется схема правила Борда для промежуточных расчетов. Первоначально рассчитывается сумма рангов Борда по каждому из трех рейтингов («Интерес», «Научный уровень», «Престиж»). Далее из списка альтернатив исключаются все альтернативы, у которых эта сумма больше, чем среднее значение этой суммы по всему множеству журналов. Эти исключенные альтернативы получают наименьшие ранги. Затем вся процедура повторяется с меньшим числом оставшихся журналов. В каждой из применяемых процедур в случае наличия одинаковых частных рейтингов у нескольких альтернатив им всем присваивается одинаковый ранг, максимальный для этой группы альтернатив.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Структура РАСЗ по видам деятельности

Согласно цели нашего исследования, мы выделяем три латентных класса респондентов анкеты по профилю их основной деятельности: преподаватели университетов (далее ПУ), академические исследователи (далее АИ) и эксперты-аналитики



(далее ЭА). В качестве наблюдаемых признаков были выбраны такие вопросы анкеты:

1. Какой из указанных видов деятельности Вы считаете для себя наиболее важным?

2. Что Вы читаете чаще — отечественные или зарубежные журналы?

3. Оцените, пожалуйста, важность для российских экономистов знания экономико-математического аппарата (моделей равновесия, теории игр, эконометрики и т. п.).

4. Какую квалификацию (степень) Вы имеете?

5. Укажите, пожалуйста, тип организации Вашего основного места работы.

6. Оцените, пожалуйста, в баллах, как распределяется Ваше рабочее время.

Первый и пятый вопросы требуют самоопределения респондентов к какому-либо из трех классов, которое в итоге, как уже было указано, может не совпадать с итоговым классом респондента, поскольку может быть скорректировано его ответами на остальные вопросы. Второй, третий и четвертый вопросы, очевидно, вытекают из описания классов «продвинутых» и «традиционных» российских экономистов в предыдущих исследованиях РАСЭ, указанных в п. 1.1. Шестой вопрос необходим для корректировки отнесения к классам, особенно у тех респондентов, которые занимаются более чем одним видом деятельности.

Приведем результаты анализа латентных классов по всей выборке респондентов, а также отдельно по двум подвыборкам: участники РЭК-2016 (далее обозначаем как РЭК) и участники XVIII Апрельской конференции (далее обозначаем АпрК). Отметим, что мы проводили по всем выборкам расчеты с разным числом классов и выбирали наиболее подходящую модель по информационным критериям Акаике AIC и байесовскому BIC. Оказалось, что наилучшим образом данные всего опроса, а также отдельно подвыборки РЭК и АпрК, описываются моделями с тремя классами (табл. 1). По подвыборке респондентов МЭФ-2017 наилучшей оказалась модель с двумя классами, при этом интерпретация результатов оказалась затруднительной, а описания классов не соответствовали разделению на искомые классы, поэтому результаты по этой подвыборке не представлены в дальнейшем анализе. Вероятно, классификация по подвыборке участников МЭФ отвечает каким-то

другим скрытым характеристикам, которые не были учтены в нашем анализе.

Видно, что по доле академических исследователей во всех трех выборках получен согласованный результат на уровне 0,24—0,3, при этом среди участников Апрельской конференции существенно преобладает доля экспертов-аналитиков (0,36 против 0,23 по всей выборке) в ущерб числу преподавателей.

Как и предполагалось, полученные результаты не совсем совпадают с тем, как сами респонденты себя оценивают: в вопросе о наиболее важном виде деятельности 41 % респондентов указали «Академические исследования», 38 % — «Преподавание» и 20 % — «Экспертную деятельность». Получается, что часть респондентов, указавших академические исследования как наиболее важный вид деятельности, на самом деле являются представителями класса ПУ. Мы считаем, что это связано с набирающей обороты ориентацией вузов на исследовательский профиль деятельности и ужесточением требований к преподавателям по публикационной активности.

На вопрос о наиболее важном виде деятельности в описании латентных классов по всем трем группам наблюдаются схожие результаты по классу АИ и незначительно различающиеся по классам ПУ и ЭА (табл. 4 в Приложении 1): в классе АИ очевидна ориентация на выполнение академических исследований (оценка вероятности соответствующего ответа равна 0,83—0,93), в классах ПУ и ЭА значимый перевес в сторону преподавания (0,55—0,68) и экспертной деятельности (0,57—0,58) соответственно. При этом класс экспертов, сформированный по выборке АпрК, более близок к академическим исследователям, равно как и класс преподавателей, описываемых по выборке РЭК в сравнении с остальными выборками.

Анализ ответов на вопрос о читаемых журналах (табл. 5 в Приложении 1) показывает крайне маленькую вероятность того, что респонденты не читают журналы (оценка вероятности такого ответа не более 0,05 по всем классам). Но если в классе АИ практически одинаково распределение ответов по трем вариантам («Преимущественно отечественные», «Преимущественно зарубежные» и «И те, и другие примерно в равной степени»), то ЭА и ПУ более ориентированы на отечественные журналы

Таблица 1

Доли респондентов по классам

Доля респондентов, относящихся к латентному классу x	$X = \text{АИ}$			$X = \text{ЭА}$			$X = \text{ПУ}$		
	РЭК	АпрК	Вся выборка	РЭК	АпрК	Вся выборка	РЭК	АпрК	Вся выборка
$P(X = x)$	0,28	0,3	0,24	0,23	0,36	0,23	0,49	0,34	0,53

(0,4 и 0,52, соответственно). Интересно отметить, что АИ, описываемые по выборке АпрК, гораздо более склонны к чтению преимущественно зарубежных журналов (0,52), чем преимущественно отечественных журналов (0,08) по сравнению с аналогичными цифрами по РЭК (0,25 и 0,38) и всей выборке (0,3 и 0,34).

Анализ ответов на вопрос о важности знания экономико-математического аппарата (табл. 6 в Приложении 1) показал, что большая часть респондентов (80—90 %) высоко оценивает важность математических моделей в современной экономической науке. При этом для АИ и ПУ из выборки АпрК вероятность выставления оценки «очень важно» значительно больше (0,69 и 0,53 соответственно), чем в выборке РЭК (0,47 и 0,42) и всей выборке (0,49 и 0,42). В этом полученные результаты соотносятся с выводами, что «необязательным применением математического моделирования считают только 5,8 % респондентов, а 58,9 % опрошенных хотя бы время от времени задействуют эконометрику в своих научных изысканиях» [6, с. 18]. Аналогичные результаты опроса среди российских экономистов, работающих за рубежом, составили 2,6 и 58,4 % соответственно [7].

Также отметим (табл. 7 в Приложении 1), что в классах АИ и ПУ наиболее вероятно получение ответов о наличии ученой степени в сумме по ответам «Кандидат наук», «PhD», «Доктор наук» (вероятности этого 0,82—0,98 для АИ и 0,66—0,91 в зависимости от подвыборки), а в классе ЭА по всем выборкам высока вероятность получения ответов «специалист» и «магистр» (до 0,44 в сумме). При этом в классе преподавателей из подвыборки АпрК также есть смещение в сторону ответов «специалист» и «магистр» (0,34 в сумме).

По вопросу об основном месте работы (табл. 8 в Приложении 1) видно, что в классе ПУ вероятность ответа «Университет» превышает 90 % по всем трем выборкам, в классе ЭА по сравнению с другими классами выше вероятность получения ответа «Бизнес-компания» или «Другое», в классе АИ по всей выборке и по подвыборке РЭК более вероятна работа респондентов либо в институте РАН (0,46 и 0,58), либо в университете (0,41 и 0,3). По классу АИ есть отличия в результатах по выборке АпрК: академические исследователи работают в университете в качестве основного места работы с вероятностью 0,84, что сравнимо, кстати, с вероятностью этого ответа среди преподавателей (0,91).

Интересно проследить, как отличаются оценки вероятностей получения ответов по распределению рабочего времени в разных классах (табл. 9 в Приложении 1). В классе АИ соответствующую деятельность оценивают как наиболее значимую (в 3 балла) с вероятностью 0,78—0,82, преподава-

ние и экспертную деятельность как менее значимые (в 1 и 2 балла) с вероятностью примерно 0,3 на каждый ответ, при этом для выборки АпрК характерно смещение ответов в сторону большей важности преподавательской деятельности. Для класса ПУ наиболее характерны высокие оценки важности преподавания (более 0,7 для 3-х баллов по всем трем выборкам), достаточно высокие для академической деятельности (около 0,5 для 2-х баллов), а также низкие баллы либо отсутствие ответа по экспертной и административной работе. Класс ЭА отличается высокими вероятностями отсутствия ответов на все вопросы при значительной вероятности выбора экспертной деятельности как наиболее важной (0,33—0,48 для 3-х баллов), при этом для выборки АпрК интересно отметить высокую важность академической деятельности (0,33 для 3-х баллов) и важность преподавания (0,46 для 1-го балла).

3.2. Выделение группы «продвинутых» экономистов

Для выделения двух групп экономистов — «традиционных», следующих традициям российской экономической школы, и «продвинутых», обладающих современными знаниями в области экономики, — мы исследовали, как респонденты оценивают распределение своего рабочего времени. С этой целью рассматривались ответы на 27-й вопрос анкеты: «Оцените, пожалуйста, в баллах, как распределяется Ваше рабочее время? Выберите, пожалуйста, один ответ в каждой строке, руководствуясь следующей шкалой: 1 — самый низкий балл, 3 — самый высокий балл». Возможные варианты ответов: «Преподавание в университете (вузе)», «Академические исследования», «Экспертно-аналитическая работа» и «Административная работа».

По результатам анализа респондентов можно разбить на четыре группы преподавателей в университетах (ПУ-1 — ПУ-4), две группы академических исследователей (АИ-1 и АИ-2) и две группы экспертов-аналитиков (ЭА-1 и ЭА-2). Также можно выделить отдельную группу специалистов, равномерно распределяющих свое рабочее время между тремя видами деятельности. Результаты представлены в табл. 2. Предварительно отнесем к группе «продвинутых» тех респондентов, у которых определен вид деятельности является преобладающим.

Из полученных групп «продвинутые» отберем тех респондентов, которые соответствуют четырем критериям:

- владеют хотя бы одним иностранным языком;
- имеют степень кандидата наук, доктора наук либо PhD;
- читают в основном зарубежные журналы (либо отечественные и зарубежные в равной степени);



Таблица 2

**Разбиение экономического сообщества на группы
согласно распределению рабочего времени**

Группа	Описание	Доля респондентов	Условное разбиение
ПУ-1	$ПУ > (АИ = ЭА)$	0,15	Продвинутые
ПУ-2	$ПУ > АИ > ЭА$	0,16	Продвинутые
ПУ-3	$(ПУ = ЭА) > АИ$	0,08	Традиционные
ПУ-4	$(ПУ = АИ) > ЭА$	0,08	Традиционные
АИ-1	$АИ > (ПУ = ЭА)$	0,24	Продвинутые
АИ-2	$(АИ = ЭА) > ПУ$	0,07	Традиционные
ЭА-1	$ЭА > АИ > ПУ$	0,07	Продвинутые
ЭА-2	$ЭА > (ПУ = АИ)$	0,06	Традиционные
Отдельная группа	$ПУ = АИ = ЭА$	0,03	—

— считают важным для экономистов знание экономико-математического аппарата.

Таким образом, мы можем отнести к группе «продвинутые» 21 % всех респондентов. При этом получается, что в эту группу попадают 34,8 % представителей класса АИ, 20,4 % представителей класса ПУ и всего 8,3 % из класса ЭА. Классы ЭА, АИ и ПУ, построенные двумя описанными выше способами, совпадают на 70 %.

3.3. Сопоставление результатов

Поскольку, как упомянуто выше, исследование является результатом совместной работы сотрудников НИУ ВШЭ и ИЭ РАН, приведем сопоставление результатов, полученных с помощью различные методов. Описание итеративной процедуры выделения группы «Advanced» и «топовых» журналов по экономике и результатов, полученных нашими коллегами, приведено в работе [16].

Для начала сопоставим группы «традиционных» и «продвинутых» специалистов, сформированные при исследовании распределения рабочего времени, а также в работе [16]. Несмотря на различия в выбранных подходах к исследованию, результаты получились достаточно схожими: более 66 % респондентов были отнесены к одинаковым группам: «Ordinary» или «Advanced». Однако совпадения по группам «преподаватели в университетах», «академические исследователи» и «эксперты-аналитики» менее существенны: немногим более 51 %. Несмотря на относительно большое число одинаковых результатов по группе «Преподаватели в университетах» (317 совпадений), по группе «Эксперты-аналитики» наблюдаются существенные различия — лишь 14 респондентов по итогам применения обоих подходов были отнесены к данной группе.

При сопоставлении результатов, полученных нашими коллегами, с теми, которые описаны в § 1 данной работы, цифра по экспертам-аналитикам немного возрастает (34 % совпадений), однако увеличиваются различия в конечных результатах — всего 21 %. Как и ожидалось, наиболее устойчивая группа — преподаватели в университетах.

Полученное расхождение в соотношении респондентов по разным классам в результате применения разных методов, по мнению авторов, объясняется тем, что подавляющая часть российских ученых-экономистов является «многостаночниками», совмещающими несколько видов деятельности: они одновременно работают и преподавателями, и научными работниками, или совмещают научную работу с экспертной.

3.4. Анализ мнения разных групп РАСЭ о российских экономических журналах

Результаты построения частных рейтингов по всей выборке респондентов, по группам АИ, «продвинутые» и «традиционные» приведены в Приложении 1 (табл. 10, <https://www.hse.ru/DeCAn/RussianEconomicCommunity>). Оказалось, что расчеты по разным классам респондентов (АИ, ПУ, ЭА) дают в целом согласованные результаты (табл. 11 в Приложении 1) и значимые отличия есть только для класса АИ. Среди них журналы «Квантиль» (РЭШ), «Общественные науки и современность», «Прикладная эконометрика», «Пространственная экономика», «Экономика и математические методы» и «Экономическая наука современной России» получили более высокие позиции в рейтингах по сравнению с позициями этих журналов в рейтингах остальных групп, а такие журналы, как «Вестник Института экономики РАН», «Проблемы теории и практики управления», «Финансы», «Финансы и бизнес» и «Экономист», наоборот, получили более низкие позиции в рейтинге АИ, нежели в рейтингах остальных групп.

По группе «продвинутые» в целом более высокие позиции (по сравнению с рейтингом по всей выборке) в рейтинге получили журналы «Квантиль» (РЭШ), «Прикладная эконометрика», «Пространственная экономика», «Российский журнал менеджмента», «Экономика и математические методы» и «Экономическая наука современной России», а более низкие позиции в рейтинге — «Вестник Института экономики РАН», «Вопросы государственного и муниципального управления», «Общество и экономика», «Проблемы теории и практики управления», «Финансы» и «Финансы и бизнес».

Группа «традиционные» выше оценивает такие журналы как «Вестник Института экономики РАН» (по большинству рейтингов получил 3 место в сравнении с 6—9 местом в группе «продвину-

тых»), «Финансы» (7—9 место против 12—16 мест у «продвинутых»), «Журнал экономической теории» (12—14 место против 13—19), «Проблемы теории и практики управления» (7—13 место против 13—19), «Общество и экономика» (10—18 место против 13—23), немного поднялись в их рейтинге также «Экономист», «Журнал институциональной теории» и «Общественные науки и современность». При этом некоторые журналы этой группой оценены существенно ниже, чем группой «продвинутые»: «Экономика и математические методы» (7—10 место против 3—5 у «продвинутых»), «Прикладная эконометрика» (11—19 место против 6—9), «Квантиль» (РЭШ) (12—24 место против 13—18), «Российский журнал менеджмента» (12—17 место против 6—11). Немного ниже оценены «Форсайт», «Экономическая наука современной России» и «Пространственная экономика».

Результаты итоговых ранжирований, агрегирующих три частных рейтинга по разным правилам теории коллективного выбора для групп «продвинутые» и «традиционные», а также для всей выборки респондентов, приведены в Приложении 1 (табл. 12). В целях сравнения разных рейтингов и составления одного итогового ранжирования мы сопоставляли средние и максимальные ранги журналов (рассматривая только результаты по группе «продвинутых» и по всей выборке) и условно разделили наш список из 26 журналов на четыре группы (А+, А, В+ и В), ориентируясь на эти показатели (табл. 13). Можно выделить подгруппу А+ журналов: «Вопросы экономики», «Журнал Новой экономической ассоциации», «Экономический журнал ВШЭ», «Мировая экономика и международные отношения» и «Экономика и математические методы» — эти журналы во всех рейтингах по обеим выборкам имеют ранг не ниже 5. В группу А входят такие журналы как «Проблемы прогнозирования», «Вестник Института экономики РАН», «Прикладная эконометрика», «Российский экономический журнал» и «Российский журнал менеджмента», имеющие средние и максимальные ранги по всей выборке и по группе «продвинутых» от 6 до 11. В группе В+ оказались такие журналы как «Форсайт», «Экономист», «Финансы», «Экономическая наука современной России», «Экономическая политика», «Квантиль» (РЭШ), «Журнал экономической теории», «Проблемы теории и практики управления», «Журнал институциональной теории», «Общественные науки и современность» и «Пространственная экономика». Остальные журналы попали в группу В (все показатели ниже 19).

Если рассматривать эти же показатели только по группе «традиционные», то изменения будут такие: в группу А+ вместо журнала «Экономика и математические методы» попадает «Вестник Ин-

ститута экономики РАН»; в группу А дополнительно попадают «Экономика и математические методы», «Экономист», «Финансы»; в группу В+ дополнительно попадают «Прикладная эконометрика» и «Российский журнал менеджмента» (бывшие в прежнем рейтинге в группе А), а также «Общество и экономика» и «Вопросы государственного и муниципального управления» (бывшие в прежнем рейтинге в группе В).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен анализ структуры российского экономического сообщества и его мнения о российских экономических журналах на основе ответов участников нескольких российских конференций. Проведена стратификация экономического сообщества на основе методов анализа латентных классов и исследования распределения рабочего времени респондентов. Выделены три основные группы специалистов: эксперты-аналитики, академические исследователи и преподаватели в университетах, в каждой из которых были выделены «традиционные» и «продвинутые» специалисты. Предложен подход к анализу рейтингов экономических журналов с учетом неоднородной структуры российского сообщества экономистов. Показано, что топ российских экономических журналов устойчив для всех выделенных в работе групп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дежина И.Г., Дашкеев В.В. Есть ли в России ведущие экономисты и кто они? — М.: ИЭПП, 2008. — 21 с. [Dezhina, I.G., Dashkeev, V.V. Est' li v Rossii vedushchie ekonomisty i kto oni? — Moscow: IEPP, 2008. — 21 p. (In Russian)]
2. Муравьев А.А. О российской экономической науке сквозь призму публикаций российских ученых в отечественных и зарубежных журналах // Научный доклад № 1 (R)—2011. — СПб.: ВШМ СПбГУ, 2011. — 64 с. [Muravyev, A.A. Economic science in Russia through the lens of publications of Russian economists in national and international journals over 2000—2009 // Working paper No. 1 (R)—2011. — Saint Petersburg: St. Petersburg State University Graduate School of Management, 2011. — 64 p. (In Russian)]
3. Белянин А.В., Бессонов В.А. О российской экономической науке и научном сообществе // Экономический журнал ВШЭ. — 2011. — Т. 15, № 2. — С. 265—268. [Belyanin, A.V., Bessonov, V.A. O rossiiskoi ekonomicheskoi nauke i nauchnom soobshchestve // Ekonomicheskii zhurnal VShE. — 2011. — Vol. 15, No. 2. — P. 265—268. (In Russian)]
4. Балацкий Е.В., Екимова Н.А. Рейтингование участников российского рынка экономических исследований // Journal of Institutional Studies («Журнал институциональных исследований»). — 2015. — Т. 7, № 3. — С. 102—121. [Balatsky, E.V., Ekimova, N.A. Ranking the participants of economic studies market in Russia // Journal of Institutional Studies. — 2015. — Vol. 7, No. 3. — P. 102—121. (In Russian)]
5. Мальцев А.А. Российское сообщество экономистов: особенности и перспективы // Вопросы экономики. — 2016. — № 11. — С. 135—158. [Maltsev, A.A. Russian community of



- economists: main features and perspectives // *Voprosy Ekonomiki*. — 2016. — No. 11. — P. 135–158. (In Russian)]
6. Мальцев А.А., Баженов Г.А. Теоретико-методологическая архитектура российского сообщества академических экономистов // *Известия УрГЭУ*. — 2016. — Вып. 6 (68). — С. 13–22. [Maltsev, A.A., Bazhenov, G.A. Theoretical and methodological architecture of the Russian society of academic economists // *Journal of the Ural State University of Economics*. — 2016. — Iss. 6 (68). — P. 13–22. (In Russian)]
 7. Мальцев А.А. Роль научной диаспоры в интеграции российской экономической науки в глобальное научно-образовательное пространство // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики: Сб. науч. статей XV Международной научно-практической конференции молодых ученых. — Екатеринбург, 2017. — С. 342–345. [Maltsev, A.A. Rol' nauchnoi diaspory v integratsii rossiiskoi ekonomicheskoi nauki v global'noe nauchno-obrazovatel'noe prostranstvo // *Razvitie territorial'nykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: voprosy teorii i praktiki*: Sb. nauch. statei XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh. — Ekaterinburg, 2017. — P. 342–345. (In Russian)]
 8. Алескеров Ф.Т., Катаева Е.В., Писляков В.В., Якуба В.И. Оценка вклада научных работников методом порогового агрегирования // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2013. — Вып. 44. — С. 172–189. [Aleskerov, F.T., Kataeva, E.V., Pisyakov, V.V., Yakuba, V.I. Evaluation of scientists' output using the method of threshold aggregation // *Large-Scale Systems Control*. — 2013. — Iss. 44. — P. 172–189. (In Russian)]
 9. Мазалов В.В., Печников А.А., Фалько И.А. О построении рейтинга научных журналов // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2009. — Вып. 27. — С. 47–52. [Mazalov, V.V., Pechnikov, A.A., Falko, I.A. On constructing the scientific journals rating // *Large-Scale Systems Control*. — 2009. — Iss. 27. — P. 47–52. (In Russian)]
 10. Балацкий Е.В., Екимова Н.А. Международные рейтинги университетов: практика составления и использования // Экономика образования. — 2012. — № 2. — С. 67–80. [Balatsky, E.V., Ekimova, N.A. International rankings of universities: the practice of making and using // *Economy of education*. — 2012. — No. 2. — P. 67–80. (In Russian)]
 11. Алескеров Ф.Т., Подиновский В.В., Миркин Б.Г. Построение рейтингов журналов по менеджменту с помощью методов теории коллективного выбора / Препринт WP7/2011/04, Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2011. — 44 с. [Aleskerov, F.T., Podinovskii, V.V., Mirkin, B.G. Postroenie reitingov zhurnalov po menedzhmentu s pomoshch'yu metodov teorii kolektivnogo vybora / Preprint WP7/2011/04, National Research University Higher School of Economics. — Moscow: Higher School of Economics Publ. House, 2011. — 44 p. (In Russian)]
 12. Алескеров Ф.Т., Писляков В.В., Субочев А.Н. Построение рейтингов журналов по экономике с помощью методов теории коллективного выбора / Препринт WP7/2013/03, Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики. — 2013. — 48 с. [Aleskerov, F.T., Pisyakov, V.V., Subochev, A.N. Postroenie reitingov zhurnalov po ekonomike s pomoshch'yu metodov teorii kolektivnogo vybora / Preprint WP7/2013/03, National Research University Higher School of Economics. — Moscow: Higher School of Economics Publ. House. — 2013. — 48 p. (In Russian)]
 13. Subochev, A., Aleskerov, F., Pisyakov, V. Ranking journals using social choice theory methods: A novel approach in bibliometrics // *Journal of Informetrics*. — 2018. — Vol. 12, No. 2. — P. 416–429.
 14. Муравьев А.А. О научной значимости российских журналов по экономике и смежным дисциплинам // *Вопросы экономики*. — 2013. — № 4. — С. 130–151. [Muravyev, A.A. O nauchnoi znachimosti rossiiskikh zhurnalov po ekonomike i smezhnym distsiplinam // *Voprosy ekonomiki*. — 2013. — No. 4. — P. 130–151. (In Russian)]
 15. Федоретц О.В. Коллективная экспертиза научных журналов: методика агрегирования экспертных оценок и построения рейтинга // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2009. — Вып. 27. — С. 18–35. [Fedorets, O.V. Collective expert examination of scientific journals: procedure of expert judgments aggregation and rating construction // *Large-Scale Systems Control*. — 2009. — Iss. 27. — P. 18–35. (In Russian)]
 16. Рубинштейн А.Я., Бураков Н.А., Славинская О.А. Сообщество экономистов и экономические журналы (социологические измерения VS библиометрии) // Научный доклад. — М.: Институт экономики РАН, 2017. — 83 с. [Rubinshtein, A.Ya., Burakov, N.A., Slavinskaya, O.A. Soobshchestvo ekonomistov i ekonomicheskie zhurnaly (sotsiologicheskie izmereniya VS bibliometrii) // *Nauchnyi doklad*. — Moscow: Institut ekonomiki RAN, 2017. — 83 p. (In Russian)]
 17. Franceschet, M. The difference between popularity and prestige in the sciences and in the social sciences: A bibliometric analysis // *Journal of Informetrics*. — 2010. — Vol. 4, No. 1. — P. 55–63.
 18. Ding, Y., Cronin, B. Popular and/or prestigious? Measures of scholarly esteem // *Information Processing and Management*. — 2011. — Vol. 47, No. 1. — P. 80–96.
 19. Ahlgren, P., Waltman, L. The correlation between citation-based and expert-based assessments of publication channels: SNIP and SJR vs. Norwegian quality assessments // *Journal of Informetrics*. — 2014. — Vol. 8, No. 4. — P. 985–996.
 20. Saarela, M., Kärkkäinen, T., Lahtonen, T., Rossi, T. Expert-based versus citation-based ranking of scholarly and scientific publication channels // *Journal of Informetrics*. — 2016. — Vol. 10, No. 3. — P. 693–718.
 21. Haddawy, P., Hassan, S., Asghar, A., Amin, S. A comprehensive examination of the relation of three citation-based journal metrics to expert judgment of journal quality // *Journal of Informetrics*. — 2016. — Vol. 10, No. 1. — P. 162–173.
 22. Подиновский В.В., Потанов М.А. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: Pro et contra // Бизнес-информатика. — 2013. — № 3 (25). — С. 41–48. [Podinovskii, V.V., Potanov, M.A. Weighted sum method in the analysis of multicriterial decisions: pro et contra // *Business informatics*. — 2013. — No. 3 (25). — P. 41–48. (In Russian)]
 23. Чеботарев П.Ю. О рейтинге журналов и агрегировании неполных балльных оценок // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2009. — Вып. 27. — С. 81–90. [Chebotarev, P. Yu. Journals evaluation and aggregation of incomplete point judgments // *Large-Scale Systems Control*. — 2009. — Iss. 27. — P. 81–90. (In Russian)]
 24. Миркин Б.Г. О статье О.В. Федорца «Коллективная экспертиза научных журналов: методика агрегирования экспертных оценок и построения рейтинга» // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2009. — Вып. 27. — С. 53–58. [Mirkin, B.G. On the «Collective expert examination of scientific journals: procedure of expert judgements aggregation and rating construction» article by O. Fedorets // *Large-Scale Systems Control*. — 2009. — Iss. 27. — P. 53–58. (In Russian)]
 25. Балацкий Е.В., Екимова Н.А. Проблема манипулирования в системе РИНЦ // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. — 2015. — Т. 14, № 2. — С. 166–178. [Balatsky, E.V., Ekimova, N.A. The problem of manipulation in the RSCI system // *Bulletin of Ural Federal University. Series*

- Economics and Management. — 2015. — Vol. 14, No. 2. — P. 166—178. (In Russian)]
26. *Shvydun, S.V.* Normative properties of multi-criteria choice procedures and their superpositions // Working paper No. WP7/2015/07 (Part 1), Series WP7 «Mathematical methods for decision making in economics, business and politics». — Moscow: Higher School of Economics Publ. House, 2015. — P. 1—74.
27. *Алескеров Ф.Т., Писляков В.В., Субочев А.Н., Чистяков А.Г.* Построение рейтингов журналов по менеджменту с помощью методов теории коллективного выбора // Высшая школа экономики. Серия WP7 «Математические методы анализа решений в экономике, бизнесе и политике». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2011. — 44 с. [*Aleskerov, F.T., Pisyakov, V.V., Subochev, A.N., Chistyakov, A.G.* Rankings of Management Science Journals Constructed by Methods from Social Choice Theory // Series WP7 «Mathematical methods for decision making in economics, business and politics». — Moscow: Higher School of Economics Publ. House, 2011. — 41 p. (In Russian)]
28. *Lazarsfeld, P.F.* The logical and mathematical foundation of latent structure analysis & The interpretation and mathematical foundation of latent structure analysis. S.A. Stouffer et al. (eds.) // Measurement and Prediction. — Princeton, NJ: Princeton University Press. — 1950. — P. 362—472.
29. *Goodman, L.A.* The analysis of systems of qualitative variables when some of the variables are unobservable. Part I: A modified latent structure approach // American Journal of Sociology. — 1974. — Vol. 79, No. 5. — P. 1179—1259.
30. *Hagenaars, J.A.* Categorical Longitudinal Data — Loglinear Analysis of Panel, Trend and Cohort Data. — Newbury Park: Sage, 1990.
31. *Hooghe, M., Marien, S., Oser, J.* Great expectations: the effect of democratic ideals on political trust in European democracies // Contemporary Politics. — 2017. — Vol. 23, No. 2. — P. 214—230.
32. *Agresti, A.* Categorical Data Analysis, second edition. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.
33. *Язык программирования R (пакет poLCA).* — URL: <https://github.com/dlinzer/poLCA>. [Polytomous Variable Latent Class Analysis (R package). — URL: <https://github.com/dlinzer/poLCA>]
34. *Copeland, A.H.* A reasonable social welfare function (mimeo) // Seminar on Application of Mathematics to the Social Sciences / University of Michigan. — Ann Arbor, 1951.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.*
- Егорова Людмила Геннадьевна** — ✉ legorova@hse.ru,
Мячин Алексей Леонидович — ✉ a_miachin@mail.ru,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», г. Москва, Россия,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, Россия.
- Поступила в редакцию 27.08.2018, после доработки 27.03.2019.
Принята к публикации 4.04.2019.*

STRUCTURE OF RUSSIAN SCIENTIFIC ECONOMIC COMMUNITY AND ITS ATTITUDE TO RUSSIAN ECONOMIC JOURNALS. PART 1: Analysis by Methods of Latent Classes and Social Choice Theory

L.G. Egorova^{1,2}, A.L. Myachin^{1,2,#}

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ amyachin@hse.ru

Abstract. The paper is focused on the analysis of the structure of Russian academic economic community based on a survey of participants of several Russian economic conferences, and on the analysis of the opinion of this community on some Russian scientific journals on economics and related disciplines. The first part of the work is devoted to the division of the economic community into three main groups: university professors, academic researchers and expert analysts, each of which can be conventionally split into «advanced» and «traditional» specialists. The opinion of the community and its subgroups about scientific importance, prestige and interest in some economic journals was studied and several ratings of these journals were built based on studied opinion.

Keywords: economic community, economic journals, latent classes, social choice theory.

Funding. The article was prepared within the framework of the HSE University Basic Research Program and funded by the Russian Academic Excellence Project '5-100'. The support of the Mark Aizerman Laboratory of Theory of Choice and Decision Analysis in V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences is appreciated by authors.

Acknowledgments. The authors express sincere gratitude to Professor Aleskerov F.T. for his valuable comments and help.

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ БАНКРОТСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В.С. Стельмах

Аннотация. Отмечено, что в развитии предприятий промышленности всегда присутствует вероятность наступления кризиса, поэтому для непрерывного и устойчивого функционирования необходима разработка превентивных инструментов, способных заблаговременно прогнозировать кризисные процессы. Разработана модель оценки банкротства на основе аппарата логистической регрессии для устойчивого развития отечественных предприятий промышленности. Исследование проведено на примере фармацевтической отрасли, а методика разработки и апробации может быть применена в других отраслях промышленности. Разработанная модель способна прогнозировать вероятность банкротства предприятий фармацевтической промышленности за два года до его наступления.

Ключевые слова: антикризисное управление, моделирование, логистическая регрессия, вероятность банкротства, корреляционно-регрессионный анализ, метод исключения, промышленные предприятия, фармацевтическая отрасль.

ВВЕДЕНИЕ

Кризисные процессы должны оперативно обнаруживаться в целях их предотвращения и сохранения функционирования промышленных предприятий, так как ранняя идентификация кризиса способствует минимизации потерь в ходе управления [1]. Целесообразно для идентификации кризиса применять модели оценки банкротства, но методическая проблема такого процесса заключается в учете отраслевых особенностей. Игнорирование такой информации может привести к некорректной оценке и, как следствие, к ускоренному развитию кризисных процессов на предприятиях [2]. В настоящей статье в качестве объекта исследования выбраны фармацевтические предприятия. Выбор фармацевтической промышленности обусловлен интенсивным развитием отрасли, ее стратегическим значением для государства, населения и отсутствием в настоящее время инструментария для оценки банкротства в данной отрасли [3].

Для определения функционального вида связей между индикаторами экономического состояния и степенью банкротства предприятия применяются методы корреляционно-регрессионного анализа. Для оценки банкротства наиболее распространены

методы, основанные на дискриминантном анализе и логистической регрессии.

Первые исследования оценки банкротства на основе дискриминантного анализа приведены в работе [4]. Отмечалось, что базовое условие применения такого анализа для моделирования состоит в подчинении дискриминантных переменных многомерному нормальному закону, а модель представляет собой зависимость вероятности банкротства от базовых финансовых коэффициентов предприятия. При этом в определенных выборках по предприятиям-банкротам нормальное распределение сложно определить либо оно вовсе не выполняется [5–7]. Кроме того, при расчете интегрального показателя в моделях зарубежных [7–9] и российских [10–13] экономистов присутствует интервал неопределенности, при попадании в который невозможно сделать однозначное заключение о вероятности банкротства предприятия.

В исследованиях [14–16] при разработке логистических моделей оценки банкротства (логит-модели, англ. *logit models*) отсутствует проблема «неопределенности», так как рассчитывается значения непрерывной зависимой переменной, которая принимает значения в интервале от нуля до единицы. Для создания таких моделей необходим массив данных и по предприятиям, которые при-

знаны банкротами, и по успешно функционирующим предприятиям [17–20]. Таким образом, логит-модели дают возможность анализировать зависимость между индикаторами экономического состояния предприятия и его вероятностью банкротства, а другие модели только относят предприятие к определенной группе по степени банкротства. Логит-модели не только относят предприятие в группу, но и позволяют количественно определить вероятность банкротства, тем самым являясь более гибкими, чем их аналогии.

Несмотря на преимущества моделей на основе логистической регрессии, в работах [20–23] отмечаются определенная субъективность при расчете порога вероятности банкротства и присутствие мультиколлинеарности предикторов, являющейся фактором снижения точности модели. Такая проблема обусловлена особенностями национальной учетной политики и отраслевыми аспектами.

Цель настоящей статьи — разработка и апробация новой модели оценки банкротства, адаптированной к российским фармацевтическим предприятиям.

1. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ БАНКОТСТВА

При оценке банкротства с помощью логит-модели предполагается оценка вероятности банкротства в зависимости от показателей деятельности предприятия. Сама природа такой модели заключается в наличии линейной зависимости между натуральным логарифмом интегрального показателя экономического состояния (отклика) и линейной комбинацией показателей функционирования предприятия [14, 21]:

$$\ln \frac{S}{1-S} = a_0 + \sum a_i k_i,$$

где S — вероятность банкротства предприятия, $S/(1-S)$ — коэффициент несогласия, определяющий, во сколько раз чаще отклик принимает значения 1, чем 0, k_i — предиктор (коэффициент, характеризующий определенную сторону экономического состояния), a_0 — свободный член, a_i — весовой коэффициент каждого предиктора. Представленная формула отражает линейную зависимость вероятности банкротства от набора значений экономических коэффициентов предприятия. Отметим, что термин *logit* произошел от того, что уйти от линейности в модели, описываемой этой формулой, можно с помощью логит-преобразования, тем самым значение модели будет находиться на отрезке $[0, 1]$, что свидетельствует о нахож-

дении вероятности банкротства, где 0 — минимальная вероятность, а 1 — максимальная. Для интерпретации коэффициентов и упрощения представления рассматриваемой модели обычно пользуются экспоненциальной формой записи:

$$S = \frac{e^{a_0 + \sum a_i k_i}}{1 + e^{a_0 + \sum a_i k_i}} = \frac{1}{1 + e^{-a_0 - \sum a_i k_i}}. \quad (1)$$

Таким образом, первым этапом построения модели оценки банкротства с применением аппарата логистической регрессии является формирование предикторов (k_i).

1.1. Формирование массива предикторов

Информационной базой для построения модели служит финансовая отчетность фармацевтических предприятий. В формируемой выборке коэффициенты были рассчитаны по двум группам предприятий:

— 72 действующих предприятий, по состоянию на начало 2018 г. (исключены предприятия, находящиеся в процессе ликвидации или реорганизации через формы слияния, разделения и присоединения к другому юридическому лицу, а также находящиеся в процедурах банкротства), по которым $S = 0$;

— 28 предприятий, признанных банкротами в период с 2004 по 2017 г., по таким предприятиям $S = 1$.

На наш взгляд, при формировании массива предикторов необходим динамический анализ показателей, который позволяет определить развитие отрасли и кризисные периоды. Так, к примеру, из-за кризисных процессов, происходивших в российской экономике в 2014–2015 гг., показатели предприятий резко изменялись, что сказывалось на ухудшении общего экономического состояния, при этом фармпредприятия банкротами не становились. Следовательно, расчет показателей по таким нетипичным периодам может привести к некорректным значениям модели и ее низкому качеству.

Для предприятий-банкротов показатели рассчитаны за два года до признания предприятия банкротом (к примеру, если предприятие признано банкротом в 2015 г., то расчет предикторов для массива производился по итогам 2012 г.). Считаем, что двухлетний период оптимален для реализации антикризисных мероприятий в целях сохранения функционирования промышленных предприятий. А для предприятий первой группы не использовались данные по 2014–2015 гг. (кризисные периоды) и с 2016 г. (не закончился двухгодичный лаг). Целесообразно использовать данные за 2013 г.,



считающийся достаточно благоприятным периодом для фармацевтической отрасли.

Горизонт прогнозирования разрабатываемой модели составляет два года. Такой период до вероятного банкротства, как уже сказано, оптимален при создании и реализации антикризисных программ для формирования положительного денежного потока в целях снижения остроты кризиса на предприятиях промышленности. Отметим, что в существующих моделях наблюдается либо короткий срок прогнозирования [20, 22], тогда предприятие не успевает «подготовиться» к кризису, либо увеличение горизонта прогноза [17, 18], снижающее точность модели, так как распределения исходов для двух групп предприятий становится одинаковыми. Добавим, что полученная далее модель тестировалась при различных отчетных периодах до фактического банкротства на предприятиях-банкротах. Зависимость точности, отражающая близость к нулю погрешности результатов измерений по модели, и периода прогнозирования представлены в табл. 1.

Прогнозная сила модели при расчете на отчетных периодах за три и более лет до банкротства сильно снижается, за один год — увеличение недостаточно активное. Таким образом, выбор двухлетнего периода прогнозирования более приемлемый при сохранении высокой точности модели и заблаговременной подготовки к кризису.

В итоге сформированная выборка представляет собой массив данных на определенную отчетную дату, где i -му фармацевтическому предприятию соответствует набор показателей его деятельности k_1, k_2, \dots, k_n , а в зависимости от статуса предприятия (S) — действующее либо банкрот — проставляется 0 или 1 соответственно. Разработка и апробация модели осуществлялись с помощью программного комплекса IBM SPSS Statistics 17.0.

Отметим, что после разработки модели логистической регрессии может возникнуть проблема с низкой точностью прогноза из-за недостаточного объема исходной выборки (наблюдается в разработках моделей [10, 13, 20, 23]). Выбор минимального объема выборки зависит от распределения значений зависимой переменной. При нормаль-

ном распределении для описания систем любой сложности достаточно девять или десять предикторов, где на каждый предиктор необходимо задавать не менее десяти наблюдений [24].

На основе приведенных положений сформируем выборку коэффициентов по данным финансовой отчетности ста фармацевтических предприятий. Для этого необходимо выбрать из множества коэффициентов те, которые:

- имеют экономический смысл и дают информативное, непротиворечивое представление об экономическом состоянии;

- не являются узкоспециализированными показателями и рассчитываются по данным публичной отчетности;

- соответствуют сущности модели оценки банкротства и отвечают целям и задачам антикризисного управления промышленными предприятиями.

Таким образом, были выделены 18 коэффициентов, характеризующие состояние предприятий с различных сторон (ликвидность, рентабельность, структура активов и капитала, финансовая устойчивость): обеспеченности собственными оборотными средствами (K_1), маневренности собственных оборотных средств (K_2), доля дебиторской задолженности в активах (K_3), доля краткосрочных обязательств в структуре капитала (K_4), соотношения иммобилизованных и мобилизованных средств (K_5), текущей ликвидности (K_6), быстрой ликвидности (K_7), абсолютной ликвидности (K_8), финансовый леверидж (K_9), финансовой зависимости (K_{10}), покрытия заемного капитала (K_{11}), доходность капитала (K_{12}), валовая рентабельность (K_{13}), рентабельность активов (K_{14}), рентабельность собственного капитала (K_{15}), рентабельность продаж (K_{16}), рентабельность оборотных активов (K_{17}), степень платежеспособности (K_{18}).

В выборку не вошли показатели оборачиваемости, так как они имеют заниженные значения на промышленных предприятиях. Вместо них включены показатели ликвидности и рентабельности, оперативно реагирующие на изменение экономического состояния предприятий.

Ранее в исследованиях отмечалось, что предикторы, не соответствующие нормальному закону распределения, занижают точность модели [16, 18, 20]. Для проверки гипотезы о принадлежности исследуемой выборки нормальному закону распределения (эмпирическое распределение соответствует ожидаемому распределению) воспользуемся тестом Колмогорова — Смирнова.

Таблица 1

Погрешность модели при различных периодах до фактического банкротства

Отчетный период до банкротства, лет	1	2	3	4	5
Погрешность модели, %	13,1	20,0	31,7	45,6	51,7

Исключение показателей из дальнейшего расчета следует определять по уровню значимости p . Если $p > 0,05$, то исследуемое эмпирическое распределение соответствует нормальному распределению, в противном случае распределение отличается от нормального. Так, к примеру, распределение значений переменных K_1 и K_3 статистически не отличается от нормального, так как $p > 0,05$ и вероятность ошибки незначительна. У переменной K_2 уровень значимости ниже установленного уровня, следовательно, значения плохо подчиняются нормальному распределению и необходимо исключить данный показатель из дальнейшего построения модели.

Таким образом, по итогам теста на нормальность распределения в дальнейшей разработке модели остаются коэффициенты: K_1 , K_3 , K_4 , K_6 , K_7 , K_{10} , K_{11} и K_{13} .

1.2. Оценка тесноты связи между предикторами

В рамках данного этапа необходимо:

— составить матрицу парных коэффициентов корреляции;

— выявить с помощью шкалы Чеддока взаимно коррелирующие коэффициенты (отрицательное значение свидетельствует о противоположной связи между переменными), один из которых исключается из дальнейшего расчета; данное сокращение используемых показателей позволяет уменьшить их количество, при этом уровень оценки экономического состояния предприятия не снижается;

— отобрать коэффициенты, не имеющие сильную и тесную связь, при которых критический уровень значения коэффициента корреляции составляет не более 0,7. Выбранные коэффициенты служат основой для дальнейшего построения уравнения логистической регрессии.

Из анализа матрицы парных коэффициентов корреляции (табл. 2), следует, что целесообразно исключить из дальнейшего исследования коэффициенты K_1 , K_4 и K_6 . Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами (K_1) тесно связан с коэффициентом покрытия заемного капитала (K_{11}) и коэффициентом текущей ликвидности (K_6). В свою очередь коэффициент K_6 имеет высокий парный коэффициент с большинством показателей. Помимо наличия тесной связи с коэффициентом K_6 , у доли краткосрочных обязательств в структуре капитала (K_4) высокая взаимозависимость наблюдается и с коэффициентом финансовой зависимости (K_{10}).

По итогам корреляционного анализа дальнейшая разработка модели логистической регрессии для оценки банкротства фармацевтических предприятий будет основываться на коэффициентах, имеющих нормальное распределение, где парные коэффициенты корреляции между показателями не имеют тесной и сильной связи:

— доля дебиторской задолженности в активах (K_3);

— коэффициент быстрой ликвидности (K_7);

— коэффициент финансовой зависимости (K_{10});

— коэффициент покрытия заемного капитала (K_{11});

— валовая рентабельность (K_{13}).

1.3. Построение уравнения логистической регрессии

Сначала отметим нецелесообразность наличия в уравнении свободного члена. С теоретической точки зрения, если все экономические индикаторы (предикторы) равны нулю, то оценка вероятности банкротства будет рассчитываться на основе

Таблица 2

Матрица парных коэффициентов корреляции

K_i	K_1	K_3	K_4	K_6	K_7	K_{10}	K_{11}	K_{13}
K_1	1,000	0,306	−0,663	0,872	0,658	−0,606	0,813	0,179
K_3	0,306	1,000	0,227	0,121	0,445	0,032	0,290	0,284
K_4	−0,663	0,227	1,000	−0,717	−0,523	0,749	−0,438	−0,119
K_6	0,872	0,121	−0,717	1,000	0,735	−0,588	0,762	0,154
K_7	0,658	0,445	−0,523	0,735	1,000	−0,502	0,607	0,279
K_{10}	−0,606	0,032	0,749	−0,588	−0,502	1,000	−0,673	−0,097
K_{11}	0,813	0,290	−0,438	0,762	0,607	−0,673	1,000	0,052
K_{13}	0,179	0,284	−0,119	0,154	0,279	−0,097	0,052	1,000

значения свободного члена. В реальных экономических процессах при равенстве нулю всех индикаторов промышленное предприятие не функционирует, соответственно, предприятие признается не действующим.

Таким образом, в модели логистической регрессии будет отсутствовать свободный член, формулу (1) преобразуем в уравнение

$$S = \frac{1}{1 + e^{-\sum a_i k_i}}. \quad (2)$$

Построение уравнения регрессии осуществлялось методом исключения (отношения правдоподобия — backward) оставшихся коэффициентов. Данный метод предполагает включение в регрессионное уравнение всех предикторов, в дальнейшем на каждом шаге исключаются наименее «полезные», т. е. предикторы с минимальным значением F -статистики, причем это значение должно быть меньше заранее выбранного порога. Оценка по F -статистике позволяет исключить предикторы, которые на объясняемую переменную оказывают недостаточное влияние. В комплексе IBM SPSS Statistics 17.0 рассчитывается величина p -value, а исключение предикторов заканчивается, когда все они будут удовлетворять выражению $p_i < p$, где p_i — уровень значимости каждого предиктора, p — пороговое значение 0,01.

В табл. 3 приведены статистические характеристики проводимого регрессионного анализа по

построению логистической модели оценки банкротства. Исходя из представленных данных, были исключены два предиктора, так как уровень значимости был больше порогового значения 0,01:

— на шаге 1 исключена доля дебиторской задолженности в активах (K_3): $0,683 > 0,01$ (условие $p_i < p$ не соблюдается);

— на шаге 2 исключен коэффициент покрытия заемного капитала (K_{11}): $0,385 > 0,01$ (условие $p_i < p$ не соблюдается);

— к последнему шагу 3 значения статистики Вальда, как критерия значимости каждого коэффициента a_i для соответствующего предиктора, не имеют сильных отклонений между собой, что свидетельствует об адекватности модели.

Далее при апробации модели и оценки полученных коэффициентов регрессионного уравнения будет применен калибровочный тест, который определяет степень соответствия между оцененными вероятностями банкротства, спрогнозированной моделью, и реальными вероятностями дефолтов.

Таким образом, на основе статистического массива данных ста российских предприятий фармацевтической промышленности, разделенных на действующие предприятия и банкротов, с применением теста на нормальность распределения, корреляционного анализа и с помощью метода отношения правдоподобия была составлена логистическая модель, определяющая вероятность банкротства за два года до его наступления.

Таблица 3

Параметры модели логистической регрессии

Шаг	Предиктор K_i	Весовой коэффициент a_i предиктора	Стандартная ошибка	Статистика Вальда	Число степеней свободы	Уровень значимости p
1	K_3	−0,755	1,850	0,167	1	0,683
	K_7	−1,154	0,977	1,394		0,238
	K_{10}	2,336	0,807	8,378		0,004
	K_{11}	−0,479	0,576	0,693		0,405
	K_{13}	−4,183	1,449	8,332		0,004
2	K_7	−1,339	0,891	2,259		0,133
	K_{10}	2,183	0,699	9,741		0,002
	K_{11}	−0,502	0,578	0,754		0,385
	K_{13}	−4,147	1,437	8,331		0,004
3	K_7	−1,947	0,598	10,584		0,001
	K_{10}	1,984	0,633	9,829		0,002
	K_{13}	−3,970	1,415	7,875		0,005

В целях совершенствования процедуры регрессионного анализа и, как следствие, повышения качества моделей оценки банкротства были уточнены методические аспекты построения:

— использование массива данных по предприятиям одной отрасли: каждая отрасль имеет свои особенности функционирования, включение предприятий других отраслей изменяет уровни предикторов и создает разнонаправленность в оценки (данный аспект не учтен в моделях [14, 17—19]);

— включение в исследование не менее четверти предприятий, признанных банкротами: малый объем фактических данных по банкротам занижает итоговую оценку (малый объем таких данных присутствует в моделях [18, 22, 23]);

— добавление в процедуру анализа проверки на нормальность распределения каждого предиктора в массиве данных (отсутствует в моделях [19, 21]).

В соответствии с формулой (2) и на основе данных табл. 2 полученная логистическая модель имеет вид:

$$S = \frac{1}{1 + e^{1,95K_{б.л} - 1,98K_{ф.з} + 3,97K_{в.р}}}, \quad (3)$$

где S — вероятность банкротства (интегральный показатель экономического состояния фармацевтического предприятия), $K_{б.л}$ — коэффициент быстрой ликвидности (отношение оборотных активов за вычетом запасов к краткосрочным обязательствам), $K_{ф.з}$ — коэффициент финансовой зависимости (доля заемных средств в структуре капитала), $K_{в.р}$ — валовая рентабельность (отношения валовой прибыли к выручке от реализации).

Разработка логит-моделей не предполагает интервальной оценки итогового показателя S , так как рассчитывается значение вероятности банкротства. Однако отметим, что при использовании данной модели для принятия управленческих решений необходимо учитывать критические уровни. Применяя методику [19] с учетом фактических распределений значений модели по расчетной выборке, были выделены два уровня, определяющие устойчивое (благоприятное) экономическое состояние ($S < 0,2$) и зону острого кризиса на фармацевтическом предприятии ($S > 0,8$).

2. АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ БАНКРОТСТВА

2.1. Оценка точности модели по исходной выборке

Для возможности практического применения разработанной модели необходимо протестировать модель на точность прогнозируемых резуль-

татов. На наш взгляд, процесс апробации целесообразно проводить в два этапа.

На *первом этапе* рассмотрим результаты наблюдаемых и предсказанных исходов (банкротств) при нулевой модели и конечной модели, представленных в табл. 4.

Нулевая модель представляет собой уравнение логистической регрессии, где весовые коэффициенты (a_i) каждого предиктора равны нулю. В свою очередь, конечная модель получена методом исключения и отражена формулой (3). Отметим, что граница для разделения предсказанных исходов составляет 50 %, при этом 1 — предприятие признано банкротом, а 0 — действующее предприятие.

Полученная регрессионная модель обладает предсказательной способностью, если ее точность выше, чем точность нулевой модели. При первоначальной модели общий процент корректных предсказанных банкротств составляет 28 %, но в конечной модели он возрастает почти в три раза до 79 %. Уточним, что рассматриваемая точность показывает степень корректных исходов, рассчитанных с помощью регрессионной модели по исходной выборке фармацевтических предприятий.

Для обоснования адекватности модели рассмотрим статистические критерии оценки качества конечной модели.

Значение функции $(-2\log L)$ логарифма отношения правдоподобия в конечной модели снизилось на 41 % в сравнении с начальной моделью и составило 81,23. Уменьшение данного показателя,

Таблица 4

Наблюдаемые и предсказанные исходы исходной выборки

Нулевая модель		Предсказанные исходы		Доля коррект- ных исходов, %
		0	1	
Наблюдаемые исходы	0		72	0
	1		28	100
Общая доля корректных исходов нулевой модели, %				28
Конечная модель		Предсказанные исходы		Доля коррект- ных исходов, %
		0	1	
Наблюдаемые исходы	0	63	9	88
	1	12	16	57
Общая доля корректных исходов конечной модели, %				79



являющееся результатом сравнения двух моделей, свидетельствует об улучшении прогностической способности модели.

Для оценки качества регрессионных моделей, как правило, применяется коэффициент детерминации, но для логистических моделей коэффициент детерминации не является базовым параметром определения точности в сравнении с моделями линейной регрессии. Следовательно, рассчитан псевдокоэффициент детерминации Nagelkerke R^2 — 0,582, являющийся аппроксимацией коэффициента детерминации с учетом функции $-2\log L$ и X^2 . Показатель характеризует степень изменения вероятности банкротства в зависимости от включенных в состав модели показателей, следовательно, изменение вероятности банкротства фармацевтических предприятий зависит на 58,2 % от коэффициентов быстрой ликвидности, финансовой зависимости и валовой рентабельности. Низкие значения R^2 для логит-моделей является нормальным состоянием. В отличие от линейной регрессии в логистической нельзя выдвинуть предположение о постоянстве дисперсии: дисперсия бинарной переменной зависит от частоты распределения значений самой переменной, поэтому вычисляемые коэффициенты детерминации являются приближенной мерой [10].

Поэтому для дополнительной оценки модели и ее параметров рассмотрим калибровочный тест критерий согласия Hosmer — Lemeshow test — статистический тест на пригодность для моделей логистической регрессии. Данный критерий позволяет рассчитывать интервалы между наблюдаемыми и предсказанными распределениями частот банкротов и действующих предприятий. Значение рассматриваемого критерия должно быть выше уровня значимости 0,05. В авторской модели уровень значимости составляет 0,31 (при $X^2 = 9,39$ и $df = 8$), что в шесть раз больше установленного.

Таким образом, рассмотренные характеристики свидетельствуют о том, что полученная модель хорошо откалибрована, имеет достаточную точность в прогнозировании банкротства и может эффективно применяться в практических расчетах.

2.2. Оценка точности и сравнение с существующими моделями по тестируемой выборке

Для подтверждения полученных результатов и возможности применения разработанной модели на практике важна ее апробация на фармацевтических предприятиях, не вошедших в исходную выборку. Для *второго этапа* апробации был сформи-

рован аналогичный массив данных об экономическом состоянии фармацевтических предприятий:

- по 136-ти действующим предприятиям;
- по 30-ти предприятиям, признанным банкротами.

В табл. 5 представлены результаты применения авторской модели оценки банкротства с использованием исходной и тестируемой выборок. Граница разделения исходов сохраняется на уровне 50 %.

Отметим, что граница отсечения в 50 % весьма условна и неполно отражает точность модели. Предсказанная вероятность банкротств некоторых действующих предприятий колеблется вокруг данной границы. Так, к примеру, при повышении границы отсечения на 10 % (до 60 %) доля корректных исходов для действующих предприятий возрастает на 7 %, а общая доля корректных исходов для тестируемой выборки составляет 83 %. Несмотря на это, процент корректных исходов по расчетам на каждой выборке колеблется на одном уровне, что характеризует адекватность модели.

Определив критерии точности разработанной модели, перейдем к сравнительному анализу модели с другими распространенными моделями оценки банкротства адаптированных на промышленных предприятиях. Таким образом, необходимо подтвердить две гипотезы:

- обязательный учет в построении отраслевых аспектов деятельности предприятия;

Таблица 5

Наблюдаемые и предсказанные исходы по исходной и тестируемой выборкам

Исходная выборка		Предсказанные исходы		Доля корректных исходов, %
		0	1	
Наблюдаемые исходы	0	63	9	88
	1	12	16	57
Общая доля корректных исходов исходной выборки, %				79
Тестируемая выборка		Предсказанные исходы		Доля корректных исходов, %
		0	1	
Наблюдаемые исходы	0	109	27	80
	1	8	22	73
Общая доля корректных исходов тестируемой выборки, %				79

— прогнозирование банкротства на основе логистических моделей более результативно, чем на основе других методик.

Так как в сравнительном анализе применяются логит-модели и MDA-модели, необходимым условием для корректного исследования является распределение предприятий на одинаковые группы по степени вероятности банкротства.

Для логит-моделей (авторская, Ю.В. Жданова [20], Г.А. Хайдаршиной [19]) предусмотрено выделение пяти групп с одинаковым интервалом вероятности банкротства (по 0,2), где группа «0—0,2» характеризует минимальный риск банкротства, а «0,8—1» — максимальный.

Группы вероятностей банкротства (пять групп) модели Д.А. Мурадова [10] и Иркутской модели [11] будут соответствовать аналогичным группам для логистических моделей. Группы вероятностей банкротства по модели Я.Д. Вишнякова [13] соответствуют группам «0—0,4» с минимальным и «0,6—1» с максимальным риском банкротства. Предприятия-банкроты по модели А.В. Колышкина [12] будут входить в группу «0,6—1», благополучные — «0—0,4», зона неопределенности — оставшиеся группы.

Таким образом, было получено распределение фармацевтических предприятий тестируемой выборки по пяти группам для сравнительного анализа моделей по предприятиям, признанных банкротами, и по действующим предприятиям (табл. 6).

На наш взгляд, когда в моделях применяется расширенная группировка предприятий, то субъекту управления при выборе более точной модели и ее дальнейшем применении необходимо сравнивать долю предприятий, экономическое состояние которых было неверно спрогнозировано (погрешность результатов измерения). К примеру, данный аспект очень важен при анализе предприятий банкротов, когда необходимо выявить минимальную прогнозную вероятность банкротства при фактическом банкротстве. Некорректное прогнозирование может привести к ошибочной оценке экономического состояния предприятия, к отсутствию реализации антикризисных мероприятий и к скорейшей ликвидации бизнеса. Поэтому расчет погрешности рассматриваемых моделей будет определяться формулой

$$P = \frac{1}{N} \sum N_{S > S_k},$$

где P — погрешность модели, N — общее количество предприятий, $N_{S > S_k}$ — количество предприятий, где рассчитанная вероятность (S_i) больше (меньше) установленного уровня (S_k): для предприятий банкротов $S < 0,4$, для действующих предприятий $S > 0,6$. Интервал «0,4—0,6» представляет зону неопределенности, среднюю вероятность для

Таблица 6

Распределение фармацевтических предприятий по группам вероятностей банкротства

Модель	Группы вероятностей банкротства					Итого предприятий
	0—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8	0,8—1	
Распределение фармацевтических предприятий, признанных банкротами						
Авторская	4	2	4	3	17	30
Хайдаршиной	15	—	—	—	15	
Колышкина	6	—	1	1	22	
Жданова	11	1	—	—	18	
Иркутская	10	—	1	—	19	
Мурадова	5		8		17	
Вишнякова	5		—		25	
Распределение действующих фармацевтических предприятий						
Авторская	94	10	14	14	4	136
Хайдаршиной	122	4	—	1	9	
Колышкина	85	12	11	13	15	
Жданова	103	1	3	3	26	
Иркутская	89	1	6	7	33	
Мурадова	77		38		21	
Вишнякова	56		—		80	



Таблица 7

**Погрешность моделей оценки банкротства
фармацевтических предприятий**

Модель	Предприятия-банкроты, %	Действующие предприятия, %	Все предприятия, %
Авторская	20,0	13,2	14,5
Хайдаршиной	50,0	7,4	15,1
Колышкина	16,7	15,4	15,7
Жданова	20,0	20,6	20,5
Иркутская	40,0	21,3	24,7
Мурадова	33,3	29,4	30,1
Вишнякова	16,7	58,8	51,2

оценки, поэтому предприятия, попавшие в данный интервал, исключены из расчета.

Как видно по итогам оценки точности, представленных в табл. 7, погрешность только трех моделей ниже 20 %: модель Колышкина, модель Хайдаршиной и модель, предложенная автором.

Существенными недостатками логистической модели Хайдаршиной являются самая высокая предсказательная сила для действующих предприятий ($P = 7,4\%$) и в то же время самая низкая для банкротов ($P = 50,0\%$), а также большое количество показателей в модели. Аналогичным «перекосом» прогнозирования обладает модель Вишнякова, показывающая самую высокую погрешность для действующих предприятий ($P = 58,8\%$) и один из лучших результатов по предприятиям, признанными банкротами ($P = 16,7\%$).

Отметим, что модель Колышкина показывает относительно одинаковую точность по двум группам предприятий. Но так как данная модель построена на основе дискриминантного анализа, невозможно определить точную вероятность банкротства, кроме того, 27,7 % предприятий попадают в зону неопределенности (средняя вероятность), что затрудняет оценку и прогнозирование дальнейшего развития бизнеса (по авторской модели в группу «0,4–0,6» попадает только 10,8 % всех предприятий).

Авторская модель обладает высокой точностью среди анализируемых моделей, не имеет сильных отличий в степени точности между действующими предприятиями и предприятиями-банкротами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования с помощью корреляционного-регрессионного анализа была разработана модель оценки банкротства промышленных предприятий (на примере предприятий фармацевти-

ческой промышленности) и проведена ее апробация. Модель построена на основе финансовой отчетности ста предприятий, поэтому в полной мере учтены отраслевые аспекты. Малый объем вычислений и отсутствие узкоспециализированных расчетов позволяют оперативно получать информацию об экономическом состоянии, а универсальность расчета дает возможность проводить сравнительный анализ предприятий в разрезе одной отрасли.

Обозначены методические аспекты построения модели оценки банкротства, не учтенные в существующих исследованиях, которые направлены на рост качества прогноза. Рассмотренные алгоритмы разработки и апробации могут быть применены и к другим отраслям промышленности.

Материалы исследования могут быть полезны собственникам и руководству предприятий в целях построения системы мониторинга; коммерческим банкам при корпоративном кредитовании и мониторинге кредитного риска; консалтинговым организациям и инвесторам для проведения аналитических исследований в промышленности и оценки инвестиционного климата; органам исполнительной власти при осуществлении промышленной политики и контрольно-надзорных функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряховская А.Н., Кован С.Е. Антикризисное управление: современная концепция и основной инструментарий // Управление науки. — 2015. — Т. 5, № 3. — С. 45–55. [Ryakhovskaya, A., Kovan, S. Anti-crisis Management: a Modern Concept and the main Instrumentarium // Management Science. — 2015. — No. 5 (3). — P. 45–55. (In Russian)]
2. Стельмах В.С. Теоретико-методологические особенности антикризисного мониторинга // KANT. — 2018. — № 1. — С. 225–229. [Stelmakh, V.S. Teoretiko-metodologicheskie osobennosti antikrizisnogo monitoringa // KANT. — 2018. — No. 1. — S. 225–229. (In Russian)]
3. Стельмах В.С. Мониторинг стоимости компании в системе антикризисного управления фармацевтическим предприятием // Управление экономическими системами. — 2017. — № 6. (URL: <http://uecs.ru/teoriya-upravleniya/item/4427-2017-05-29-10-52-43>). [Stelmakh, V.S. Monitoring stoimosti kompanii v sisteme antikrizisnogo upravleniya farmatsevticheskim predpriyatiem // Upravlenie ehkonomicheskimi sistemami. — 2017. — No. 6. (In Russian)]
4. Altman, E. Financial Ratios. Discriminant Analysis, and the Prediction of Corporate Bankruptcy // Journal of Finance. — 1968. — No. 4. — P. 589–609.
5. Fulmer, G. A Bankruptcy Classification Model For Small Firms // Journal of Commercial Bank Lending. — 1984. — P. 25–37.
6. Beaver, W. Financial Ratios and Predictions of Failure. // Empirical Research in Accounting Selected Studies, Supplement to Journal of Accounting Research. — 1996. — P. 31–49.
7. Lin, L. Identification of corporate distress in UK industrials — a conditional probability analysis approach // Journal of Applied Financial Economics. — 2004. — No. 14. — P. 73–82.

8. Aziz, M. Predicting Corporate Bankruptcy: Whither do we stand? // Corporate Governance. — 2006. — No. 6. — P. 18–33.
9. Dewaelheyns, N. Aggregate Bankruptcy Rates and the Macroeconomic Environment: Forecasting Systematic Probabilities of Default // Tijdschrift voor Economie en Management. — 2007. — No. 4. — P. 12–35.
10. Мурадов Д.А. Прогнозирование и оценка банкротства нефтегазовых компаний: дисс. ... канд. экон. наук. — М., 2011. — 217 с. [Muradov, D.A. Prognozirovanie i otsenka bankrotstva neftegazovykh kompanii: diss. ... kand. ekon. nauk. — Moscow, 2011. — 217 s. (In Russian)]
11. Давыдова Г.В., Беликов А.Ю. Методика количественной оценки риска банкротства предприятий // Управление риском. — 1999. — № 3. — С. 13–20. [Davydova, G.V., Belikov, A. Yu. Metodika kolichestvennoi otsenki riska bankrotstva predpriyatiy // Upravlenie riskom. — 1999. — No. 3. — S. 13–20. (In Russian)]
12. Колышкин А.В. Прогнозирование развития банкротства в современной России: дисс. ... канд. экон. наук. — СПб., 2003. — 152 с. [Kolyshkin, A.V. Prognozirovanie razvitiya bankrotstva v sovremennoi Rossii: diss. ... kand. ekon. nauk. — SPb., 2003. — 152 s. (In Russian)]
13. Вишняков Я.Д. Оценка и анализ финансовых рисков предприятия в условиях враждебной окружающей среды бизнеса // Менеджмент в России и за рубежом. — 2000. — № 3. — С. 106–111. [Vishnyakov, Ya. D. Otsenka i analiz finansovykh riskov predpriyatiya v usloviyakh vrazhdebnoi okruzhayushchei sredy biznesa // Menedzhment v Rossii i za rubezhom. — 2000. — No. 3. — S. 106–111. (In Russian)]
14. Ohlson, J. Financial Ratios and the Probabilistic Prediction of Bankruptcy // Journal of Accounting Research. — 1980. — No. 6. — P. 12–45.
15. Back, B. Choosing Bankruptcy Predictors Using Discriminant Analysis, Logit Analysis and Genetic Algorithms // Proceedings of the 1st International Meeting on Artificial Intelligence in Accounting, Finance and Tax. — 1995. — No. 4. — P. 337–356.
16. Gruszczynski, M. Modele mikroekonometrii w analizie i prognozowaniu zagrozenia finansowego przedsiebiorstw. — Warszawa: Polska Akademia Nauk, Instytut Nauk Ekonomicznych, 2003. — 33 p.
17. Joo-Ha, N. Bankruptcy prediction — evidence from Korea listed companies during the IMF crisis // Journal of International Financial Management and Accounting. — 2000. — No. 11. — P. 178–197.
18. Minussi, J. Statistical modelling to predict corporate default for Brazilian companies in the context of Basel II using a new set of financial ratios. — Lancaster: Lancaster University Management School, 2007. — 35 p.
19. Хайдаршина Г.А. Методы оценки риска банкротства предприятия: дисс. ... канд. экон. наук. — М., 2009. — 253 с. [Khaidarshina, G.A. Metody otsenki riska bankrotstva predpriyatiya: diss. ... kand. ekon. nauk. — Moscow, 2009. — 253 s. (In Russian)]
20. Жданов В.Ю. Диагностика риска банкротства промышленных предприятий: дисс. ... канд. экон. наук. — М., 2012. — 193 с. [Zhdanov, V.Yu. Diagnostika riska bankrotstva promyshlennyykh predpriyatiy: diss. ... kand. ekon. nauk. — Moscow, 2012. — 193 s. (In Russian)]
21. Begley, J. Bankruptcy classification errors in the 1980s: An empirical analysis of Altman's and Ohlson's models // Review of accounting studies. — 1996. — No. 1. — P. 267–284.
22. Ginoglou, D. Predicting corporate failure of problematic firms in Greece with LPM, logit, probit and discriminant analysis models // Journal of Financial Management and Analysis. — 2002. — No. 15. — P. 1–15.
23. Lennox, C. Identifying Failing Companies: A Re-evaluation of the Logit-, Probit- and DA Approaches // Elsevier Science Inc. — 1999. — No. 4. — P. 181–210.
24. Saaty, T. The Analytic Hierarchy Process. — NY: McGraw Hill. 1980. — 287 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем.

Стедьмах Вениамин Сергеевич — Хабаровский государственный университет экономики и права; ПАО КБ «Восточный», г. Хабаровск, ✉ vs-stel@ya.ru.

Поступила в редакцию 29.10.2018, после доработки 25.12.2018.
Принята к публикации 17.01.2019.

DEVELOPMENT AND TESTING OF LOGIT-MODEL TO ESTIMATE BANKRUPTCY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

V.S. Stelmakh

Khabarovsk State University of Economics and Law, Orient Express Bank, Khabarovsk, Russia

✉ vs-stel@ya.ru

Abstract. It is noted that in the development of industrial enterprises there is always the probability of a crisis, so for continuous and sustainable operation it is necessary to develop the preventive tools that can predict the crisis processes in advance. The model is developed to estimate the bankruptcy on the basis of the logistic regression apparatus for sustainable development of domestic industrial enterprises. The study is conducted on the example of the pharmaceutical industry, and the method of development and testing can be applied to other industries. The model developed is able to predict the probability of bankruptcy of the pharmaceutical industry enterprises two years before its realization.

Keywords: crisis management, modeling, logistic regression, probability of bankruptcy, correlation and regression analysis, elimination method, industrial enterprises, pharmaceutical industry.

ПОИСК АНОМАЛИЙ В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

М.Ю. Чесноков

Аннотация. Отмечено, что в настоящее время растет число проектов открытых данных (ОД) — публикации в свободном доступе информации государственных органов или частных компаний для последующего использования. Один из барьеров в получении выгод от ОД состоит в наличии проблемы качества публикуемых данных. Проанализирована указанная проблема, причины ее появления, рассмотрены метрики и стратегии повышения качества ОД, предложена общая стратегия и ее имплементация для случаев наличия временного и категориального контекстов, предполагающие применение методов поиска аномалий.

Ключевые слова: открытые данные, качество данных, поиск аномалий.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция открытых данных позволяет увеличить доступность информации, прозрачность деятельности государственных и частных структур, стимулировать создание новых сервисов и услуг, вовлекать общественность в решение важных вопросов [1]. Важность концепции ОД подтверждают количественные оценки экономического эффекта от их публикации: согласно исследованию [2], общемировой совокупный эффект от использования ОД в различных областях составляет около \$3—5 трлн. в год. Тем не менее, для получения максимальных эффектов от использования ОД недостаточно только их публикации, необходимо соблюдение определенных юридических, управленческих и технических условий, которые помогут преодолеть существующие барьеры в получении выгод от использования ОД [1]. Одним из них является проблема качества ОД, которая может приводить к неверным решениям, дополнительным издержкам, затруднять применение ОД. Основная причина появления ОД низкого качества заключается в незаинтересованности лиц, публикующих данные, в улучшении ситуации, что можно показать при рассмотрении ОД в аспекте теории общественных благ — в случае ОД возникает так называемая проблема «безбилетника», решение которой возможно путем формирования требований качества и стандартов публикации ОД.

Существует множество исследований, посвященных разработке методологий качества данных [3], однако они не фокусируются на общей методологии и не рассматривают важную группу метрик качества — контекстуальную корректность (см. далее табл. 1). В настоящей работе предложена общая стратегия повышения качества ОД и рассмотрена ее реализация для случаев наличия временного и категориального контекстов, предполагающая применение методов поиска аномалий [4] для контроля контекстуальной корректности.

Структура статьи: § 1 посвящен описанию метрик и проблемы качества ОД; в § 2 проанализированы причины проблем качества ОД; в § 3 рассмотрены стратегии повышения качества ОД, предложена общая стратегия и ее реализация; в § 4 рассмотрена предложенная имплементация стратегии на конкретном примере наборов опубликованных ОД.

1. КАЧЕСТВО ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 представлен типичный жизненный цикл данных в проекте ОД (в котором участвует владелец ОД и конечные пользователи): сбор и подготовка данных на внутренних системах владельца; публикация на платформе ОД (портал в интернете); анализ и применение ОД конечными пользователями. Сбор данных включает в себя интеграцию информации из различных источников, подготовка — обработку и агрегацию собранных

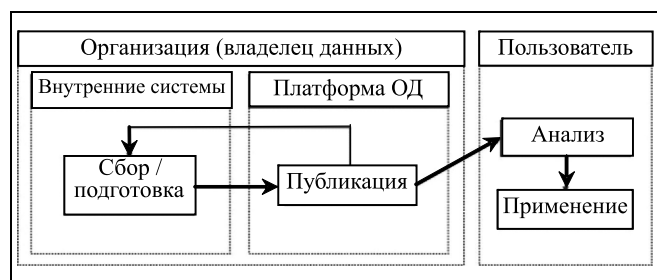


Рис. 1. Типичный жизненный цикл открытых данных

данных в конечный вид. Публикация открывает доступ к данным для внешних пользователей. Анализ данных пользователем может происходить на платформе ОД в случае наличия соответствующих инструментов и инфраструктуры.

На практике положительные эффекты проектов ОД ограничивают ряд проблем, среди которых одной из важнейших является проблема качества данных [1, 5—7], исследуемая в ряде работ: рассматривается качество ОД национальных порталов Чехии [8], Италии [9]; в публикациях [6, 7] авторы разрабатывают фреймворк для автоматического сбора, проверки и мониторинга качества метаданных; в работе [10] с помощью ряда методов поиска аномалий без учителя производится обнаружение ошибочных данных в проекте связанных открытых данных (Linked Open Data, LOD) DBpedia [11]; в работе [12] поиск потенциально некорректных записей в LOD производится путем кластеризации с помощью метода ближайших соседей и выделения аномальных объектов из полученных кластеров.

Качество данных в общем случае определяется как «степень удовлетворения заявленных и подразумеваемых требований при использовании в определенных условиях» [8, 9]. Для измерения качества необходимо введение метрик, при этом создание

универсальных метрик представляется практически сложным [3, 7]. Из анализа литературы можно выделить наиболее распространенные группы метрик качества ОД, представленные в табл. 1.

Отметим, что любые прикладные проекты всегда содержат «грязные» данные (неточные, противоречивые, неполные и т. п.), обнаружение которых является важной задачей [13], так как они могут значительно уменьшать положительные эффекты от реализации проектов ОД из-за: заключения некорректных выводов, принятия неверных решений; построения искаженных прогнозных моделей; дополнительных издержек на повторный сбор и обработку данных; снижения доверия к данным и их владельцам; сложности поиска релевантной информации, интеграции с другими источниками.

2. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

Среди основных причин появления проблем качества ОД [1, 7]: отсутствие стандартов публикации ОД и метаданных; нерепрезентативные данные в источниках (малая или неправильно собранная выборка и др.); разнородные источники, требующие интеграции; намеренное ухудшение качества данных; отсутствие ресурсов для публикации и незаинтересованность владельцев ОД в повышении качества ОД. Последняя из указанных причин становится понятной при рассмотрении ОД в рамках теории общественных благ.

Общественное благо — благо, потребление которого одним лицом не делает его недоступным для потребления другими лицами (свойство неконкурентности), и из потребления которого, невозможно в силу физических или организационных причин устранить какое-либо лицо (свойство неисключаемости) [14]. Открытые данные — общественное благо, так как они обладают свойствами

Таблица 1

Метрики качества открытых данных

Группа метрик	Описание
Синтаксическая корректность	Близость значения к соответствующей области определения: e-mail, URL-адрес, дата
Непротиворечивость	Отсутствие формальных/логических несоответствий: дубликатов, соответствие типов данных
Полнота	Отсутствие пропусков в данных
Контекстуальная корректность	Соответствие контекстным ограничениям, времени, региону, категории и т. п.
Своевременность	Актуальность информации на текущую дату
Свойства ОД	Открытый формат (csv, json, xml) и лицензия, машиночитаемость, контактная информация

Таблица 2

Методы повышения качества данных

Модификация данных	Модификация процесса
получение новых данных; стандартизация / нормализация данных; создание / добавление метаданных; объединение различных представлений одних и тех же данных, удаление дубликатов; обнаружение ошибочных данных и их корректировка; заполнение пропусков, обработка выбросов	формирование и соблюдение требований к качеству ОД; добавление ручных / автоматических процедур валидации и контроля при создании/ обновлении данных; интеграция разнородных источников; выбор надежных источников; обратная связь с пользователями ОД; версионирование данных

неконкурентности (при использовании одним лицом ОД не становятся меньше для других) и неисключаемости (данные публикуются в открытом доступе в сети Интернет). Важно обратить внимание, что свойство неисключаемости ведет к проблеме, известной как «проблема безбилетника» [15] — потребитель осознано желает получить выгоду от общественного блага, не внося платы за него. Проблема безбилетника для ОД заключается в вопросе выделения ресурсов для их создания и обновления — и потребители, и владельцы данных заинтересованы в росте доступной информации и повышении качества публикуемых ОД, но это требует дополнительных издержек.

Существует несколько вариантов решения проблемы безбилетника [16]: 1) экономические (а) и институциональные (б) формы принуждения (например, принудительная вакцинация населения, налоги); 2) преодоление свойства неисключаемости (платная дорога); 3) формирование социальных установок («субботник»). Отметим, что вариант 1 (а) решения проблемы безбилетника в виде налогов за пользование ОД (экономическая форма принуждения) не реалистичен в силу сложности измерения получаемых выгод конкретным лицом. Всеобщая доступность — основной принцип ОД, что ведет к невозможности применения варианта 2 решения — преодоление неисключаемости, не выйдя за рамки концепции ОД (например, данные «по подписке»). Учитывая сложность формирования социальных установок в соответствии с принципами открытости в краткосрочной перспективе (вариант 3), единственный реалистичный вариант решения проблемы безбилетника для ОД заключается в институциональной форме принуждения (вариант 1 (б)), а именно введение обязательства для владельцев данных публикации определенной информации по установленным стандартам — они будут вынуждены следить за требованиями качества ОД.

3. РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

Отметим, что данные низкого качества могут быть следствием плохо организованных процессов создания/обновления данных. В связи с этим подходы к повышению качества данных (табл. 2) можно разделить на две большие группы [3, 9]. В первую из них входят методы, модифицирующие непосредственно данные, а во вторую — методы, модифицирующие процесс создания/обновления данных. Отметим, что в долгосрочной перспективе методы из второй группы более эффективны, так как устраняют причины появления «плохих» данных, в отличие от методов первой группы, направленных на исправление следствий «плохих» про-

цессов создания/обновления данных. Применение методов, модифицирующих процессы, может быть очень трудоемким по сравнению с методами, модифицирующими данные [3].

В работе [3] проведено детальное сравнение и систематизация 13-ти методологий оценки и повышения качества данных. Авторы называют наиболее полными, универсальными и в то же время простыми для применения на практике две из них: TIQM (Total Information Quality Management) [17] и CDQ (Comprehensive Data Quality) [18]. Методология TIQM предполагает сбор и консолидацию всех данных в одну интегрированную базу данных, при этом устраняя ошибки в источниках. Она подразумевает наличие сформулированных требований качества и состоит из трех фаз:

— оценка: анализ требований качества, измерение качества, оценка затрат;

— улучшение: идентификация причин ошибок, разработка улучшений (стандартизация, исправление, заполнение), изменение процессов;

— управление изменениями и мониторинг: исследование удовлетворенности клиентов, анализ систематических барьеров изменений, проверка эффективности изменений.

Методология CDQ уделяет внимание выявлению процессов работы с данными, формулировке требований качества:

— определение текущего состояния: идентификация внешних и внутренних источников данных, их потребителей, описание их взаимодействия, формирование требований;

— оценка: анализ требований качества данных, измерение качества, установка целевых показателей;

— улучшение: идентификация причин ошибок, оценка затрат, выбор методов улучшения.

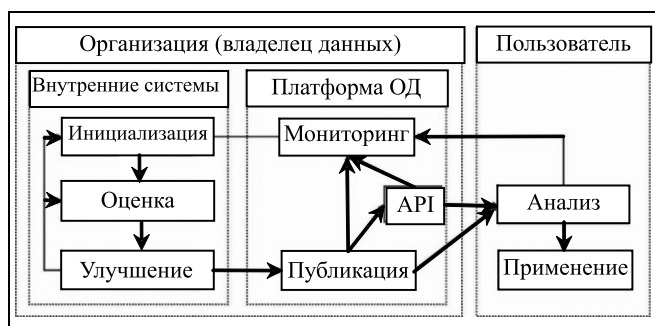


Рис. 2. Жизненный цикл открытых данных по стратегии повышения качества

Объединим и применим приведенные методологии к ОД, разбив их на фазы:

- инициализация: определение необходимых данных, их источников, формирование требований качества;

- оценка: сбор и подготовка данных, установка целевых показателей качества, оценка качества;

- улучшение: идентификация причин ошибок, оценка затрат на исправление данных/процесса, выбор и применение методов повышения качества (см. табл. 2), изменение требований при необходимости, повторная оценка качества;

- мониторинг: обратная связь с пользователями, измерение популярности наборов, поиск новых потребностей в данных.

Формулировка требований качества возможна на основании групп метрик (см. табл. 1) и присутствующих данных в наборах ОД. Важность формулировки требований как части методологии подчеркивается: определением «качества данных»; решением проблемы безбилетника для ОД; обобщением прочих методологий. В результате получается общая стратегия повышения качества ОД.

Приведенный ранее жизненный цикл ОД (см. рис. 1) может быть улучшен в соответствии с описанной стратегией (рис. 2), а также благодаря доступу к данным через API (англ. *Application Programming Interface*) и представление данных как в машино-, так и в человекочитаемом (визуализированном) формате.

Сравним работы, рассматривающие проблему качества данных применительно к ОД. Исследования [6, 7] сфокусированы на оценке, сравнении, мониторинге и визуализации метрик метаданных и порталов ОД, не затрагивая стратегии повышения качества самих наборов ОД. В работе [8] приводятся расплывчатые требования качества наборов ОД (например, «все записи в наборе должны быть корректные», однако для разных наборов это требование может отличаться), а также общие рекомендации по применению некоторых из методов повышения качества (см. табл. 2) без конкретных

примеров. Статья [9] сфокусирована на оценке и сравнении метрик качества ОД, в ней рассматривается контекстуальная корректность и не затрагивается соответствие ОД требованиям качества. Заметим, что в литературе большинство работ сфокусированы на исследовании синтаксической корректности, непротиворечивости и полноты, контекстуальная корректность для ОД не рассматривается. Хотя именно соответствие контекстным ограничениям позволяет говорить об «адекватности» данных. В качестве контекста может выступать дата, регион и прочие категориальные переменные, присутствующие в данных. Ближе всего к этой проблематике работы [10, 12], в которых проверяется контекстуальная корректность, но не для ОД, а для связанных открытых данных (для LOD — не табличной формы данных), и в их фокусе методы выявления конкретных ошибок, а не повышение качества данных в целом.

Восполняя этот пробел, реализуем общую стратегию повышения качества ОД для случая наличия контекста (категориального/временного). Для контроля выполнения требований контекстуальной корректности ОД предлагается применять методы поиска аномалий, изучаемые для разнообразных типов данных и прикладных задач [4]. Аномалиями называют объекты, не похожие на остальные, не подчиняющиеся «нормальным» паттернам поведения [4, 19]. Отметим, что недостаток всех методов поиска аномалий заключается в зависимости результатов от входных параметров и структуры данных (разная структура для различных наборов при рассмотрении сразу нескольких из них). Для нивелирования указанных недостатков целесообразно воспользоваться ансамблированием методов поиска аномалий [19]. Сравнение ансамблирования методов поиска аномалий в режиме отсутствия разметки норма/аномалия для случая временных рядов (временного контекста) представлено в работе [20]. Один из методов — метод медианного абсолютного отклонения (*Median Absolute Deviation, MAD*) [21] — показывает хорошие экспериментальные результаты (не всегда максимально лучшие). Его преимущества: простота применения и интерпретации, универсальность — возможность модификации под соответствующие нужды (например, наличие категориального или временного контекста).

В случае контекста по времени целесообразно применение метода MAD по скользящим окнам, т. е. для каждой точки временного ряда рассчитывается отношение ее абсолютного отклонения от медианы к MAD по окну из предшествующих во времени точек и сравнивается с заранее выбранным порогом. Рассмотрим метод подробнее. Пусть имеется временной ряд из N точек $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ — последовательность значений. Тогда абсолютным

медианным отклонением от медианы по X (т. е. $i \in \overline{1, N}$) будет называться $MAD_X = \underset{i \in X}{median}(|x_i - \bar{x}_X|)$, $\bar{x}_X = \underset{i \in X}{median}(x_i)$. Окном размера w для точки j назовем набор w значений, предшествующих j , т. е. $X_w^j = \{x_i | i \in (j - w, \dots, j)\}$. Аналогично можно задать $MAD_{X_w^j}$ и $\bar{x}_{X_w^j}$ по окну X_w^j и для точки $j + 1$ вычислить ее относительное отклонение от медианы на этом окне:

$$z_{j+1} = \frac{|x_{j+1} - \bar{x}_{X_w^j}|}{MAD_{X_w^j}}.$$

Далее каждой точки $i \in (w + 1, \dots, N)$ присваивается метка аномальности $l_i \in \{0, 1\}$ (0 — норма, 1 — аномалия) в зависимости от того, отклоняется ли она от медианы по окну на заранее заданное r — пороговое число MAD:

$$l_i = \begin{cases} 0, & \text{если } z_i \leq r, \\ 1, & \text{если } z_i > r, \end{cases} \quad i \in (w + 1, \dots, N).$$

В связи с указанными выше недостатками методов поиска аномалий предлагается модификация метода MAD для временных рядов: ансамблирование по пересекающимся скользящим окнам различного размера $\{w_1, \dots, w_Q\}$ и различным порогам MAD $\{r_1, \dots, r_P\}$. Для каждой пары $\{w_q, r_p\}$ рассчитаем бинарные метки аномальности точек $L^{qp} = \{l_{w_q+1}^{qp}, \dots, l_N^{qp}\}$, $l_i^{qp} \in \{0, 1\}$, $q \in (1, \dots, Q)$, $p \in (1, \dots, P)$, с помощью MAD по окну из w_q предшествующих точек. Всего получим QP меток для каждой точки, начиная с $\max_{q \in (1, \dots, Q)} w_q + 1$. Оценку

аномальности a_i для наблюдения i получаем усреднением по QP меткам:

$$a_i = \frac{1}{QP} \sum_{j=1}^{QP} l_i^j, \quad i \in (\max_{q \in (1, \dots, Q)} w_q + 1, \dots, N),$$

где $a_i \in (0, 1)$ интерпретируется как вероятность принадлежности наблюдения множеству аномалий. В результате аномалиями будем считать точки, для которых оценка аномальности превышает заранее заданный порог ансамблирования $a_i > a_{ens}$.

4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТРАТЕГИИ

Применим предложенную реализацию общей стратегии для проверки уже опубликованных наборов ОД. Фазы, имплементированные из общей схемы:

- инициализация (формирование требований качества);
- оценка (установка целевых показателей качества, оценка качества);
- улучшение (корректировка записей, удаление дублей, заполнение пропусков, обработка выбросов).

Рассмотрим наборы с портала ОД правительства г. Москвы [22]. Целевыми показателями качества будем считать выполнение всех приведенных требований.

4.1. Набор «Нарушения ПДД, выявляемые системой фото-видео-фиксации» [23]

В наборе представлено число нарушений ПДД на дату в разрезе по группам. Помимо основных полей («Общее число нарушений по скорости» и т. п.) в наборе присутствует поле «Дата» (временной контекст). Формулировка требований качества приведена в табл. 3. Набор содержит только вре-

Таблица 3

Требования качества к набору примера п. 4.1

Группа	№	Формулировка	Выполнено
Синтаксическая корректность	T1.1	Даты должны соответствовать формату «дд.мм.гггг»	Да
	T1.2	Основные поля должны иметь целочисленный тип данных	Да
Непротиворечивость	T2.1	Основные поля должны содержать значения ≥ 0	Да
	T2.2	Даты должны соответствовать логическим ограничениям и временному периоду: дни от 1 до 31, месяцы от 1 до 12, годы от 2013 до 2018	Нет
	T2.3	В наборе должны отсутствовать дубли по датам	Да
Полнота	T3.1	В наборе должны присутствовать записи на все даты с 01.01.2013 по 30.04.2018	Нет
Контекстуальная корректность	T4.1	Основные поля должны соответствовать контекстным ограничениям (времени)	Нет

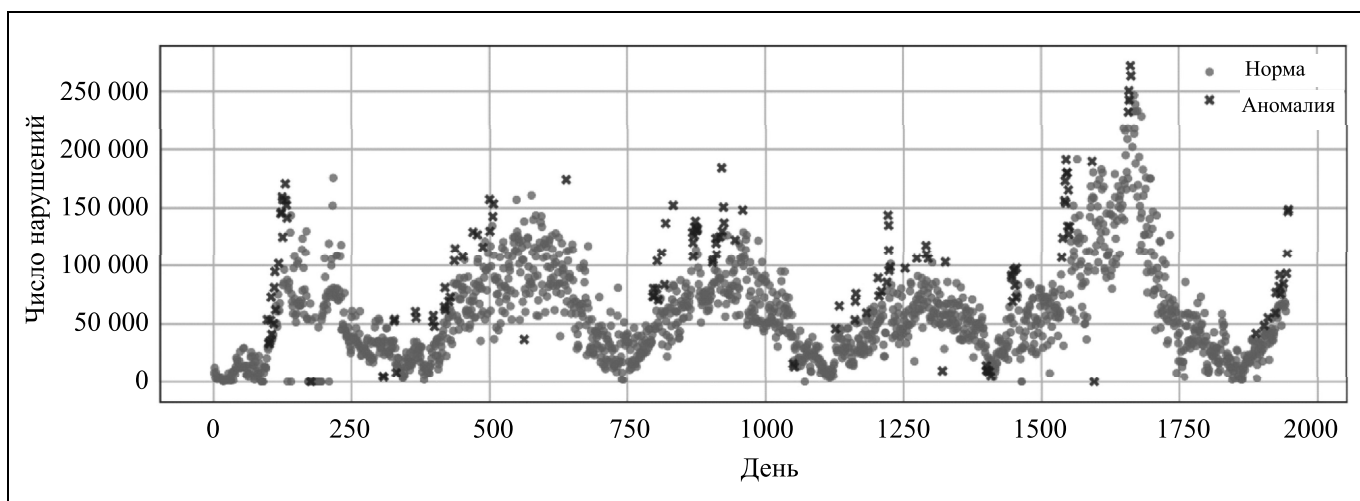


Рис. 3. Число нарушений скоростного режима в день

менной контекст (в разрезе дней), поэтому для проверки требования T4.1 будем применять приведенный в § 3 метод ансамблирования MAD по скользящим окнам. Исходя из числа наблюдений в наборе (1947 дней), наличия годовой сезонности (рис. 3) и более важной ошибки пропуска аномалии, чем ошибки ложного срабатывания (так как можно сделать дополнительную проверку найденных выбросов) для ансамблирования будем использовать параметры порогов MAD: {1,5; 2,0; 2,5} и размеров окон: {30, 60, 90} с общим порогом ансамблирования 0,7. На рис. 3 представлено применение метода для ряда «Число нарушений скоростного режима».

4.2. Набор «Данные вызовов пожарной службы по административным округам г. Москвы» [24]

В наборе отражено число вызовов пожарно-спасательной службы ежемесячно в разрезе административных округов (АО) Москвы (поля: «Год», «Месяц» (текст), АО (категориальный контекст), «Число вызовов»). Соответствующие требования качества приведены в табл. 4. Набор содержит временной (в разрезе месяцев) и категориальный контекст (АО), поэтому для проверки выполнения требования T4.1 будем пользоваться версией MAD по всем АО со стандартным порогом 3, т. е. для каждого месяца берем распределение по АО (масштабируя значения АО) и для каждого АО прове-

Таблица 4

Требования качества к набору примера п. 4.2

Группа	№	Формулировка	Выполнено
Синтаксическая корректность	T1.1	Месяцы должны соответствовать шаблону написания	Нет
	T1.2	АО должны соответствовать шаблону написания	Нет
	T1.3	Поле «Число вызовов» должно иметь целочисленный тип данных	Да
Непротиворечивость	T2.1	Поле «Число вызовов» должно содержать значения ≥ 0	Да
	T2.2	Годы должны быть от 2015 до 2018	Да
	T2.3	В наборе должны отсутствовать дубли по времени и АО	Да
Полнота	T3.1	В наборе должны присутствовать записи на все АО на все месяцы с января 2015 по апрель 2018	Да
Контекстуальная корректность	T4.1	Поле «Число вызовов» должно соответствовать контекстным ограничениям (времени, категории АО)	Нет

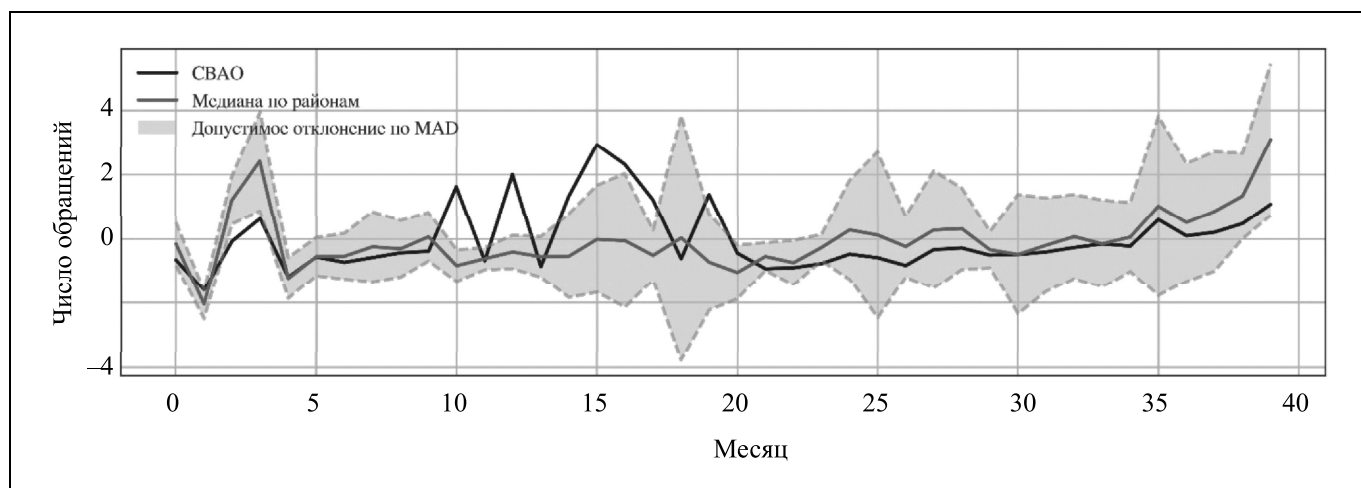


Рис. 4. Число вызовов в месяц (масштабированное) для Северо-Восточного административного округа (CBAO)

ряем, находится ли значение в пределах $3MAD$ от медианы по АО в этом месяце. Визуализация метода представлена на рис. 4 для Северо-Восточного АО (рис. 4 отличается от рис. 3, так как учитываются временной и категориальный контексты).

4.3. Обсуждение результатов

В результате проверки набора из п. 4.1 можно обнаружить даты, нарушающие требование T2.2¹. Также не удовлетворяется требование T3.1, так как в наборе 1917 записей, при этом число дней с 01.01.2013 по 30.04.2018 составляет 1947. Кроме этого, нашлись записи, не удовлетворяющие требованию T4.1, что отражено на рис. 3 (черные крестики). По итогам проверки набора из п. 4.2 можно заключить, что требование T1.1 не удовлетворяется из-за различного написания месяцев. Требование T1.2 нарушается в силу присутствия различного написания АО. Также в наборе присутствуют точки, нарушающие требование T4.1, что показано на рис. 4, — крайние точки отрезков ломаной, выступающие за границы допустимого отклонения (серая заливка). Выявленные потенциально некорректные записи, нарушающие рассмотренные требования качества, могут быть дополнительно обработаны на фазе «улучшение».

В соответствии с выбранными целевыми показателями качества его количественной оценкой может служить относительное число выполненных требований: для набора п. 4.1 выполнены 4 из 7 (или 57 %) требований, а для набора п. 4.2 — 5 из 8 (или 62 %) требований. Обнаружение потенциально некорректных записей и относительный

показатель свидетельствуют о невысоком уровне качества рассмотренных наборов ОД, что подчеркивает актуальность рассматриваемой проблематики качества ОД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для полноценного использования положительных эффектов открытых данных (ОД) необходима публикация качественных данных. В работе проанализированы причины появления проблемы качества ОД с точки зрения теории общественных благ («проблема безбилетника»), показано, что единственный реалистичный вариант решения данной проблемы состоит во введении стандартов публикации ОД (соблюдение требований качества). На основании методологий TIQM и CDQ предложена общая стратегия повышения качества ОД и ее имплементация для случая наличия категориального/временного контекстов, предусматривающая применение методов поиска аномалий для контроля контекстуальной корректности, в том числе модификацию метода MAD для временных рядов с ансамблированием по пересекающимся скользящим окнам различного размера и различным порогами. Применение предложенной общей стратегии позволило обнаружить ряд потенциально некорректных записей в двух опубликованных наборах ОД, что свидетельствует о невысоком уровне их качества и актуальности рассматриваемой проблемы, а также о целесообразности ее применения.

В дальнейшем предполагается применить предложенную стратегию для большего числа наборов ОД и сравнить ее с прочими методологиями повышения качества данных.

¹ Не соответствующие отчетному периоду «03.01.0016», «15.09.2105», «24.12.2018».

ЛИТЕРАТУРА

1. Janssen, M., Charalabidis, Y., Zuidewijk, A. Benefits, adoption barriers and myths of open data and open government // Information systems management. — 2012. — Vol. 29, No. 4. — P. 258–268.
2. Manyika, J., Chui, M., Farrell, D. Open data: Unlocking innovation and performance with liquid information. — McKinsey Global Institute. — October 2013. — Vol. 21. — 116 p.
3. Batini, C., Cappiello, C., Francalanci, C., Maurino, A. Methodologies for data quality assessment and improvement // ACM Computing Surveys. — 2009. — Vol. 41, No. 3. — P. 16.
4. Chandola, V., Banerjee, A., Kumar, V. Anomaly detection: A survey // ACM Computing Surveys. — 2009. — Vol. 41, No. 3. — Article No. 15.
5. Волков А.И., Рейнгольд Л.А. Открытые данные: проблемы и решения // Прикладная информатика. — 2014. — № 3 (51). — С. 5–12. [Volkov, A., Reingold, L. Open data: problems and solutions // Journal of Applied Informatics. — 2014. — No. 3 (51). — P. 5–12. (In Russian)]
6. Umbrich, J., Neumaier, S., Polleres, A. Quality assessment and evolution of open data portals. — URL: <https://aic.ai.wu.ac.at/~polleres/publications/umbr-etal-2015OBD.pdf>.
7. Neumaier, S., Umbrich, J., Polleres, A. Automated quality assessment of metadata across open data portals // Journal of Data and Information Quality. — 2016. — Vol. 8, No. 1. — Article No. 2.
8. Kučera, J., Chlapek, D., Nečeský, M. Open government data catalogs: Current approaches and quality perspective // Inter. Conf. on Electronic Government and the Information Systems Perspective EGOVIS/EDEM — Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013. — P. 152–166.
9. Vetrò, A., Canova, L., Torchiano, M., et al. Open data quality measurement framework: Definition and application to Open Government Data // Government Information Quarterly. — 2016. — Vol. 33, No. 2. — P. 325–337.
10. Wienand, D., Paulheim, H. Detecting incorrect numerical data in DBpedia // European Semantic Web Conference ESWC 2014. — Springer, Cham, 2014. — P. 504–518.
11. URL: <http://wiki.dbpedia.org/about>.
12. Debattista, J., Lange, C., Auer, S. A Preliminary Investigation Towards Improving Linked Data Quality Using Distance-Based Outlier Detection // Joint Inter. Semantic Technology Conf. JIST 2016. — Springer, Cham, 2016. — P. 116–124.
13. Chu, X., Ilyas, I.F., Krishnan, S., Wang, J. Data cleaning: Overview and emerging challenges // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Management of Data. — P. 2201–2206.
14. Бусыгин В.П., Желободько Е.В., Цыплаков А.А. Микроэкономика — третий уровень: учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2005. — 704 с. [Busygin, V.P., Zhelobodko, E.V., Tsyplakov, A.A. Microeconomics. — Novosibirsk: Publishing house SB RAS. — 2005. — 704 p. (In Russian)]
15. Baumol, W.J. Welfare Economics and the Theory of the State // The encyclopedia of public choice. — Boston, MA: Springer, 2004. — P. 937–940.
16. Гринберг Р.С., Рубинштейн А.Я. Индивидуум & Государство: экономическая дилемма. — М.: Весь Мир, 2014. — 480 с. [Grinberg, R.S., Rubinshtein, A. Ya. Individuum & Gosudarstvo: ekonomicheskaya dilemma. — Moscow: Ves' Mir, 2014. — 480 p. (In Russian)]
17. English, L. Total information quality management: A complete methodology for IQ management // Dm Review. — 2003. — Vol. 9, No. 3.
18. Batini, C., Cappiello, C., Francalanci, C., Maurino, A. A comprehensive data quality methodology for web and structured data // Int. J. of Innovative Computing and Applications. — 2008. — Vol. 1, No. 3. — P. 205–218.
19. Aggarwal, C.C., Sathe, S. Outlier Ensembles: An Introduction. — Springer, 2017. — 276 p.
20. Чесноков М.Ю. Поиск аномалий во временных рядах на основе ансамблей алгоритмов DBSCAN // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2018. — № 1. — С. 99–107. [Chesnokov, M. Yu. Poisk anomalii vo vremennykh ryadakh na osnove ansamblei algoritmov DBSCAN // Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii. — 2018. — No. 1. — P. 99–107. (In Russian)]
21. Leys, C., Ley, C., Klein, O., et al. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median // J. of E. Social Psychology. — 2013. — Vol. 49, No. 4. — P. 764–766.
22. URL: <https://data.mos.ru/>.
23. URL: <https://data.mos.ru/opendata/7704786030-narusheniya-pdd-vyavlyayemye-s-ispolzovaniem-avtomaticheskoy-sistemy-fotovideo-fiktsii-narusheniy-pdd> (version 3.30 от 07.05.2018).
24. URL: <https://data.mos.ru/opendata/7710474791-dannye-vyzovov-po-jarnoy-služby-po-ao-goroda-moskvy> (version 1.34 от 8.05.2018).

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

Чесноков Михаил Юрьевич — Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, ✉ mikhail.chesnokov@phystech.edu.

Поступила в редакцию 17.07.2018, после доработки 24.12.2018.
Принята к публикации 6.02.2019.

ANOMALY DETECTION FOR OPEN DATA QUALITY IMPROVEMENT

M. Yu. Chesnokov

Moscow Institute of Physics and Technology, Russia,
✉ mikhail.chesnokov@phystech.edu

Abstract. It is noted that an increasing number of Open Data (OD) projects are making governmental and corporate data available to public with free access and reuse. One of the barriers of getting benefits from OD is the quality of published data. This problem and its causes are analyzed, metrics and strategies of improvement of the quality of OD are considered, the general strategy using anomaly detection techniques and its' implementation for cases of time and categorical contexts are proposed.

Keywords: open data, data quality, anomaly detection.

СИНТЕЗ АРХИТЕКТУРЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В.Г. Промыслов, К.В. Семенов, А.С. Шумов

Аннотация. Представлена комплексная модель кибербезопасности АСУТП. Предложен формальный метод классификации активов по уровням кибербезопасности с применением аппарата теории графов и алгоритмов кластеризации. Предложен метод синтеза архитектуры кибербезопасности систем и рассмотрена его применимость для иерархических систем. Представлен пример синтеза архитектуры кибербезопасности для подсистемы АСУТП атомной электростанции в соответствии с политикой кибербезопасности МАГАТЭ и МЭК.

Ключевые слова: кибербезопасность, АСУТП, атомная электростанция, архитектура кибербезопасности, классификация, кластеризация, граф безопасности, модель «take-grant».

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность системообразующих инфраструктурных объектов, к которым относятся и атомные электростанции (АЭС) — важный компонент безопасности общества и государства. На АЭС цифровая АСУТП выполняет как функции безопасности, так и функции нормальной эксплуатации [1]. Проблема обеспечения безопасности АСУТП АЭС (далее для краткости аббревиатуру АЭС будем опускать) комплексна и связана с обеспечением промышленной (энергетической, ядерной и радиационной, функциональной) безопасности [2], а из-за высокой степени централизации управления объектом на основе компьютеризированных систем — и с обеспечением информационной и кибербезопасности [3]. В международной практике для выделения кибербезопасности из информационной безопасности принята модель МАГАТЭ [4].

Процесс управления кибербезопасностью АСУТП в общем случае можно представить в виде последовательности выполнения следующих шагов [3]:

— собственник АЭС, в соответствии с требованиями в рамках программы информационной безопасности, определяет политики и процедуры безопасности для критически важной информации, нарушение доступности, целостности или

конфиденциальности которой может привести к нарушению штатного режима функционирования АСУТП [4];

— в соответствии с выбранным уровнем описания системы (например, подсистема, процесс и др.) собственник идентифицирует и выделяет критически важные информационные активы, т. е. любые цифровые объекты АСУТП, которые могут влиять на кибербезопасность самой системы или объекта управления;

— собственник идентифицирует функциональность активов в разрезе обработки, хранения и передачи информации в цифровой форме

— по результатам оценок риска на системном уровне проводится классификация/категоризация активов, т. е. назначаются уровни кибербезопасности для активов АСУТП;

— в соответствии с уровнем кибербезопасности назначаются требования к мерам защиты;

— определяется архитектура безопасности АСУТП, в том числе правила разграничения доступа.

Перечислим существенные для обеспечения и анализа кибербезопасности системы свойства АСУТП.

• Система строится по иерархическому принципу, иерархия существует как на уровне архитектуры системы (наличие подсистем), так и на

уровне архитектуры кибербезопасности. Для обеспечения эффективной защиты и минимизации набора применяемых мер осуществляется группировка активов по уровням кибербезопасности. Этот процесс неотделим от задачи категоризации/классификации активов. Объединение активов на уровне архитектуры системы приводит к появлению комплексных активов, которые принадлежат к другому уровню иерархии. Например, актив на уровне компьютера может рассматриваться как объединение активов: процессы, файлы и т. д.

- Основное внимание уделяется сохранению доступности и целостности информации, данные свойства доминируют над принципом сохранения конфиденциальности информации [5].
- Существует устоявшаяся классификация активов по ядерной безопасности, которая может служить базой при классификации активов по кибербезопасности [1].
- Для сохранения целостности основные потоки информации идут от активов с высшим уровнем кибербезопасности к активу с низким уровнем, однако существует технологическая необходимость передавать информацию в обратном направлении. Фактически, с некоторыми исключениями, реализуется модель Биба [6].

Можно заключить, что комплексная задача синтеза архитектуры кибербезопасности АСУТП разбивается на несколько частных задач, таких как категоризация/классификация активов, назначение барьерных мер, согласование информационных связей и др., и сейчас они решаются преимущественно экспертным методом. Как и у любого субъективного метода, результаты решения зависят от квалификации экспертов, нет эталона для сравнения результатов работы разных групп экспертов и пр. Делаются попытки формализации задачи классификации активов, например, представлен подход к оценке кибербезопасности АСУТП на базе методов структурно-логического анализа надежности и безопасности с применением вероятностных моделей [7], рассмотрен метод анализа кибербезопасности на основе теории графов и дискреционной модели доступа [8]. Однако в целом аспект обеспечения кибербезопасности АСУТП до сих пор является нерешенным вопросом в структуре обеспечения безопасности АСУТП, особенно на стадии проектирования и согласования функциональных требований и решений (мер) кибербезопасности.

Рассмотрим задачу — создать комплексную модель кибербезопасности, применимую для АСУТП, которая позволила бы не только описать архитектуру кибербезопасности АСУТП, но и классифицировать активы, определить механизм для синте-

за архитектуры безопасности системы, основанной на заданных функциональных связях между активами, свойствах системы и принятой политике безопасности.

1. КОМПОНЕНТЫ МОДЕЛИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

В качестве компонентов комплексной модели кибербезопасности мы воспользовались дискретной моделью безопасности [9] для задания информационных связей и решеточной моделью доступа, задающей политику безопасности в системе и предложенной в работе [10].

Определение 1. Комплексная модель кибербезопасности АСУТП — это совокупность компонентов $ICM = \langle SLM, DM, R \rangle$, где DM (*data model*) описывает модель обмена информацией между активами, компонент SLM (*security level model*) задает общие правила доступа к информации между уровнями кибербезопасности системы, а набор операторов R задает правила соответствия между активами и уровнями. ♦

Далее рассмотрим компоненты модели подробнее.

1.1. Модель правил доступа к информации

Модель правил доступа определена как совокупность множества классов (уровней кибербезопасности) и отношений между ними и правил, регулирующих отнесение актива к уровню $SLM = \langle SC, \oplus, \rightarrow, \rightarrow \rangle$, где SC — конечное линейно-упорядоченное множество уровней кибербезопасности, состоящее из N_{SC} элементов; \rightarrow — отношение, определенное на паре уровней безопасности ($L_1 \rightarrow L_2$ означает, что информация в простом виде от уровня L_1 может передаваться уровню L_2 , где подстрочный индекс задает порядковый номер уровня); \rightarrow — отношение, определенное на паре уровней безопасности ($L_2 \rightarrow L_1$ означает, что информация от уровня L_2 может передаваться уровню L_1 в безопасном виде); \oplus — оператор группировки (он будет рассмотрен в § 2).

Определим, что передача информации в безопасном виде означает, что на пути передачи информации установлены определенные барьеры безопасности. Если на пути передачи информации барьеров между активами не установлено, то будем говорить о простой передаче информации.

В работе [10] показано, что элементы $SC, \oplus, \rightarrow \vee \rightarrow$ формируют решетку уровней кибербезопасности. Удобно задавать решетку доступа в виде направленного ациклического графа $G_{SLM} = \langle SC, E \rangle$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \cup \{\rightarrow, \rightarrow\}$.



1.2. Модель обмена информацией

Компонент модели DM описывается дискретной моделью безопасности: $DM = \langle G^*, OP \rangle$, где $G^* = \langle \{G_i | i = 1, N\} \rangle$ — все возможные состояния системы, которые описываются графом доступа G_i с вершинами $A = \{A_i\}$, заданными активами, а ребра задают бинарное отношение между парой активов, описывающее направление передачи информации между активами, которые необходимы для обеспечения заданной функциональности системы, OP — множество операций преобразования графа доступа, введенных в рамках модели (будем далее называть их допустимыми) $G_1 = \langle A, \{\rightarrow, -\} \rangle$.

По аналогии с п. 1.1, будем говорить, что информация между активами передается безопасно, если на пути передачи информации между активами установлены определенные барьеры безопасности. Мы не конкретизируем вид этих барьеров, так как он зависит от реализации моделируемой системы. Если же на пути передачи информации барьеры между активами не установлены, то будем говорить о простой передаче информации.

Ребра в графе доступа относятся к одному из двух типов: простая передача информации \rightarrow , безопасная передача информации $-$. Запись $a \rightarrow b$ означает, что информация от актива a передается активу b простым способом. Запись $a - b$ означает, что информация от актива a передается активу b безопасным способом.

Мы ввели разные обозначения для операторов передачи информации между уровнями и между активами, чтобы подчеркнуть разную природу отношений передачи: активы — это реальные физические объекты, тогда как уровни — это абстрактное представление объединения и ранжирования активов.

Определение 2. Будем называть операции чтения (\xrightarrow{r}) и записи (\xrightarrow{w}) антисимметричными, если $a \xrightarrow{w/r} b \not\Rightarrow b \xrightarrow{r/w} a$, иными словами, если операция записи/чтения из a в b не приводит к возможности чтения/записи из b в a .

Определение 3. Назовем передачу информации безопасной, если из отношения $a - b \not\Rightarrow a \rightarrow b$, т. е. передача информации для $L^a < L^b$, где $L_x = R(x)$, не нарушает целостности/конфиденциальности актива b . ♦

Примером безопасной передачи может служить замена записи информации активом a в актив b на операцию чтения активом b из актива a , при условии, что приняты меры, обеспечивающие нарушение симметричности операций r и w .

Сформулируем полезное свойство, что из $a - b \not\Rightarrow a \rightarrow b$, и наоборот, из $a \rightarrow b \Rightarrow a - b$, $L^a > L^b$, и $a \rightarrow b \not\Rightarrow a - b$, $L^a \leq L^b$.

1.3. Операторы отображения моделей SLM и DM

Для более ясного восприятия предположим, что множество графов доступа G^* содержит граф G_i , который является, как минимум, слабо связным. Введем на вершинах G^* порядковую функцию:

$$P(G^*) = \{X: x_1, \dots, x_M\}, \quad M \leq M_A,$$

где M_A — количество активов. Далее введем оператор R , выполняющий преобразование:

$$R(P(G^*)) = \Lambda(l, D).$$

Здесь $\Lambda(l, D)$ — ориентированный граф с M вершинами, которые соответствуют точкам множества $\{X\}$. Обозначим через $A_k \subset A$ и $A_m \subset A$ множества всех активов, которые переходят в вершины l_k и l_m графа Λ соответственно. Тогда правила построения ребер графа $\Lambda(l, D)$ запишутся следующим образом:

- а) если $\exists a_i \in A_k$ и $a_j \in A_m$: $(a_i a_j) \in \rightarrow(A)$ и $P(a_i) \neq P(a_j)$, то $(l_k l_m) \in \rightarrow$;
- б) если $\forall a_i \in A_k$ и $a_j \in A_m$: $k \neq m$, $(a_i a_j) \notin \emptyset$ выполняется условие $(a_i a_j) \in -$, то ребро $(l_k l_m)$ графа Λ существует, причем $(l_k l_m) \in \rightarrow$.

Если граф G^* распадается на несколько областей связности, то

$$R(P(G^*)) = \cup_i R(P(G^{*i})),$$

где G^{*i} — отдельные области связности.

Итак, введение порядковой функции $P(G^*)$ и оператора R означает:

- ранжирование и группировку активов по уровням значимости;
- установление соответствия между информационными связями активов и отношениями доступа между уровнями.

2. СИНТЕЗ АРХИТЕКТУРЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АСУТП

Под термином «синтез архитектуры кибербезопасности» будем понимать процесс приведения модели DM в соответствие с моделью SLM .

Дадим определение кибербезопасной АСУТП в рамках данной модели.

Определение 4. Система, которая описывается моделью ICM , является кибербезопасной, если любая последовательность допустимых операций (OP) над активами в ней не может привести к нарушению потоком информации отношения \rightarrow или \rightarrow . Про такие системы будем говорить, что у них модель DM согласуется с моделью SLM (соответствует модели SLM). ♦

В § 1 мы наложили на число уровней M , задаваемых порядковой функцией $P(G^*)$, единственное ограничение: $M \leq M_A$. Введем оператор группировки уровней \oplus , который стягивает граф $\Lambda(l, D)$ в граф $\Lambda'(l', D')$, число вершин в котором не превосходит N_{SC} .

Ранг (уровень) L новой вершины l' , полученной объединением вершин l_1, l_2, \dots, l_n , задается выражением $L = L^{l_1} \oplus L^{l_2} \oplus L^{l_3} \dots \oplus L^{l_n} = \inf(\{L^{l_1}, L^{l_2}, L^{l_3}, \dots, L^{l_n}\})$.

Ребра графа $\Lambda'(l', D')$ формируются по правилу:

а) если все $l_k \xrightarrow{\oplus} l'_q$ и $l_m \xrightarrow{\oplus} l'_p$, где $l'_q \neq l'_p$ и $(l_k l_m) \notin \emptyset$, удовлетворяют условию $(l_k l_m) \in \rightarrow$, то ребро $(l'_p, l'_q) \notin \emptyset$ и $(l'_p, l'_q) \in \rightarrow$;

б) если найдутся такие $l_k \xrightarrow{\oplus} l'_q$ и $l_m \xrightarrow{\oplus} l'_p$, где $l'_q \neq l'_p$ и $(l_k l_m) \notin \emptyset$, для которых $(l_k l_m) \in \rightarrow$, то ребро $(l'_p, l'_q) \notin \emptyset$ и $(l'_p, l'_q) \in \rightarrow$.

Пусть имеются некоторые две модели SLM и DM . Оператор $R(P(G^*))$ осуществляет отображение (сюръекцию) вершин графа G^* на множество вершин графа $\Lambda(l, D)$.

Достаточное условие того, что модель DM соответствует модели SLM , формулируется следующим образом. Если граф, полученный отображением $R(P(G^*))$, после применения оператора группировки \oplus изоморфен какому-либо минору G_{SLM}^m графа G_{SLM} , т. е. $\Lambda(l, D) \xrightarrow{\oplus} \Lambda'(l', D') \simeq G_{SLM}^m$, то модель DM соответствует модели SLM .

Доказательство следует из определений функции P и операторов $R(P(G^*))$ и \oplus , а также из определения 4.

На практике достаточное условие соответствует утверждению: если имеется спроектированная система, то после присвоения активам уровней кибербезопасности правила доступа к информации между разными уровнями не должны нарушаться.

Заметим, что на отображение $R(P(G^*))$ и граф G_{SLM} могут быть наложены дополнительные условия. Например, в рамках обеспечения ядерной безопасности исключают прямую передачу любой информации непосредственно между активами, чей класс ядерной безопасности отличается друг от друга больше чем на единицу [1]; аналогичный принцип применяется и для обмена информации между активами, классифицированными по уровням кибербезопасности, что накладывает ограничения на смежные активы в графе G^* [5].

3. МЕТОД КАТЕГОРИРОВАНИЯ АКТИВОВ И СИНТЕЗА АРХИТЕКТУРЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

Дадим практическую методику синтеза архитектуры кибербезопасности, основанную на изложенных выше принципах.

Порядковая функция P описывает процесс упорядочения активов, а оператор R расставляет упорядоченные активы по уровням кибербезопасности и выстраивает информационные связи между уровнями.

Мы предлагаем рассмотреть задачу классификации активов как типичную задачу кластеризации [10], т. е. выявления групп объектов, к которым применимы одинаковые критерии. Представленный подход полностью учитывает сложившуюся практику классификации активов по кибербезопасности для АЭС, изложенную в профильных документах МАГАТЭ и МЭК [4, 5].

В кластерном анализе под кластером обычно понимается часть данных, в типичном случае — подмножество объектов, характеризуемых подмножеством переменных, которое выделяется из всего множества наличием некоторой однородности элементов.

Задачу кластеризации можно разделить на четыре подзадачи [12]:

- выбор представления исходных данных для анализа;
- определение вида искомой кластерной структуры;
- выбор критерия оценки кластерной структуры;
- выбор метода построения кластерной структуры.

Рассмотрим каждую из подзадач более детально.

3.1. Типы исходных данных и выбор представления данных для анализа

Для выбора представления данных необходимо идентифицировать активы, определить значения признаков на активах, шкалы измерений. Для задания отношений между признаками и активами предлагается воспользоваться таблицей вида «актив — признак». Для описания признаков задействуются различные типы шкал: ранговая (отражающая ранг), количественная (применяющаяся к количественно измеримым характеристикам), номинальная (применяющаяся к качественным характеристикам).

Число признаков может быть произвольным, но в данной работе для наглядности мы ограничились тремя признаками.

- Класс объекта по ядерной безопасности (от 1 до 3), которому принадлежит актив. Класс ядерной безопасности, присвоенный системе, в зна-

Таблица 1

Признаки активов АСУТП с упрощенным разбиением по информационным свойствам
(в скобках поясняются используемые признаки)

Актив	Класс по ядерной безопасности	Характеристика актива	Информационные свойства актива
(Идентификатор)	(Класс актива в выбранной системе классификации)	(Функциональность активов в разрезе обработки, хранения и передачи информации)	(Характеристика связанности актива с другими активами)

чительной мере определяет ценность системы, так как с ним однозначно связан ущерб от выхода системы из строя. Для задания признака применяется ранговая шкала, приведенная к количественному виду порядковой функцией $R_1(x) = \{1, 2, 3, 4\}$ (для 1-, 2- и 3-го классов и 4 для неклассифицируемых активов соответственно).

- Функциональное свойство или функциональные свойства актива (актив рассматривается в виде серого ящика, обладающего некоторыми внутренними свойствами). Для дальнейшей обработки признак следует привести к количественному виду с помощью порядковой функции: $R_2(x) = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$.
- Информационные свойства актива — характеристики, отражающие информационные связи актива с другими активами.

Информационные свойства актива в части кибербезопасности в значительной мере определяются силой воздействия на систему при нарушении конфиденциальности, целостности и доступности информации, ассоциированной с активом. Классическим подходом для оценки информационных свойств является экспертное ранжирование по фиксированным уровням [14]. Мы рассмотрим аналитический метод для приведения данного признака к количественному виду.

Пусть информационные свойства S актива $a_j \in A$ системы есть некоторая характеристика, зависящая от трех параметров: $S(a_j) = S(C(a_j), I(a_j), T(a_j))$, — где C — конфиденциальность, I — целостность, T — доступность. В дальнейшем, там, где нет необходимости, нотация a_j будет опускаться. В рамках нашей упрощенной модели положим, что $T = T(a_j, t)$ — функция времени и характеристик актива, а $C = C(a_j)$ и $I = I(a_j)$ — функции только характеристик актива. Далее пренебрежем зависимостью кибербезопасности от времени — это разумное допущение на верхнем уровне анализа архитектуры кибербезопасности системы, когда фактически игнорируются динамическое поведение системы. Тогда кибербезопасность можно представить как $S = S(C, I, T)$, $T = \text{const}$.

В информационной безопасности, описываемой дискретной моделью, допустимо считать, что целостность и конфиденциальность не являются независимыми характеристиками (модели Биба и модель Белла — Ла Падуды [14]), а их можно выразить друг через друга.

Достаточно оценить лишь один параметр C или I и воспользоваться для оценки другого параметра моделью, описывающей их зависимость. Мы будем исследовать только свойство целостности, потому что, в соответствии с распространен-

ным подходом [5], основное внимание в АСУТП уделяется сохранению целостности. Тогда

$$S_1(C, I) = S_1(C, I(C)) = S_1(C(I), I).$$

Таблицу признаков можно записать в виде, представленном в табл. 1.

3.2. Отношение порядка на графе безопасности

Из существования отношения порядка на подмножестве вершин (см. Приложение) следует, что на этом подмножестве мы можем ввести порядковую функцию $R(x)$. Значение порядковой функции для актива можно использовать как количественную характеристику информационных свойств актива: $S_1(C(I), I) \sim R_3(x)$.

Наша порядковая функция должна каким-то образом выделить наиболее «важные» активы, т. е. такие активы, которые, будучи скомпрометированы, значительно увеличат риск нарушения целостности системы. Для оценки предположим, что *более важным в смысле организации защиты считаем элемент системы, который передает информацию большему числу абонентов*. Тогда мы приходим к следующей порядковой функции графа безопасности: число исходящих из вершины ребер после транзитивного замыкания графа безопасности по выбранному отношению доступа. Такой подход аналогичен применению метрик цикломатической сложности (точек ветвления) для программного обеспечения при оценке его надежности, когда наиболее критичным модулем программы считается модуль с наивысшей цикломатической сложностью [15].

3.3. Перенормировка данных

После приведения всех признаков к численному виду каждому активу будет соответствовать вектор порядковых функций, задающих численное значение соответствующего признака для актива $\{R_1(x), \dots, R_n(x)\}$, где индекс означает номер признака в таблице признаков (см. табл. 1). Такая таблица содержит данные с независимыми столб-

цами, и значения разных признаков, хоть и приведены в численном виде, часто несопоставимы, так как каждый признак, вообще говоря, имеет свою единицу измерения. Для приведения признаков к сопоставимому виду проводится перенормировка значений: у каждого признака изменяют точки отсчета и масштаб шкалы:

$$R'_{iv}(x) = (R_{iv}(x) - a_v)/b_v,$$

где $R_{iv}(x)$ обозначает исходную матрицу данных, $R'_{iv}(x)$ — перенормированную, i — активы, v — признаки. Параметр a_v задает сдвиг точки отсчета, а b_v — новый масштаб для каждого признака v . Для целей анализа данных, включая кластерный анализ, начало координат лучше всего помещать где-то в районе центра множества точек, представляющих признак для активов [12]. Что касается масштабирующих коэффициентов b_v , то их следует выбирать, исходя из идеи выравнивания относительных шкал признаков.

3.4. Критерии и метод кластеризации

Для разбиения активов на классы кибербезопасности мы предлагаем применить метод кластеризации разбиения с центроидами по методу k -средних [11]. Данный метод основывается на том интуитивном критерии, что объекты внутри кластеров должны быть близки друг к другу, а в разных кластерах — далеки друг от друга. Достоинство метода состоит в разбиении исходного множества на «выпуклые», хорошо интерпретируемые кластеры. Кластерная структура метода k -средних задается разбиением множества объектов S на K непересекающихся кластеров $S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ с соответствующими центроидами $c = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$. Минимизируемым критерием является сумма расстояний $d(y_i, c_k)$ от объектов y_i до соответствующих центроидов c_k :

$$W(S, c) = \sum_{k=1}^K \sum_{y_i \in S_k} d(y_i, c_k),$$

где y_i — строка отнормированной матрицы $y_{iv} = R'_{iv}(x)$, полученной из таблицы «объект — признак», столбцы которой $v = 1, \dots, V$ соответствуют признакам, а строки i — активам. Метрика $d(y_i, c_k)$ — это квадрат евклидова расстояния.

3.5. Присвоение уровней кибербезопасности и анализ согласованности моделей

Методы кластерного анализа позволяют разбить множество элементов на некоторое число групп по заданным критериям однородности элементов, однако они не задают отношений порядка между полученными кластерами.

В данной работе мы предлагаем выстроить отношение порядка между кластерами эмпирическим путем: в каждом из кластеров выбрать актив $A_i \in \{A_j\}$, которому в соответствии с критериями, специфическими для конкретной системы, присвоить некоторый уровень. Данный актив применяется как центр для кластера, содержащий активы данного уровня. При необходимости следует объединить отранжированные кластеры в уровни кибербезопасности. Данные операции (ранжирование и объединение подуровней в уровни) и задаются оператором \oplus в модели SLM .

Итак, пусть мы разбили множество всех активов A на кластеры $\{S\}$, т. е. $A = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_M$. Затем каждому кластеру присваивается ранг. Эти две операции соответствуют применению порядковой функции $P(G^*)$ на множестве активов кибербезопасности.

Затем к полученному упорядоченному множеству сгруппированных активов мы применяем оператор построения графа правил доступа $R(P(G^*))$, получив, таким образом, некоторый граф уровней кибербезопасности $\Lambda(I, D)$ на вычисленном нами разбиении. И, наконец, применив при необходимости оператор \oplus к графу $\Lambda(I, D)$, мы получим ответ на вопрос о соответствии модели DM модели SLM в соответствии с достаточным условием, сформулированным в § 2.

4. 0 КАТЕГОРИЗАЦИИ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Во всех проведенных выше рассуждениях не принималась в расчет иерархическая структура АСУТП. В реальной жизни почти всегда применяются системы, состоящие из подсистем (активы имеют внутреннюю структуру), которые, в свою очередь, включают в себя подсистемы и т. д. Если в исследуемой системе нет подсистем (активы атомарны), то предложенный метод дает полный формальный подход классификации активов по кибербезопасности.

Проведем рассуждения на примере системы с одним уровнем вложенности. Для иерархических систем с большей степенью вложенности можно воспользоваться методом индукции.

На этапе проектирования системы структура подсистем еще не проработана, но уже известен набор подсистем и информационные потоки между ними. Значит, можно построить граф безопасности, анализируемыми активами которого будут подсистемы, и применить предлагаемый нами формальный метод классификации подсистем по уровням безопасности. Тогда каждой подсистеме будет назначен какой-то класс безопасности.

Перед разработчиками подсистемы встает ряд вопросов. Если подсистеме назначен какой-то уро-

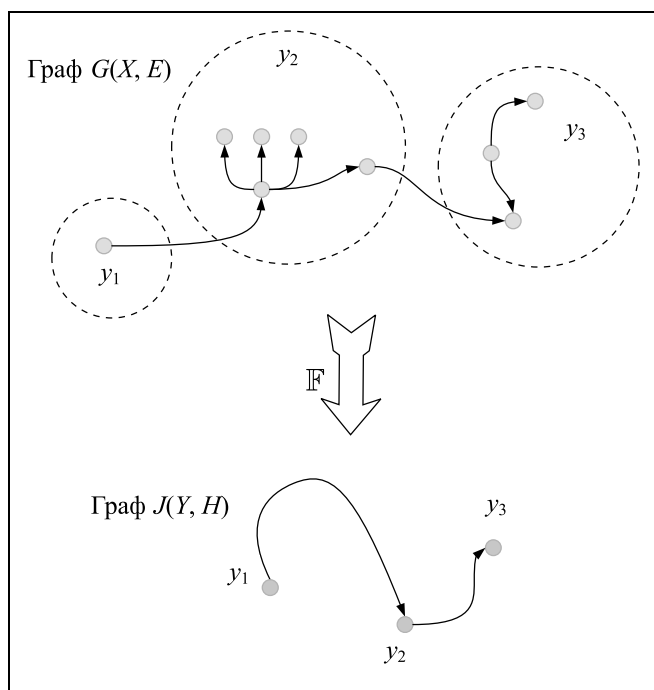


Рис. 1. Графы, описывающие информационную модель АСУТП со структурой подсистем и без нее (вверху и внизу соответственно)

вень кибербезопасности, то означает ли это, что все элементы подсистемы должны защищаться по данному классу? Например, если в подсистеме с высокими требованиями к безопасности есть вспомогательный элемент, который не оказывает влияния на функции системы, должен ли он быть защищен так же, как и основные элементы системы?

Рассмотрим два графа безопасности системы: $G(X, E)$, рис. 1, *вверху*, учитывает структуры подсистем, $J(Y, H)$, рис. 1, *внизу*, — нет. Очевидно, что J — это результат стягивания графа G : $J = \mathbb{F}(G)$, которое не является взаимно однозначным отображением. Формальный метод классификации, вообще говоря, даст различные результаты на графах $J(Y, H)$ и $G(X, E)$. Более того, так как порядковая функция графа строится на транзитивном замыкании графа безопасности, мы придем к парадоксальному выводу: разработчик отдельной подсистемы должен знать структуру всей системы и структуру связей в ней. Как мы видим, простое применение формального метода классификации на развернутом графе не дает практически применимых результатов.

Мы можем устранить данный парадокс, заметив, что, проведя на графе $J(Y, H)$ классификацию подсистем по уровням кибербезопасности, мы наложим на элементы подсистем в первоначальном графе $G(X, E)$ дополнительное условие: указали максимальный уровень кибербезопасности активов в подсистеме.

Мы предлагаем применить следующий алгоритм классификации систем с произвольным количеством уровней вложенности.

Первый шаг. Проектировщик системы строит граф безопасности, вершинами которого являются подсистемы, и проводит на нем классификацию активов. В результате каждой подсистеме назначается определенный класс безопасности. Между подсистемами одного класса могут устанавливаться опциональные барьеры; между подсистемами разных классов должны устанавливаться обязательные барьеры, причем, со стороны подсистемы с более высоким уровнем кибербезопасности. В рамках принятой модели безопасности установка барьера означает, что отношения вида « \leftrightarrow » преобразуются в отношения вида « \rightarrow ».

Второй шаг. Проектировщик каждой из подсистем строит граф безопасности своей подсистемы и проводит классификацию активов с наложенными дополнительными условиями: максимальный уровень кибербезопасности внутри подсистемы равен уровню кибербезопасности, назначенному всей подсистеме; множество активов подсистемы, расположенных на максимальном уровне, не пустое. После проведения классификации он также должен установить барьеры между группами активов: обязательные, если разделяемые группы относятся к разным классам по кибербезопасности, и опциональные, если группы относятся к одному классу по кибербезопасности.

Проектировщик подсистемы второго уровня (подсистемы внутри подсистемы) классифицирует активы своей подсистемы, описанную на втором шаге, и т. д.

5. ПРИМЕР СИНТЕЗА АРХИТЕКТУРЫ И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим как пример синтез архитектуры безопасности для модели безопасности RG 5.71 [16] (рис. 2). Данная модель, фактически с момента появления, стала стандартной для атомной отрасли в международном масштабе. Она с небольшими вариациями повторена в документах МАГАТЭ и МЭК [4, 5]. Для модели безопасности вводится 5 уровней компьютерной (кибер-) безопасности: самый высокий — 1, самый низкий — 5. Без ограничений поток данных разрешен с верхнего на более низкий уровень безопасности; передача

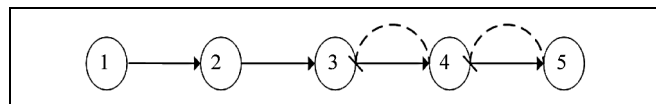


Рис. 2. Упрощенная информационная модель безопасности (штриховыми линиями показаны безопасные отношения)

данных с нижнего уровня на высший разрешена только для двух первых (самых низких) уровней кибербезопасности. Основная цель системы кибербезопасности, построенной по этой архитектуре, заключается в сохранении целостности данных и предотвращении модификации информации системами нижнего уровня кибербезопасности в системах верхнего уровня.

Поток данных от верхнего уровня к нижнему определяется наличием доступа на запись (w) от субъекта, принадлежащего более высокому уровню, к субъекту, находящемуся на низком уровне.

5.1. Классификация активов

Рассмотрим пример классификации активов S сегмента АСУТП, состоящего из нескольких подсистем (активов) ($a1 — a8$). Признаки системы сведены в таблицу признаков (табл. 2). В качестве функционального признака взята функция подсистемы, ранжированная от 1 до 3: управляющая подсистема, подсистема диагностики и мониторинга, вспомогательная подсистема. Граф безопасности системы, отображающий информационные связи в рамках модели дискреционной модели, представлен на рис. 3.

Для расчета признака «целостность» выполнено транзитивное замыкание графа по отношению w . Результат транзитивного замыкания приведен на рис. 4.

По итогам транзитивного замыкания рассчитываются значения введенной нами порядковой функции $R_3(x)$.

Таблица 2

Таблица признаков

Актив	Класс ядерной безопасности	Функциональный признак	Целостность
<i>a1</i>	1	1	7
<i>a2</i>	2		5
<i>a3</i>			
<i>a4</i>	3	3	4
<i>a5</i>		2	
<i>a6</i>			
<i>a7</i>			
<i>a8</i>	4	2	

Таблица 3

Разделение активов S по уровням кибербезопасности

Уровни Активы	$S1$ $a1$	$S2$ $a2, a3$	$S3$ $a4, a7$	$S4$ $a5, a6$	$S5$ $a8$
---------------	--------------	------------------	------------------	------------------	--------------

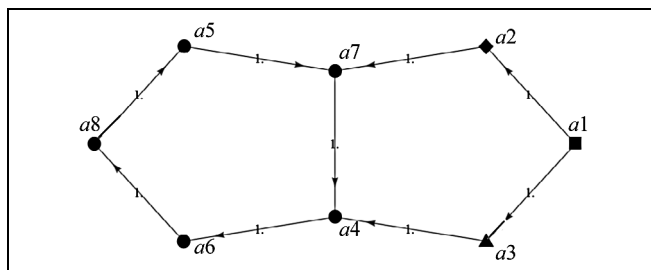


Рис. 3. Граф безопасности системы в рамках модели take-grant (группы сильно связанных активов выделены формой вершин)

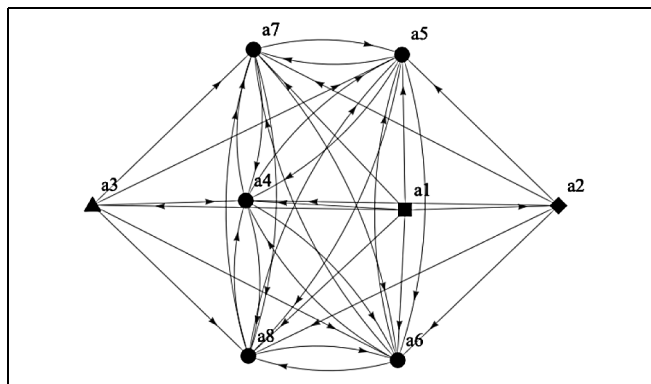
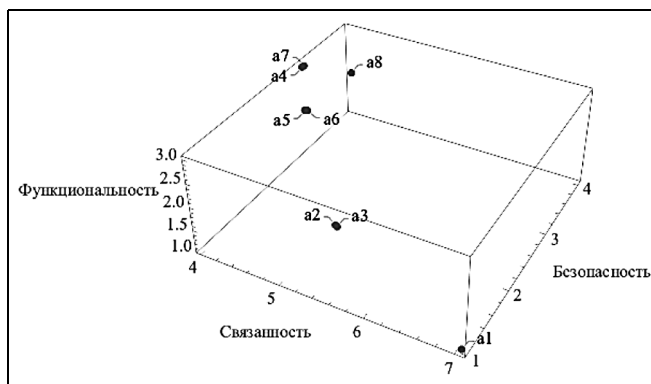

Рис. 4. Транзитивное замыкание для графа безопасности по отношению w


Рис. 5. Графическое отображение разделения активов по уровням кибербезопасности

В результате применения метода кластеризации было получено разделение всего множества активов на 5 непересекающихся подмножеств, где активы сгруппированы по сходству признаков. Графическое отображение этого разделения приведено на рис. 5, где оси на графике представляют собой шкалы соответствующего пространства признаков.

Искомое разделение активов по уровням кибербезопасности приведено в табл. 3.

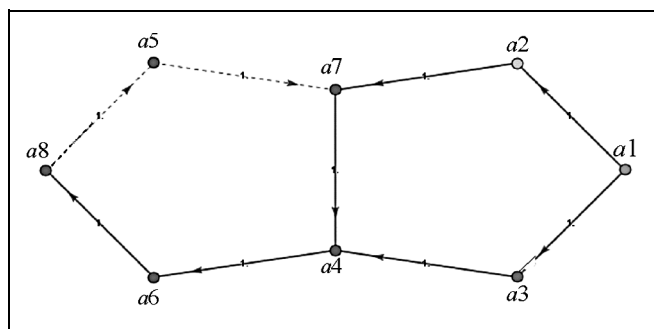


Рис. 6. Модифицированная архитектура сегмента АСУТП: безопасные связи показаны штриховыми линиями

5.2. Синтез архитектуры кибербезопасности

После классификации активов архитектура системы (см. рис. 3) должна быть приведена в соответствие с выбранной моделью безопасности (см. рис. 2). Можно видеть, что информационные потоки в архитектуре, представленной на рис. 3, в целом соответствуют требованиям архитектуры модели безопасности, однако для связи активов $a_8 \mapsto a_5$, $a_5 \mapsto a_7$ используются простые связи, что нарушает целостность активов a_7 , a_5 со стороны активов, принадлежащих более низкому уровню кибербезопасности. Для исключения этого небезопасные связи должны быть трансформированы в безопасные. Для безопасного доступа активов с уровней 5 и 4 к субъектам на более высоких уровнях (4 и 3 соответственно), применяется безопасный антисимметричный доступ по чтению (r) (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы обеспечения кибербезопасности до сих пор остаются непроработанными в структуре обеспечения безопасности АСУТП. Несмотря на существование норм и формальных правил (в виде набора мер) по обеспечению кибербезопасности, для АСУТП атомных электростанций отсутствуют методики согласования функциональных требований и решений по кибербезопасности. Представленная в данной работе комплексная модель кибербезопасности АСУТП состоит из двух основных компонентов, описывающих политику безопасности и информационную архитектуру системы соответственно, и правил, задающих переход от одной модели к другой. В качестве первого компонента рассмотрена модель «решетка» уровней доступа *SLM*, которая задает общие правила доступа к информации между уровнями кибербезопасности системы. В качестве второго компонента

рассмотрена дискретная модель кибербезопасности *DM*, которая описывает обмен информации между активами. В рамках комплексной модели сформулированы правила перехода между моделями *DM* и *SLM*. Получено достаточное условие соответствия модели *DM* модели *SLM*.

Представлен пример синтеза архитектуры безопасности для АСУТП в соответствии с политикой кибербезопасности RG5.71.

Отметим, что процесс согласования моделей (синтез архитектуры) — это, вообще говоря, некорректная задача хотя бы потому, что активов обычно больше, чем уровней кибербезопасности, и системы, отличающиеся как числом активов, так и связями между ними, могут удовлетворять одной и той же модели прав доступа.

Есть основания полагать, что для практического применения важно сформулировать и доказать необходимые условия соответствия моделей для определенных типов систем. Если такие условия удастся получить, то для определенных типов систем можно получить шаблоны, которые позволят заданной модели уровней доступа сразу планировать связи между активами.

В рамках принятой модели уровней доступа предложен практический метод анализа безопасности системы и определения мест, в которых нужно установить барьеры для приведения системы к безопасному виду. Однако выбор способов реализации барьеров или, что то же самое, выбор и обоснование применения конкретных мер защиты в данной работе не рассмотрены.

Предложенный метод включает в себя способ категоризации активов по кибербезопасности, основанный на алгоритмах кластеризации множеств.

Отметим, что возможность практического применения предложенных методов для решения реальных задач зависит от средств моделирования, которыми располагает проектировщик. В работе использована облачная среда моделирования кибербезопасности [17].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Применение модели take-grant для задания информационной модели АСУТП атомных электростанций

Представим информационную модель системы в виде графа (графа безопасности), отражающего физическую природу описываемых систем. Свойства такого графа приведены в табл. 4. Обозначим его как $G = G(X, E)$, где X — множество вершин, E — множество ребер.

Воспользуемся дискретной моделью распространения прав доступа, или моделью take-grant («брать-давать»)

Соответствие физических свойств моделируемой системы ее представлению в виде графа

Физическое свойство системы	Свойство графа $G(X, E)$
Действие имеет источник и потребителя	Направленность
Имеются разные типы активов безопасности (активные и пассивные)	Вершины могут быть разных типов
Имеются различные виды отношений между активами, например, чтение и запись	Ребра могут быть разных типов
Есть иерархия (по крайней мере, в отдельных подсистемах)	Существует отношение порядка (по крайней мере, на подмножестве вершин $\hat{X} \subset X \in G(X, E)$)
Наличие в системе элементов, которые не обмениваются информацией друг с другом	Граф не является тотальным (см. примечание)
Наличие в системе барьеров: шлюзов, брандмауэров, диодов данных	Граф не транзитивен, т. е. из отношения порядка $x_1 \leq x_2$ между вершинами x_1 и x_2 не следует, что эти вершины соединены ребром $(x_1, x_2) \in E$
Реальность инженерных объектов	Граф конечен
Двойственность, симметричность отношений (например, отношений чтения и записи)	Граф может содержать циклы
<p>Примечание. Напомним, что граф называется тотальным, если для любой пары вершин этого графа определено отношение порядка. В реальных системах могут быть элементы, не связанные друг с другом путями передачи информации, т. е. в графе не между всеми вершинами существует путь.</p>	

[18]. Отношения доступа между объектами и субъектами политики безопасности в этой модели описываются с помощью теории графов. Рассматриваемый в настоящей работе вариант модели take-grant основан на подходе, описанном в статье [8]. В рамках данной модели кибербезопасность представляется в виде графа безопасности G , где граф безопасности — это конечный помеченный ориентированный взвешенный мультиграф, описывающий состояние системы.

В графе выделяется два типа вершин: один соответствует субъекту, другой — объекту. Ребро, направленное из вершины A к вершине B , указывает на то, что вершина A имеет некоторое право (права) доступа к вершине B . Обычно стандартными считаются следующие права доступа: чтение (r) (*read*), запись (w) (*write*) (в части передачи информации), взятие (t) (*take*), выдача (g) (*grant*) (в части передачи прав). Отношения, связанные с передачей прав доступа $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \cup \{t, g\}$, принято называть отношениями «де-юре», а $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \cup \{w, r\}$ — отношениями «де-факто». Для отношений «де-факто» введен набор элементарных преобразований для описания передачи информации (*Post*, *Pass*, *Spy*, *Find*) и модификации графа — добавления и удаления вершин и ребер — (*Create*, *Delete*).

Начальный граф доступа G_0 , задаваемый формальной моделью безопасности, может быть трансформирован последовательным применением элементарных правил в новый граф G' (трансформация обозначается как $G_0 \mapsto G'$). Кибербезопасность системы рассматривается с точки зрения возможности получения каким-либо субъектом прав доступа к определенному объекту (в на-

чальном состоянии такие права отсутствуют) при определенной кооперации субъектов путем последовательного изменения состояния системы на основе выполнения элементарных команд. Рассматриваются условия санкционированного, т. е. законного получения прав доступа, и «похищения» прав доступа.

В работе [18] сформулированы условия, при которых субъект может осуществить доступ типа $e \in \{r, w, t, g\}$ к активу для указанного выше набора прав доступа и элементарных правил преобразования графа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Зуенков М.А. и др. Комплекс работ по созданию первой управляющей системы верхнего блочного уровня АСУТП для АЭС «Бушер» на основе отечественных информационных технологий. — М.: ИПУ РАН, 2013. [Mengazetdinov, N.E., Poletykin, A.G., Zuenkov, M.A., et al. Range of works on creation on the first upper block-level I&C system for NPP «Busher» on the base of domestic information technologies. — Moscow: ICS RAS, 2013. (In Russian)]
2. ГОСТ Р МЭК 61513—2011. Атомные станции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200089290>. [IEC 61513—2011. Nuclear power plants — Instrumentation and control important to safety — General requirements for systems. — URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5532>]
3. Бабаев Д.И., Полятыкин А.Г., Промыслов В.Г., Тимофеев М.Ю. Управление архитектурой кибербезопасности АСУТП атомных электростанций // Проблемы управления. — 2018. —



- № 3. — С. 47—55. [Babaev, D.I., Poletykin, A.G., Promyslov, V.G., Timofeev, M. Yu. Control of cybersecurity architecture of nuclear power plants I&C // Control Sciences. — 2018. — No. 3. — P. 47—55. (In Russian)]
4. Computer security at nuclear facilities: reference manual: technical guidance // IAEA Nuclear Security Series. — 2011. — No. 17.
 5. IEC 62645 (2014)/Cor.1 (2015). Атомные электростанции. Системы контроля и управления. Требования к программам обеспечения безопасности для компьютерных систем. — URL: <https://webstore.iec.ch/publication/7311&preview=1>. [IEC 62645(2014)/Cor.1(2015). Nuclear power plants — Instrumentation and control systems — Requirements for security programmes for computer-based systems. — URL: <https://webstore.iec.ch/publication/7311&preview=1>]
 6. Biba, K.J. Integrity Considerations for Secure Computer Systems, MTR—3153. — The Mitre Corporation, June 1975.
 7. Харченко В., Скляр В., Брежнев Е. Безопасность информационно-управляющих систем и инфраструктур. — Palmarium academic publishing, 2013. — 528 с. [Harchenko, V., Sklyar, V., Brezhnev, E. The Security of Information and Control Systems and Infrastructures. — Palmarium academic publishing, 2013. — 528 p. (In Russian)]
 8. Промыслов В.Г., Полятыкин А.Г. Формальная иерархическая модель безопасности верхнего уровня АСУТП АЭС // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2012. — Т. 4 (44). — С. 39—53. [Promyslov, V.G., Poletykin, A.G. Formal Hierarchical Security Model of I&C Upper Level System of a Nuclear Power Plant // Nuclear Measurement and Information Technologies. — 2012. — Vol. 4 (44). — P. 39—53 (In Russian)]
 9. Девянин П.Н. Модели безопасности компьютерных систем. — М.: Academia, 2005. — 144 с. [Devyanin, P.N. Security models for computed-based systems. — Moscow: Academia, 2005. — 144 p. (In Russian)]
 10. Denning, E. A lattice model of secure information flow // Communications of the ACM. — 1976. — Vol. 19, iss. 5. — P. 236—243.
 11. Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. — NY: Wiley. — 1990. — 342 p.
 12. Mirkin, B. Mathematical Classification and Clustering. — Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 1996. — 448 p.
 13. Wood, R.T., Joseph III, R.A., Korsah, K., et al. Classification Approach for Digital I&C Systems at U.S. Nuclear Power Plants. — Oak Ridge National Laboratory, 2012. — URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1209/ML120970232.pdf>.
 14. Bell, D.E., La Padula, L.J. Secure Computer System: Mathematical Foundations // MITRE Technical Report MTR—2547, vol. 1. — MITRE Corporation, Bedford, Mass., 1973.
 15. Harrison, W.A. Applying McCabe's complexity measure to multiple-exit programs. // Software: Practice and Experience. — 1984. — Vol. 14, iss. 10. — P. 1004—1007.
 16. U.S. Nuclear regulatory commission. Research regulatory guide 5.71. Cyber security programs for nuclear facilities, January 2010.
 17. Omole cybersecurity simulation toolkit. — URL: <https://www.omole.ws>.
 18. Bishop, M. Computer Security: Art and Science. — Boston: Addison Wesley. — 2003. — 1136 p.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.
- Поступила в редакцию 18.03.2019, после доработки 03.04.2019.
Принята к публикации 04.04.2019.
- Промыслов Виталий Георгиевич — канд. физ.-мат. наук,
✉ v1925@mail.ru,
- Семенов Кирилл Валерьевич — канд. физ.-мат. наук,
✉ semenkovk@mail.ru,
- Шумов Александр Сергеевич — ✉ mau17@list.ru,
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

SECURITY MODEL FOR INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS FOR NUCLEAR POWER PLANTS

V.G. Promyslov[#], K.V. Semenov, A.S. Shumov

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

[#]✉ v1925@mail.ru

Abstract. This paper presents a comprehensive cybersecurity model for process control systems. A formal method for classifying assets according to cybersecurity levels using the mapping system in the form of a graph and using clustering methods is proposed. A method for synthesizing the cybersecurity architecture of systems is proposed. The applicability of these methods for hierarchical systems is considered. An example of the synthesis of the security architecture for the subsystem of the NPP automated process control system is considered in accordance with the cyber security policy RG5.71. The Appendix describes the security graph in the take-grant model.

Keywords: cybersecurity, I&C, security architecture, NPP, nuclear power plant, classification, clustering, security graph, take-grant model.

СТАЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАЛЫМИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

А.Ю. Ефремов, Ю.С. Легович

Аннотация. Рассмотрена задача управления движением стаи беспилотных летательных аппаратов в квазидвумерном пространстве к целевой точке в среде с препятствиями. Предложен подход, в соответствии с которым на область действия миссии налагается сетка с ячейками выбранного размера, а препятствие интерполируется множеством выпуклых многоугольников, построенных на узлах данной сетки. Предложен алгоритм определения желаемой скорости объектов в группе на основе принципов стайной робототехники. Представлены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: стайная робототехника, беспилотный летательный аппарат, обход препятствий, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Коллективное движение отдельных живых организмов — одно из наиболее интересных явлений в природе. Такое самоорганизующееся поведение прослеживается, например, в стаях птиц и косяках рыб. Движение каждого отдельного члена стаи подчиняется небольшому числу поведенческих правил, а поведение группы при этом довольно сложное. На основании наблюдений за таким поведением К. Рейнольдс представил распределенную поведенческую модель координированного движения стай рыб и птиц [1]. Базовая модель фlocksирования, т. е. самоорганизованного координированного движения группы автономных мобильных объектов, предусматривает три простых правила управления скоростью и курсом, которые описывают маневрирование отдельных объектов на основе положений и скоростей ближайших соседей:

- объект стремится избежать столкновений с соседями (отталкивание);
- объект старается двигаться в том же направлении, что и соседи (выравнивание);
- объекты пытаются двигаться вместе на одинаковом расстоянии друг от друга, не допуская разделения стаи (притяжение).

В случае обхода препятствия стая может временно разделяться на части и снова собираться вместе. Соседство характеризуется расстоянием от объекта и углом, измеренным от направления движения объекта. Согласно модели [1], соседство — это зона, в которой объекты влияют на изменение курса объекта. Объекты вне области соседства игнорируются. Работа [1] явилась мощным стимулом для развития подобного подхода к групповому управлению роботами.

Выделим алгоритмы управления фlocksированием, предложенные Олфати-Сабером (R. Olfati-Saber) и Таннером (H.G. Tanner). В работе [2] представлены теоретические основы для разработки и анализа распределенных алгоритмов фlocksирования и предложены три алгоритма: два для фlocks-тайлинга и один для ограниченного фlocksирования. Один из них отвечает за создание пространственного порядка и удовлетворяет трем правилам Рейнольдса, но приводит к регулярной фрагментации. На его основе разработаны два других алгоритма, один из которых учитывает целевую точку, а другой — предотвращение препятствий соответственно. В работе [3] предложены алгоритмы фlocksирования в фиксированных и коммутируемых сетях, в которых применяется выравнивание векторов скоростей агентов и вводится искусственная потенциальная функция для сохранения



связности группы, а также предотвращения столкновений. Вводится радиус чувствительности и предполагается, что агенты за пределами окружности данного радиуса не влияют на направление. Утверждается, что приведенный алгоритм заставит мультиагентную систему достичь желаемого поведения, а поведение будет робастным. В развитие работ [2, 3] были предложены алгоритмы с виртуальным лидером (например, [4]), несколькими лидерами (например, [5]), с сохранением связей (например, [6]).

Отдельная важная проблема безопасности заключается в способности избегать препятствий в процессе движения. В работе [2] предложен один из первых вариантов алгоритма избегания препятствий, в котором препятствие считается движущимся агентом со своей скоростью, что учитывается при движении мультиагентной системы внутри области влияния препятствия. В работе [7] предложен усовершенствованный алгоритм быстрого флорирования с предотвращением препятствий для многоагентных динамических систем на основе алгоритма Олфати-Сабера. Результаты эксперимента показывают, что производительность предложенного алгоритма лучше в смысле длины пути. В работе [8] для движения к целевой точке или по желаемой траектории вводятся виртуальные объекты (виртуальные указатели — *virtual signposts*). Они применяются также для задания направления обхода препятствий. Важно отметить, что объекты всех типов (мобильные роботы, препятствия, виртуальные объекты (указатели, целевые точки притяжения)) обрабатываются по общим правилам, но с возможностями индивидуальных настроек. Заметим, что во всех работах рассматриваются препятствия, интерполируемые окружностями.

Роботы «стадного» поведения образуют подмножество мобильной робототехники группового применения и отличаются способностью самостоятельно организовывать свои действия в локальном пространстве. Они характеризуются локальным взаимодействием, самоорганизацией, целенаправленностью поведения группы в целом при отсутствии лидера и с минимальным внешним управлением, адаптивностью к изменяющимся условиям внешней среды, нечувствительностью к изменению численности, что приводит к высокой живучести группы в целом. В последнее время для описания такого подмножества мобильной робототехники стали употреблять термин *стадная робототехника*.

Согласно некоторым исследованиям [9], стадная модель представляет собой десятый — высший — уровень развития перспективных технологий группового применения авиационных роботов военного и специального назначения.

Управление движением в стадной модели основано на взаимодействии между отдельными роботами и, в большинстве своем, опирается на биологические системы и природные явления. В частности, виртуальные физические подходы связаны с такими явлениями, как кристаллизация, гравитационные силы и потенциальные поля. Как и в модели Рейнольдса, в этих подходах учитывается баланс сил между отдельными объектами в некоторой локальной области.

Практические реализации группового поведения роботов, в большинстве своем, относятся к движению внутри помещений или в них применяются элементы централизованного управления, децентрализованное же управление обычно предполагает наличие малого числа объектов. В работах [10, 11] описаны алгоритмы стадного управления и их практическая реализация в условиях вне помещений для стаи из десяти автономных квадрокоптеров. Алгоритм основан на «GPS-видении» и децентрализованном управлении и возможности самоорганизации для отслеживания цели и создания формаций. Кроме того, решение оптимизировано для относительно большой внутренней и внешней ошибки (шум, задержки, ограниченная дальность связи). В вертикальном направлении применяется оригинальный алгоритм поддержания высоты квадрокоптера, который поддерживает предопределенную высоту во время всего полета. Таким образом, автономная самоорганизация происходит в квазидвумерном пространстве и удовлетворительна для многих приложений, подобных площадной аэрофотосъемке или распределенному поиску. По словам авторов, это первый реализованный проект с такими свойствами.

Управление движением летающих роботов осуществляется алгоритмом нижнего уровня, например, ПИД-регулятором скорости. Входом для такого алгоритма служит желаемый вектор скорости. Наша статья посвящена алгоритму его определения при некоторых допущениях относительно роботов, окружающей среды, их взаимодействия и решаемых задач.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача движения стаи беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в квазидвумерном пространстве к целевой точке с обходом препятствий с помощью децентрализованного алгоритма управления. Целевая точка может быть динамической, т. е. ее расположение может меняться во время миссии.

В идеальном случае скорость изменяется на желаемую немедленно, однако для приближения к реальной ситуации мы ввели некоторые дополнительные условия, а именно, ограничения на ско-

рость и ускорение (по модулю и углу поворота). Также учитываются габариты БЛА, которые задаются диаметром описанной окружности. Предполагается, что БЛА обмениваются информацией о своем состоянии в реальном времени, но налагаются ограничения на дальность связи, т. е. взаимное влияние объектов друг на друга локальное.

Рассматривается подход, при котором на область действия миссии налагается сетка с ячейками выбранного размера, а препятствие интерполируется множеством выпуклых многоугольников, построенных на узлах данной сетки по определенным правилам.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве базовой мы взяли модель, предложенную в работе [4], добавив в нее учет ограничений по скорости и ускорению. Движение отдельного БЛА в стае описывается уравнением первого порядка:

$$r_i(k+1) = r_i(k) + u_i(k)\Delta t,$$

где $r_i(k)$ — вектор местоположения i -го БЛА, $u_i(k)$ — управляющее воздействие (фактически, вектор скорости), Δt — шаг времени, k — номер шага.

Как и во многих других работах, определение управляющего воздействия или желаемого вектора скорости основано на попарном влиянии объектов друг на друга. Обычно влияние объекта j на объект i рассматривается как вектор силы воздействия, однако его можно рассматривать и в другом качестве, а именно, какая желаемая скорость должна быть у объекта i «с точки зрения» объекта j , поэтому далее мы будем употреблять термин *желаемая скорость*. Воздействие объектов друг на друга зависит от множества факторов: типа объекта, взаимного расположения (с учетом вектора скорости), расстояния между ними. В качестве таких объектов выступают другие БЛА, препятствия, а также виртуальные объекты (целевые точки притяжения, например, узловые точки маршрута, а также виртуальные указатели).

Желаемая скорость вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} u_i &= f(\tilde{u}_i), \\ \tilde{u}_i &= v_i \begin{pmatrix} \cos \vartheta_i \\ \sin \vartheta_i \end{pmatrix}, \\ v_i &= \sum_{j=1}^N \beta_{ij} v_j / \sum_{j=1}^N \beta_{ij}, \\ \vartheta_i &= \arctg \left(\sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sin \vartheta_{ij} / \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \cos \vartheta_{ij} \right), \end{aligned}$$

где v_i и ϑ_i — модуль и направление желаемой скорости \tilde{u}_i , v_{ij} и ϑ_{ij} — модуль и направление силы воздействия j -го объекта, β_{ij} — весовые коэффициенты, $\beta_{ii} = 1$, N — общее число объектов.

Функция f учитывает ограничения на скорость (диапазон допустимых значений) и ускорение (по модулю и по углу поворота) и преобразует желаемое управляющее воздействие в допустимое.

Определяющий фактор в данной модели заключается в задании функций, описывающих взаимное влияние объектов друг на друга. Заданное расстояние между БЛА определим постоянным, равным D , которое служит своеобразной точкой равновесия. Данное значение определяет плотность стаи и в свою очередь определяется требованиями безопасности, которые зависят от допустимых значений скорости и ускорения.

Как и в модели Рейнольдса, взаимное влияние одного объекта на другой зависит от расстояния между ними и их взаимного расположения, что приводит к трем возможным моделям поведения: *отталкивание*, *притяжение* и *имитация*. Все эти модели поведения вносят свой вклад в определение желаемой скорости со своими весовыми коэффициентами:

$$v_{ij} = \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} v_{ij,b} / \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b},$$

$$\vartheta_{ij} = \arctg \left(\sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} \sin \vartheta_{ij,b} / \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} \cos \vartheta_{ij,b} \right),$$

где v_{ij} и ϑ_{ij} — модуль и направление желаемой скорости объекта i «с точки зрения» объекта j , B — множество основных моделей поведения (отталкивание, притяжение, имитация), $v_{ij,b}$ и $\vartheta_{ij,b}$ — модуль и направление желаемой скорости объекта i «с точки зрения» объекта j , $\alpha_{ij,b}$ — весовые коэффициенты для данных моделей поведения, индекс « b » означает одну из трех моделей поведения. Такой подход фактически аналогичен методам нечеткой логики и позволяет, в частности, избежать возмущений при переходе через точку равновесия.

Коэффициенты $\alpha_{ij,b}$, $i \neq j$, приведены на рис. 1. Заметим, что в окрестности точки равновесия всегда присутствует имитация, а также отталкивание или притяжение.

Влияние же объекта на свое собственное поведение заключается в «желании» объекта не менять свою скорость, т. е. работает только функция имитации, и ее коэффициент α_{ii} равен 1, а соответствующие коэффициенты для функций отталкивания и притяжения равны 0.

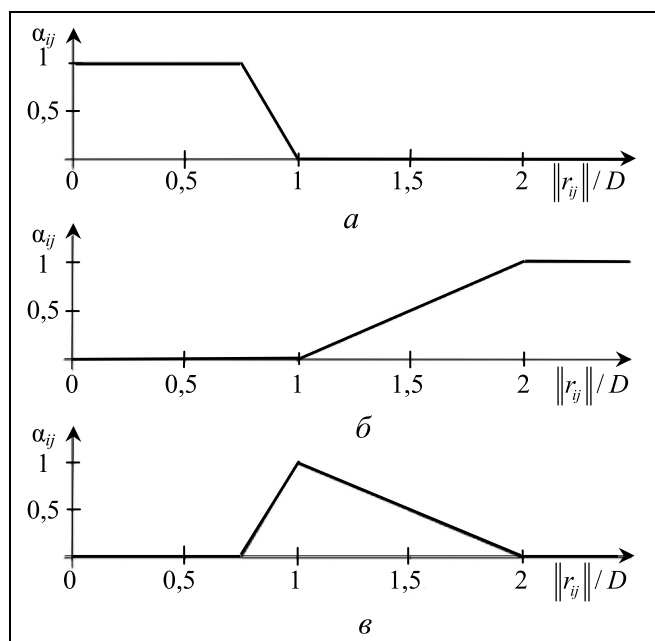


Рис. 1. Графики коэффициентов α_{ij} для разных моделей поведения: а — отталкивание; б — притяжение; в — имитация

В таблице приведено определение желаемой скорости объекта i «с точки зрения» объекта j для разных моделей поведения.

Весовые коэффициенты β_{ij} , $i \neq j$, зависят от расстояния между объектами $|r_{ij}|$ и задают степень влияния объекта j на объект i . Коэффициенты $\beta_{ii} = 1$ определяют точку отсчета для степени влияния объектов друг на друга. Например, если объект j расположен слишком близко, то для избегания столкновения требуется задать желаемую скорость от объекта j к объекту i с большим значением β_{ij} , что приводит к доминации данного члена суммы при расчете желаемой скорости. Можно воспользоваться линейной зависимостью β_{ij} от расстояния между объектами или функциями более высокого порядка, например, третьего. В нашей модели рас-

считывались оба варианта, а именно параметрические функции первого и третьего порядков:

$$\beta(x) = \begin{cases} y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_1} x, & x < x_1 \\ \frac{y_1}{x_1 - x_2} (x - x_2), & x_1 \leq x < x_2 \\ 0, & x \geq x_2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\beta(x) = \begin{cases} y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_1^3} x^3, & x < x_1 \\ \frac{y_1}{(x_1 - x_2)^3} (x - x_2)^3, & x_1 \leq x < x_2 \\ 0, & x \geq x_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где x — расстояние между объектами $|r_{ij}|$, деленное на D , а x_1, x_2, y_1, y_2 — параметры, $x_1 < x_2$, $\beta(0) = y_2$, $\beta(x_1) = y_1$. Значение x_2 можно интерпретировать как расстояние, при превышении которого влияние объектов прекращается, оно может зависеть от дальности связи, при рассмотрении влияния объектов в стае, или от дальности сенсоров, если рассматривается влияние препятствия. Заметим также, что можно задавать тип функции $\beta_{ij}(x)$ и ее параметры отдельно для каждой пары объектов.

Приведенная модель подходит для определения взаимного влияния друг на друга объектов в стае, а также влияния препятствий, интерполированных окружностями, на мобильные объекты. Заметим, что у препятствий отсутствует функция притяжения, а функция имитации вводится искусственно путем добавления виртуального указателя в центр окружности. Кроме того, эта модель подходит и для виртуальных объектов, таких как целевая точка притяжения и виртуальные указатели. В данной работе мы из виртуальных объектов будем рассматривать только целевую точку. Она имеет только одну модель поведения — притяжение; имитация и отталкивание отсутствуют. Также мы полагаем, что функция притяжения постоянна и равна 1.

3. ОБХОД ПРЕПЯТСТВИЙ

Как уже отмечалось, основная модель поведения препятствия — *отталкивание*. Моделью поведения препятствия может быть и *имитация*, что позволяет дополнительно задать направление обхода препятствия. Модель поведения *притяжение* отсутствует. В работе [8] рассматривались общая сила отталкивания и общая сила имитации для всего препятствия.

Взаимное влияние объектов

Модель поведения (b)	Положение объекта j относительно объекта i	Вектор желаемой скорости объекта i	
		Модуль	Направление
Отталкивание	Впереди Сзади	Минимум Максимум	От объекта j к объекту i
Имитация	Любое	Как у объекта j	Как у объекта j
Притяжение	Впереди Сзади	Максимум Минимум	От объекта i к объекту j

В рамках развития данной модели была исследована альтернативная возможность описания препятствий, которая заключается в следующем. Вся область миссии описывается при помощи сетки с ячейками выбранного размера, а препятствие интерполируется множеством выпуклых многоугольников, построенных на узлах данной сетки по определенным правилам, в частности, ребро многоугольника соединяет узел сетки только с его соседними узлами.

Это дает возможность рассчитывать расстояние между БЛА и препятствием как расстояние между БЛА (с учетом его габаритов, а именно, радиуса описанной вокруг него окружности) и ближайшей вершиной многоугольника, описывающего препятствие. Применение более точного метода расчета расстояний, а именно, построение нормали к ребрам многоугольника, существенных улучшений не дало (при правильном выборе размера ячеек сетки). Заметим, что теперь и расстояния между БЛА также рассчитываются с учетом их габаритов, а не между их центрами. Таким образом, мы имеем реальное расстояние между объектами.

Рассмотрим более подробно влияние препятствия на БЛА и возможность его описания в рамках приведенной выше универсальной модели. Для этого рассмотрим желаемую скорость БЛА относительно препятствия. Один из возможных подходов состоит в определении желаемой скорости с учетом двух факторов: избегания столкновения и обхода вдоль границы препятствия, например, по касательной. Третий фактор заключается в расположении целевой точки относительно БЛА и препятствия.

Отдельный вопрос — выбор желаемого расстояния D между БЛА и препятствием. Поскольку у препятствия нет функции притяжения, желаемое расстояние уже не является точкой равновесия в паре «БЛА — препятствие», а просто определяет безопасное расстояние и используется при расчете весовых коэффициентов β в универсальной модели.

Переход к альтернативному описанию препятствий дал возможность формировать желаемую скорость БЛА в каждом узле многоугольника, которая складывается из двух частей: избегание столкновения — вектор скорости направлен по нормали от препятствия и обход препятствия (имитация) — вектор скорости направлен вдоль его границы к следующей точке, причем отдельно для каждого направления обхода (по часовой стрелке и против часовой стрелки). Суммарная желаемая скорость v_{ij}^k БЛА (объект с индексом i) относительно k -й точки препятствия (объект с индексом j) складывается из двух слагаемых: вектора отталкивания $v_{ij}^{k,rep}$ и вектора обхода (имитации) $v_{ij}^{k,imit}$ с

учетом весовых коэффициентов γ_{ij}^k , k — номер точки препятствия:

$$v_{ij}^k = \gamma_{ij}^k v_{ij}^{k,rep} + (1 - \gamma_{ij}^k) v_{ij}^{k,imit},$$

где $v_{ij}^{k,imit}$ выбирается в зависимости от направления обхода, γ_{ij}^k зависит от взаимного расположения БЛА и препятствия с учетом направления вектора скорости БЛА, а также расположения целевой точки относительно БЛА и препятствия. Смысл коэффициентов γ_{ij}^k заключается в том, чтобы при движении БЛА на препятствие доминирующим поведением было отталкивание, а при движении вдоль — имитация (обход). Для расчета была принята правосторонняя система координат (x', y') , связанная с БЛА, при этом ось x' направлена вдоль вектора скорости БЛА:

$$\gamma_{ij}^k(y') = \begin{cases} \min\left(1 - \gamma_{\min}, \max\left(\gamma_{\min}, 1 - \frac{|y'_R|}{D + S}\right)\right), y' < y'_R \\ 1 - \gamma_{\min}, y'_R \leq y' \leq y'_L \\ \min\left(1 - \gamma_{\min}, \max\left(\gamma_{\min}, 1 - \frac{|y'_L|}{D + S}\right)\right), y' > y'_L \end{cases},$$

где y' — координата k -й точки препятствия, y'_R , y'_L — координаты крайней правой и крайней левой точек препятствия в данной системе координат: $y'_R > y'_L$, S — диаметр описанной окружности (габариты) БЛА, γ_{\min} — параметр. Алгоритм определения крайних точек препятствия может быть различным. Если заранее известны координаты всех точек препятствия, то выбор происходит из всех видимых точек (по правилам геометрии), в противном же случае, учитывается дальность сенсоров, и выбор ведется из подмножества видимых точек с учетом характеристик приборов.

Общее влияние препятствия можно учитывать двумя способами, а именно, как отдельное воздействие каждой из точек или как усредненное воздействие всего препятствия. Согласно первому из них, каждая точка препятствия рассматривается как отдельный объект влияния на БЛА, согласно второму способу — препятствие рассматривается целиком:

$$v_{ij} = \sum_{k \in \Omega} \beta_{ij}^k v_{ij}^k / \sum_{k \in \Omega} \beta_{ij}^k,$$

$$\vartheta_{ij} = \arctg\left(\sum_{k \in \Omega} \beta_{ij}^k \sin \vartheta_{ij}^k / \sum_{k \in \Omega} \beta_{ij}^k \cos \vartheta_{ij}^k\right),$$

где β_{ij}^k — весовые коэффициенты, рассчитываемые в зависимости от расстояния от БЛА до k -й точки препятствия, аналогично зависимостям (1) и (2), Ω — множество, состоящее из тех точек препятствия, которые учитываются при расчете.

Заметим, что множество Ω динамическое. Простейший вариант состоит в учете влияния только одной ближайшей точки препятствия. Предпочтительно учитывать дополнительно только те точки препятствия, которые лежат впереди БЛА (имеют

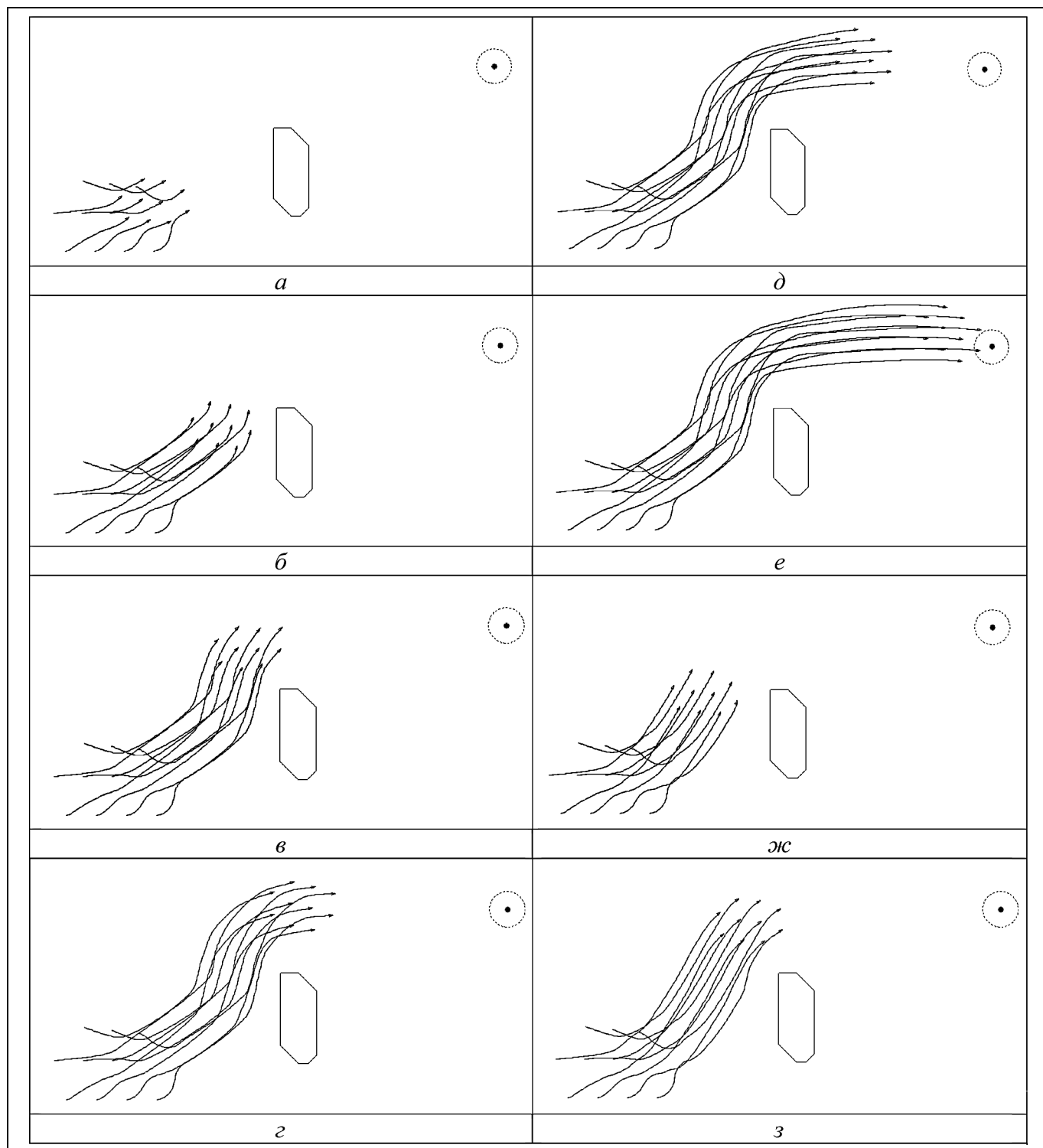


Рис. 2. Результаты моделирования: *a* — шаг 30; *б* — шаг 75; *в* — шаг 110; *г* — шаг 140; *д* — шаг 180; *е* — шаг 225; *ж* — шаг 75; *з* — шаг 110

положительную координату x' в системе координат БЛА).

При решении задачи движения к целевой точке также учитывается фактор нахождения препятствия на пути данного БЛА к цели. Если препятствие не на пути, то его влияние не учитывается в расчетах. Однако при движении стаи, а также при наличии других достаточно близко расположенных препятствий это может привести к столкновению. Поэтому следует учитывать, на каком расстоянии от препятствия проходит БЛА на пути к целевой точке и определить некое безопасное расстояние, которое можно выбрать равным D . В не-

которых случаях возможна и более тонкая настройка.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При численном моделировании рассматривалась задача движения стаи, состоящей из десяти БЛА самолетного типа, к целевой точке с обходом препятствия (рис. 2). Треугольниками показаны БЛА, черной линией ограничено препятствие. Целевая точка имеет зону, ограниченную штриховой окружностью, при попадании в которую любого БЛА из стаи миссия считается выполненной.

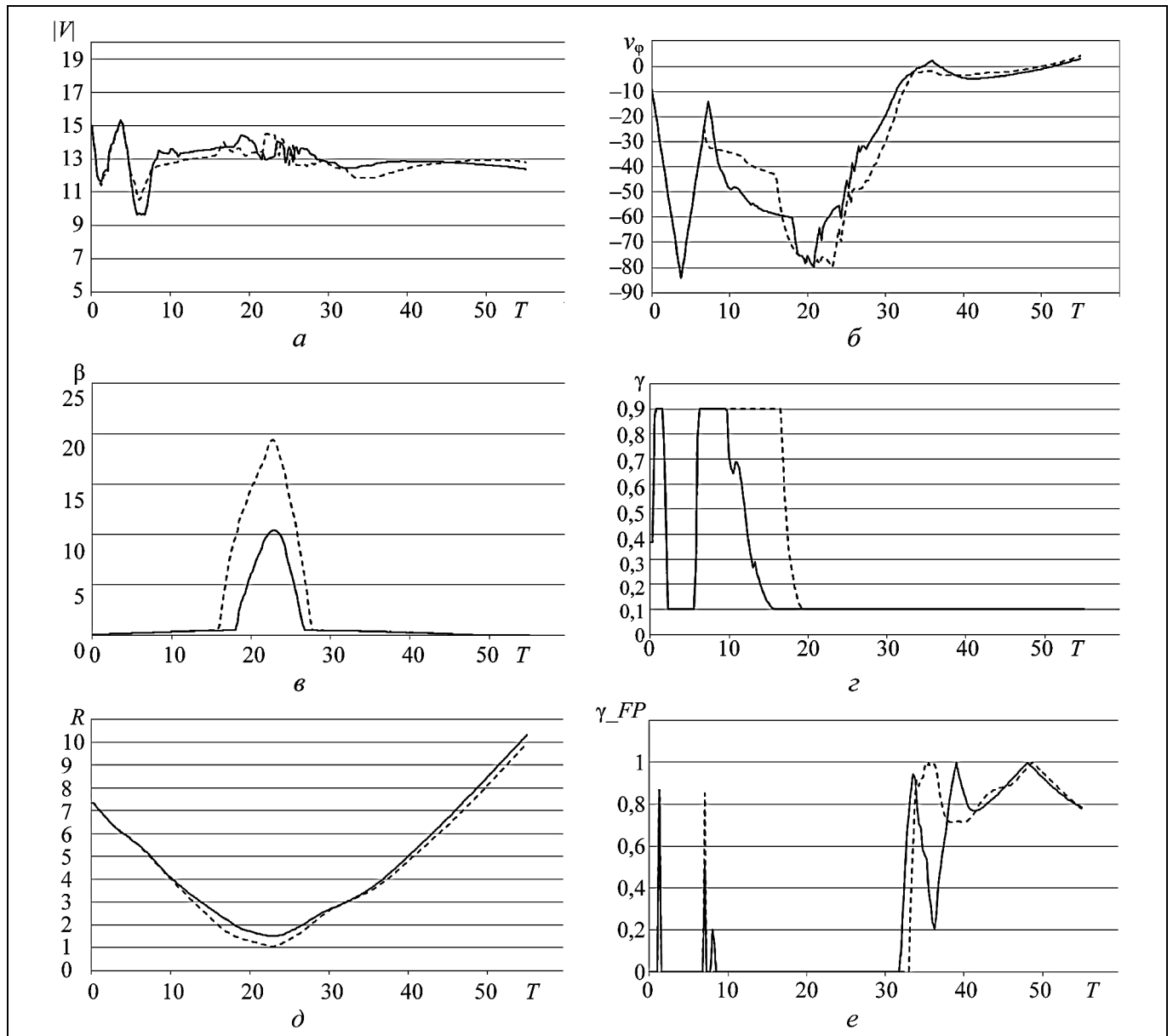


Рис. 3. Графики изменения показателей для одного БЛА в стае: a — модуль скорости; $б$ — скорость по направлению; $в$ — функция β ; $г$ — функция γ ; $д$ — расстояние до препятствия; $е$ — направление на целевую точку

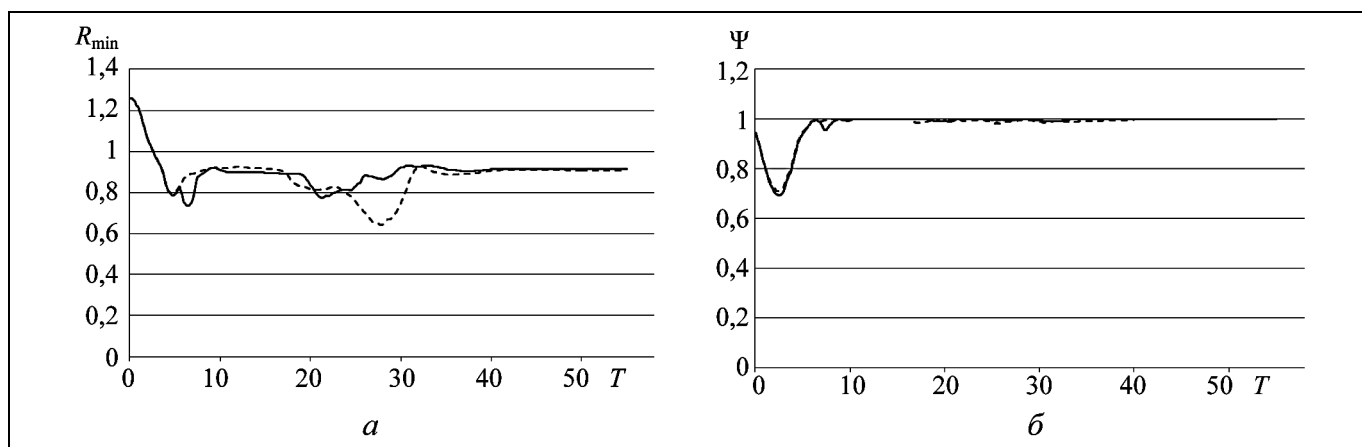


Рис. 4. Графики изменения минимального расстояния (а) между БЛА в стае и согласованности движения стаи (б) по направлению

Моделирование проводилось в относительных единицах измерения — экранных координатах, без пересчета в реальные физические величины, поэтому далее мы не будем указывать размерность. Шаг сетки равен 15. Характеристики БЛА: габариты (диаметр описанной окружности) — 15; максимальная скорость — 20; минимальная скорость — 5; максимальное ускорение по модулю — 4; максимальное угловое ускорение — $20^\circ/\text{с}^2$. Желаемое расстояние D между объектами в стае равно 30. Желаемая скорость стаи — 15. Желаемое (безопасное) расстояние D от БЛА до препятствия также равно 30. Диаметр зоны целевой точки равен 60.

Функция β_{ij} рассчитывается по линейной зависимости (1). Для расчета влияния БЛА друг на друга были выбраны такие параметры: $x_1 = 1,2$; $x_2 = 8$; $y_1 = 0,2$; $y_2 = 10$. Для расчета влияния препятствия на БЛА: $x_1 = 2$; $x_2 = 8$; $y_1 = 0,5$; $y_2 = 40,5$. Значение параметра $\gamma_{\min} = 0,1$. При учете влияния препятствия учитывалась только одна (ближайшая) точка, при этом желаемая скорость БЛА относительно препятствия равна желаемой скорости стаи. Желаемая скорость БЛА относительно целевой точки также равна желаемой скорости стаи.

При учете влияния препятствия были рассмотрены два случая: учет только ближайшей точки и учет трех ближайших точек. Анализ переходных процессов показал, что усредненное влияние препятствия при учете трех точек практически аналогично учету только одной ближайшей точки. Поэтому далее будут приведены сравнительные результаты при суммарном воздействии одной и трех точек препятствия без усреднения. Шаг по времени был выбран равным 0,25 с.

На рис. 2, а—е показаны результаты моделирования при учете одной точки препятствия.

Для сравнения траекторий на рис. 2, ж, з приведены результаты моделирования при учете трех

точек. Видно, что в этом случае наблюдается более прямолинейное движение к углу препятствия.

Для оценки поведения отдельного БЛА в стае и исследования работы алгоритма приняты показатели: скорость по модулю $|V|$ и направлению V_ϕ , ускорение по модулю W и угловое ω , значение функций β и γ в паре «БЛА — препятствие», расстояние до препятствия $R = |r_{ij}|/D$ и показатель γ_{FP} направления на целевую точку. Если БЛА движется мимо области вокруг целевой точки, то $\gamma_{FP} = 0$, если строго на целевую точку, то $\gamma_{FP} = 1$, а между целевой точкой и границей области строится линейная зависимость.

На рис. 3 показаны графики изменения этих показателей для одного из БЛА в стае, который был выбран из условия наибольшего приближения к препятствию. Штриховой график соответствует учету одной точки препятствия, сплошной — трем точкам. Видно, что в обоих случаях расстояние до препятствия $R > 1$ (см. рис. 3, д) и что при учете трех точек БЛА проходит дальше от препятствия.

Для оценки поведения стаи использовалось два параметра: минимальное расстояние между БЛА в стае $R_{\min} = \min(|r_{ij}|/D)$, $i \neq j$ (рис. 4, а) и согласованность движения стаи по направлению ψ (рис. 4, б):

$$\psi(t) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \frac{v_i(t)v_j(t)}{|v_i(t)||v_j(t)|},$$

где N — число БЛА в стае, $v_i(t)v_j(t)$ — скалярное произведение двух векторов скорости. В идеальном состоянии $\psi \approx 1$, в неупорядоченном состоянии $\psi \approx 0$.

Как и ранее, штриховой график соответствует учету одной точки препятствия, сплошной — трем точкам. На рис. 4, а видно, что во время миссии $R_{\min} > 0,6$ (в первом случае) и $R_{\min} > 0,75$ (во втором

случае), причем, в первом случае минимум достигается при обходе угла препятствия (см. рис. 2, в). Показатель же согласованности движения стаи достигает окрестности значения 1 (рис. 4, б) очень быстро и далее при маневрах практически не меняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод управления группой беспилотных летательных аппаратов (БЛА) основан на принципах стайной робототехники. При определении желаемого вектора скорости отдельного БЛА рассматривается влияние на него других объектов (БЛА, препятствия, целевой точки и др.). Важно, с нашей точки зрения, рассматривать влияние объекта на БЛА не как вектор силы, а как вектор желаемой скорости БЛА «с точки зрения» данного объекта. Преимущества такого подхода наиболее ярко проявляются в случае препятствий, особенно протяженных, когда рассматривается не просто сила отталкивания от препятствия, а учитывается необходимость обеспечить движение БЛА вдоль границы препятствия. Рассмотренный вариант описания препятствий в виде множества выпуклых многоугольников, построенных на узлах сетки, наложенной на область действия миссии, позволил не только избежать столкновений, но и обеспечить движение БЛА вдоль границы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Reynolds, C.W.* Flocks, Herds and Schools: a Distributed Behavioral Model // *Computer Graphics*. — 1987. — Vol. 21, No. 4. — P. 25–34.
2. *Olfati-Saber, R.* Flocking for multi-agent dynamics systems: algorithms and theory // *IEEE Trans. on Automatic Control*. — 2006. — Vol. 51, No. 3. — P. 401–420.

3. *Tanner, H.G., Jadbabaie, A., Pappas, G.J.* Flocking in Fixed and Switching Networks // *IEEE Trans. on Automatic Control*. — 2007. — Vol. 52, No. 5. — P. 863–868.
4. *Ghapani, S., Mei, J., Ren, W., Song Y.* Fully Distributed Flocking with a Moving Leader for Lagrange Networks with Parametric Uncertainties // *Automatica*. — 2016. — Vol. 67. — P. 67–76.
5. *Su, H.* Flocking in multi-agent systems with multiple virtual leaders based only on position measurements // *Communications in Theoretical Physics*. — 2012. — Vol. 57, No. 5. — P. 801–807.
6. *Dong, Y., Huang, J.* Flocking with connectivity preservation of multiple double integrator systems subject to external disturbances by a distributed control law // *Automatica*. — 2015. — Vol. 55 — P. 197–203.
7. *Wang, J., Zhao, H., Bi, Y., et al.* An improved fast flocking algorithm with obstacle avoidance for multiagent dynamic systems // *Journal of Applied Mathematics*. — 2014. — Vol. 2014. — Art. ID 659805. — P. 1–13. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/659805>.
8. *Rochefort, Y., Piet-Lahanier, H., Bertrand, S.* Guidance of Flocks of Vehicles Using Virtual Signposts // *Preprints of the 18th IFAC World Congress*. — 2011. — P. 5999–6004.
9. *Air Warfare.* OSD UAV Roadmap 2002–2027 // Office of the Secretary of Defense (Acquisition, Technology & Logistics), USA. — 2002.
10. *Virágh, C., Vásárhelyi, G., Tarcai, N., et al.* Flocking algorithm for autonomous flying robots // *Bioinspiration and Biomimetics*. — 2014. — Vol. 9, No. 2. — Art. No. 025012.
11. *Vásárhelyi, G., Virágh, C., Somorjai, G., et al.* Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots // *Intelligent Robots and Systems*. — 2014. — P. 3866–3873.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.В. Мещеряковым.

Ефремов Андрей Юрьевич — науч. сотрудник,
✉ e_andre@mail.ru,

Легович Юрий Сергеевич — канд. техн. наук,
вед. науч. сотрудник, ✉ legovichy@yandex.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

Поступила в редакцию 16.10.2018, после доработки 24.12.2018.
Принята к публикации 14.01.2019.

FLOCKING CONTROL OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES IN OBSTACLE FIELD

A.Yu. Efremov[#], Yu.S. Legovich

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

[#]✉ e_andre@mail.ru

Abstract. The motion control problem of UAVs flock moving through obstacle field towards a target point in quasi-two-dimensional space is considered. An approach is suggested, according to which the grid with cells of the selected size is imposed on the mission area while the obstacle is interpolated by the set of convex polygons constructed on the nodes of this grid. The algorithm for determining the desired speed of objects in a group based on the principles of flocking robotics is proposed. The results of the simulation modeling are presented.

Keywords: flocking robotics, unmanned aerial vehicle, obstacle avoidance, simulation modeling.



80 ЛЕТ ИНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ имени В.А. Трапезникова РАН

16 июня 2019 г. Институту проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук исполнилось 80 лет.

Созданный в 1939 году как Институт автоматики и телемеханики (в дальнейшем добавилась детализация — «технической кибернетики») АН СССР, Институт прошел долгий и насыщенный путь, добился ярких теоретических и прикладных результатов. В 1969 году он был переименован в Институт проблем управления (автоматики и телемеханики).

80 лет — немалый исторический промежуток. Наука об управлении за это время обогатилась новыми направлениями, продемонстрировала свое важное место в современном обществе. И тем более приятно осознавать, что история Института тесно связана с этими достижениями.

В Институте работали или работают: 14 академиков, 10 членов-корреспондентов, три Героя Социалистического Труда, 10 лауреатов Ленинской премии, 43 лауреата Государственной премии, 5 лауреатов Премии Совета Министров СССР, 16 заслуженных деятелей науки и техники. Сегодня в Институте работают около 1000 сотрудников, в том числе — более 120 докторов наук, более 250 кандидатов наук.

Поздравляем с юбилеем замечательный коллектив ИПУ РАН, который продолжает энергично и вдохновенно работать, храня и развивая славные традиции!

Редсовет, редколлегия и редакция
журнала «Проблемы управления»

* * *

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

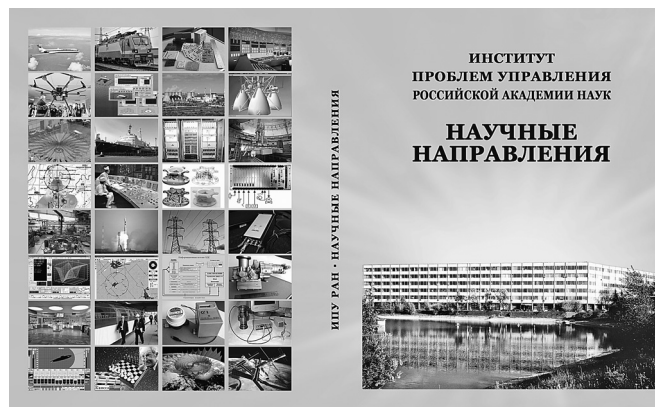
К своему 80-летию Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН подготовил ряд изданий (свободно доступных на сайте Института www.ipu.ru).

В книге **«ИПУ РАН: научные направления»** история Института описывается как история развития основных научных направлений теории управления:

- теория систем управления;
- управление подвижными объектами и навигация;
- технические средства управления;
- управление в промышленности, энергетике, транспорте и сельском хозяйстве;
- информационные технологии в управлении;
- управление системами междисциплинарной природы.

Каждое из направлений детализируется на ряд поднаправлений, со своими отцами-основателями и их научными школами. Книга большей частью

составлена из очерков, подготовленных сотрудниками Института, авторами или соавторами многих фундаментальных результатов, корифеями или их учениками. Завершает книгу краткое описание научно-организационной и прикладной деятельности Института.



За 80 лет учеными Института получены результаты мирового уровня (многие из которых названы их именами), развиты целые научные направления, созданы научные школы, основаны добрые традиции. Все это отражено в книге «ИПУ РАН: лаборатории».



В издании «ИПУ РАН: прикладные разработки» отражен опыт и (в большей степени) текущее состояние работ Института по приложениям теории управления в самых разных областях (авиации и космосе, управлении морскими подвижными объектами, энергетике, промышленности, экономике и др.).

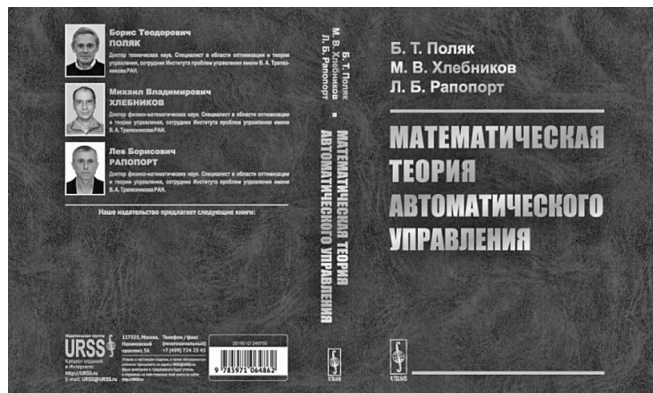


За последние годы в Институт пришло много молодежи, и эти «исторические» книги позволят новым сотрудникам узнать, как зарождались самые современные направления теории управления, ныне доверенные их попечению, как Институт живет в настоящее время, каковы его научные интересы и достижения.

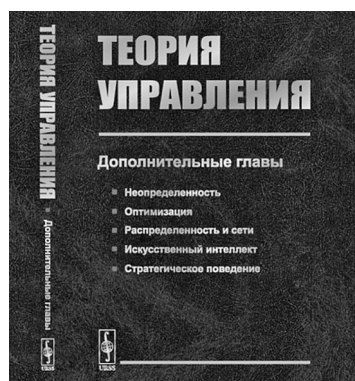
Ориентированы на молодежь и два учебных пособия.

В учебном пособии «Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления. — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 504 с.» излагаются основы теории управления в современной форме. Помимо традиционных разделов теории линейных систем в книгу включены

вопросы управления в условиях неопределенности (робастность, внешние возмущения), управления нелинейными системами (абсолютная устойчивость, теоремы Ляпунова, хаос), техника линейных матричных неравенств. В приложениях содержится требуемый математический аппарат. Многочисленные примеры демонстрируют особенности применения теории.



Учебное пособие «Теория управления (дополнительные главы) / под ред. Д.А. Новикова. — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 552 с.» представляет собой «навигатор» по таким направлениям математической теории управления, как: неопределенность в системах управления (стохастические и адаптивные системы, идентификация, управление с итеративным обучением); оптимизация (в задачах большой размерности; распределенная, невыпуклая) и управление; системы с распределенными параметрами, многоагентные и сетевые системы управления; интеллектуальное управление (системы с переключениями, нечеткие системы, искусственные нейронные сети); стратегическое поведение в системах управления, описываемое аппаратом дифференциальных, кооперативных, иерархических или рефлексивных игр. Его целью является расширить кругозор студентам магистратуры и аспирантам математических и технических специальностей, уже освоившим теорию автоматического управления по классическим учебникам, т. е. дать им общее представление о многообразии задач и направлений современной теории управления.





XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

В декабре 2018 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН состоялась XXVI международная научная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Работа конференции велась по следующим секциям:

- общетеоретические и методологические вопросы обеспечения безопасности;
- проблемы обеспечения экономической и социально-политической безопасности;
- проблемы обеспечения информационной безопасности;
- экологическая и техногенная безопасность;
- методы моделирования и принятия решений при управлении безопасностью сложных систем;
- автоматизированные системы и средства обеспечения безопасности сложных систем;
- правовые вопросы обеспечения безопасности сложных систем.

На конференции было представлено 83 доклада, подготовленных 126 авторами из 40 организаций Российской Федерации и ряда зарубежных стран.

Вот уже более 25 лет конференция традиционно проводится в последний месяц уходящего года. Вследствие этого представленные работы, с одной стороны, подводят определенный итог научно-исследовательской деятельности в различных предметных областях и по различным тематическим направлениям в рамках проблематики обеспечения безопасности, с другой — отражают происходящие в стране, обществе и мире существенные изменения и возникающие в связи с этим новые актуальные задачи, требующие поиска эффективных решений. В этом плане XXVI Международная научная конференция не является исключением.

Ряд интересных работ был посвящен поиску путей решения системообразующих, стратегических и крупных методологических проблем управления социально-экономическим развитием России, обеспечением ее национальной, экономической, энергетической, информационной и т. д. безопасности в условиях интенсификации жесткой антироссийской политики стран Запада.

Лейтмотивом открывшего конференцию доклада *Т.С. Ахромеевой, Г.Г. Малинецкого, В.В. Кульбы, В.В. Иванова, С.А. Посашкова, С.А. Торопыгиной* «Управление стратегическими рисками энергетического комплекса» явилось утверждение о том, что в условиях существования целого ряда глобальных экономических и политических проблем в настоящее время назрела необходимость принятия принципиальных стратегических решений в области управления социально-экономическим развитием России.

Проведенный авторами анализ проблем обеспечения природными и энергетическими ресурсами процессов цивилизационного развития человеческого общества на различных исторических этапах приводит в принципе к бесспорному выводу о необходимости расширения горизонта планирования, в том числе и в рамках концепции устойчивого развития. Одновременно с этим авторы подчеркивают опасность неверной оценки или недооценки многих реально существующих объективных угроз поступательному социально-экономическому развитию нашего государства и общества. По мнению авторов доклада, в настоящее время ключевую роль в мировой экономике играют добыча энергетических ресурсов и твердых полезных ископаемых. В докладе отмечается, что за последние пятьдесят лет потребление энергетических ресурсов (и в первую очередь — нефти) выросло в десять раз при росте населения всего в два с половиной раза. При этом в последние десятилетия неуклонно снижается эффективность добычи энергоресурсов, одним из базовых параметров оценки которой является так называемый параметр энергетической рентабельности EROI (energy return on (energy) invested — *англ.*), представляющий собой отношение энергии полученной к энергии, затраченной на ее добычу (производство). В частности, как подчеркивается в докладе, если в 1990 г. параметр EROI составлял от 18:1 до 10:1 (для различных нефтяных месторождений), то сегодня он стремится к значению 4:1, что приближается к пределу рентабельности добычи энергоресурсов данного вида.

В докладе достаточно подробно рассмотрена взаимосвязь геополитики углеводородов (терминология авторов) и мировых войн. Проведен анализ различных подходов и технологий прогнозирования тенденций мирового социально-экономического и цивилизационного развития, а также международных политических процессов. В рамках проблематики экономического развития России и преодоления отставания от стран-лидеров в докладе обосновывается необходимость решения неотложных задач «новой индустриализации» нашей страны и роботизации ее промышленности. По мнению авторов, именно данное направление фактически «выпало» из государственной программы развития цифровой экономики РФ.

В целом следует согласиться с утверждением авторов о том, что сегодня, как никогда ранее, резко возрастает роль стратегического долгосрочного планирования в процессе управления социально-экономическим развитием Российской Федерации. К сделанным в докладе выводам можно лишь добавить, что в современных условиях возрастает и значимость целеполагания как одного из наиболее важных, сложных, крайне трудоемких и ответственных процессов организационного управления. Неверное или недостаточно четкое определение стратегических целей управления государственным развитием приводит к весьма серьезным, а иногда — катастрофическим последствиям. Кроме того, только обоснованная система долгосрочных целей принципиально позволяет формировать объективные критерии эффективности государственного управления на различных уровнях и временных горизонтах, а также измерять качество и результативность управления на различных этапах, т. е. оценивать, насколько полученные результаты обеспечивают развитие общества и государства в необходимом направлении и соответствуют национальным приоритетам.

Критическому анализу современных проблем развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) нашей страны посвящен доклад *Т.Х. Усмановой, Д.А. Исакова* «Новая парадигма развития системы электроэнергетики России в условиях интеграции в мировое хозяйство». Как отмечается в докладе, темпы развития и эффективность функционирования ТЭК оказывают определяющее влияние на развитие экономики России и в силу этого требуют к себе повышенного внимания органов исполнительной и законодательной власти. Анализ существующих тенденций возрастания энергопотребления по видам экономической деятельности за последние 2—3 года показывает, что существующее развитие ТЭК на основе старой парадигмы развития системы электроэнергетики тормозится ее непроработанностью с учетом сов-

ременных реалий. Помехой выступает и несовершенство системы регулирования экономического развития страны, а также неэффективная тарифная политика в целом. Требуют решения и проблемы интеграции экономики в мировое хозяйство и, в частности, в ЕврАзЭС, важнейшим элементом которого является формирование единой электроэнергетической сети. Одновременно с этим, как отмечается в докладе, данные процессы интеграции происходят под большим внешним давлением, сопровождаемым конфликтами интересов и попытками притеснения российских корпораций и холдингов. Это, как подчеркивают авторы, требует коренного совершенствования стратегии, подходов и методов управления развитием ТЭК.

Проблемам повышения эффективности технологического развития реального сектора российской экономики посвящен доклад *Н.И. Комкова, А.В. Лазарева, М.В. Чекадановой* «Адаптационный механизм управления разработкой и созданием высокотехнологичной продукции». В работе основное внимание уделено анализу условий и факторов, тормозящих на современном этапе ускоренное развитие высокотехнологичных отраслей и передовых производственных технологий (ППТ). Как отмечают авторы доклада, в настоящее время доля отечественных инновационных технологий на мировых рынках составляет всего 1 %, а доля ВВП России в мировом объеме едва превышает 2 %. Сложившееся положение во многом определяется результатами крайне неэффективной экономической политики конца 1990-х гг., в рамках которой необходимость роста доли высокотехнологичной продукции рассматривалась лишь как возможность увеличения доходов от ее экспорта с целью компенсации ожидавшихся ограничений доходов от экспорта природных ресурсов. Намечившееся же отставание отечественного научно-технологического потенциала в указанный период предполагалось компенсировать за счет импорта готовой продукции. Как следствие, стабильно низкое финансирование российской науки в 1990-х гг., а также приоритетная поддержка ресурсно-экспортной ориентации отечественной экономики и другие меры фактически привели к банкротству и утрате потенциала ряда высокотехнологичных предприятий в области станкостроения, электронного машиностроения и радиоэлектронной промышленности, формировавших отечественный рынок продукции технологий высоких переделов.

Отношение к необходимости стимулирования производства высокотехнологичной продукции стало меняться с начала 2000-х гг., когда стали постепенно, но целенаправленно прорабатываться комплексы организационно-экономических мер поддержки как ориентированных на интересы



ВПК высокотехнологичных отраслей, так и гражданских высокотехнологичных производств в форме особых экономических зон, кластерных образований, венчурных структур и др. Одновременно с этим в докладе подчеркивается, что объемы создаваемых ППТ сегодня растут незначительно, а ожидание прорывных успехов в данной области постоянно откладывается, что свидетельствует о необходимости пересмотра сложившихся подходов к управлению разработкой и созданием высоких технологий. Тем не менее, несмотря на отсутствие значительных позитивных достижений, в отдельных отраслях обозначились локальные успехи (медицинское оборудование, электроника, арктические технологии судостроения, станкостроение, фармацевтика и др.), во многом достигнутые благодаря совмещению созданных организационных форм поддержки (кластеры, особые экономические зоны и др.) и применению современных методов программно-целевого управления.

Резюмируя результаты проведенного анализа, авторы доклада выделяют наиболее существенные с их точки зрения особенности процессов исследований и разработки высоких технологий, к числу которых относятся: целенаправленное восстановление потенциала базовых звеньев инновационного цикла (включая фундаментальные и теоретико-прикладные исследования, практические разработки, инжиниринговые услуги, а также создание условий для развития отечественных предприятий и компаний); оценка потенциала конкурентоспособности новых технологий; повышение эффективности управления реализацией соответствующих целевых проектов и программ; усиление контроля результативности целевых программ, эффективности расходования выделенных средств, а также внедрения полученных результатов в производство.

Несомненный интерес в рамках рассматриваемой тематики представляют также работы, посвященные достаточно широкому комплексу методологических и прикладных проблем управления социально-экономическим развитием нашей страны, ее регионов и отдельных экономических субъектов, среди которых можно выделить доклады: *С.И. Неизвестного* «Проблемы социальной и информационной безопасности проекта «Цифровая экономика»»; *Ю.Н. Кусакиной* «О технологической безопасности России на примере титановой отрасли»; *В.В. Карпова, А.П. Бочкарева* «Применение методологии IDEF0 для построения функциональной модели деятельности центра управления кризисными ситуациями»; *Г.А. Касабова, В.И. Жекова* «Экономическая дискуссия на тему «Закон рынков Сея»»; *Г.В. Гореловой, А.А. Саак* «Имитационное моделирование социальной безо-

пасности молодежи»; *Ю.В. Косачева* «Стратегия эффективной деятельности интегрированной структуры, участвующей в экономическом развитии региона»; *В.В. Быстрова, А.В. Маслобоева* «Проектный подход в управлении социально-экономической безопасностью региона»; *Р.Е. Торгашева* «К вопросу аналитического обеспечения управления городами при использовании smart-технологий»; *А.Ю. Гориславца* «Современные аспекты нормативно-правового регулирования деятельности хозяйствующих субъектов в Российской Федерации как фактор обеспечения экономической безопасности государства».

Одна из отличительных особенностей настоящей конференции заключается в достаточно большом числе интересных работ, посвященных анализу и поиску путей решения широкого круга проблем обеспечения безопасности и защиты национальных интересов России в условиях острого геополитического противоборства на международной арене и неизбежно возникающих вследствие этого конфликтных ситуаций различных уровней.

Работа *В.В. Цыганова* «Пределы роста и глобальная финансовая олигархия» посвящена проблемам перемещения Глобального центра капитала (ГЦК), создаваемого международной финансовой олигархией (группой семейных кланов) с целью обеспечения полного контроля над мировой финансовой системой и правящими элитами многих стран и размещаемого в избранном государстве. Для своего удобства, олигархия создает в стране пребывания ГЦК наилучшие условия для замены традиционных ценностей монетарными, формируя общество потребления. Однако, как отмечается в докладе, достижение пределов экономического роста и связанного с ним потребления приводит к гражданскому недовольству и, как следствие, социально-политической нестабильности в стране пребывания ГЦК.

Отмечая, что в настоящее время пребывание ГЦК в США становится все менее комфортным для финансовой олигархии в силу известных внутренних противоречий и дестабилизирующих внутриполитических процессов, а также возрастающей многополярности мира, не позволяющей Соединенным Штатам диктовать свою волю всем и вся, автор работы детально анализирует возможные альтернативы перемещения ГЦК и его возможные последствия. Одновременно с этим, как подчеркивается в докладе, многополярность мира, появление таких глобальных лидеров, как Россия и Китай, а также страх американских элит перед неизбежными потерями от объективно развивающихся мировых процессов заставляет их противодействовать им, в том числе путем подавления соперников. Именно подобные процессы, по мнению

автора, сегодня представляют наибольшую опасность как для отдельных стран, так и мирового сообщества в целом и требуют усиленного внимания, глубокого анализа и комплексного исследования.

Доклад *Т.И. Чилачавы и Г.Р. Почхуа* «О возможности разрешения конфликта посредством экономического сотрудничества» посвящен рассмотрению одного из подходов к моделированию процессов разрешения конфликтных ситуаций, в рамках которого авторами разработана нелинейная математическая модель потенциально конфликтогенного взаимодействия двух политически противоборствующих сторон, в качестве которых могут выступать государства или иные субъекты международного права. Основная задача, решаемая с помощью разработанной модели, состоит в поиске путей компромиссного разрешения возникающих конфликтных ситуаций благодаря организации взаимовыгодного экономического или иного типа сотрудничества между сторонами в целях сближения их позиций и мирного разрешения возникшего конфликта. В модели предполагается, что процесс экономического сотрудничества свободен от внешнего политического давления и зависит от предпочтений гражданского общества сторон конфликта. Для случая зависимости между постоянными коэффициентами модели найдено точное аналитическое решение, позволяющее определить условия, при которых экономическое сотрудничество сможет мирно разрешить политический конфликт.

Проблемам защиты национальных интересов нашей страны в условиях геополитического противоборства посвящен целый ряд интересных работ, среди которых можно выделить доклады: *С.А. Тюрин* «О стратегическом соперничестве в киберпространстве: «Cyber Strategy — 2018»»; *Н.Г. Кереселидзе* «Обобщенная дискретная модель информационной войны с ограничениями и задача ее управляемости»; *С.В. Коврига* «Общие подходы и методы анализа и прогнозирования военно-политической обстановки»; *А.Н. Райков* «Стратегическое совещание с применением экспертных процедур и когнитивного моделирования для повышения качества показателей в системах обеспечения безопасности»; *Г.В. Горелова, А.Н. Кузьминов, А.И. Калинин* «Имитация конкуренции и конфронтации систем, когнитивное моделирование»; *С.А. Косяченко, Л.В. Богатырева* «К проблеме использования сценарного подхода в стратегическом сдерживании»; *Д.А. Кононов* «Правовая система обеспечения государственной безопасности: методология исследования»; *З.К. Авдеева, С.В. Коврига* «Анализ согласованности интересов активных субъектов социально-политической ситуа-

ции на модели причинно-следственных влияний»; *Н.И. Плотников* «Социально-политический портрет авиатерроризма».

Традиционно большая группа докладов посвящена решению проблем управления информационной безопасностью и защитой данных от несанкционированного доступа: *А.В. Рожнов* «Контрфактическое моделирование новых вызовов посткибератак посредством пертинентной обработки сверхбольших массивов данных и их визуализации»; *Е.А. Курако, В.Л. Орлов* «Организация защиты информации в системах, использующих сервис-браузеры»; *В.В. Муромцев, А.В. Муромцева* «Информационная безопасность в условиях виртуализации инструментов управления»; *А.Д. Козлов, Н.Л. Нога* «Влияние субъективных факторов на безопасность сложных систем»; *В.О. Сиротюк* «Разработка и реализация политики информационной безопасности организаций»; *Е.В. Аникина* «Мониторинг информационной безопасности узлов гетерогенной сети на основе метода эффективного распределения сканеров»; *Е.А. Сакрутина* «К вопросу оценки рискового потенциала значимых объектов критической информационной инфраструктуры»; *С.К. Сомов* «Обеспечение безопасности и производительности распределенных систем методами репликации массивов данных»; *Р.Э. Асратян* «Защита информационных запросов в распределенных системах на основе синтаксиса криптографических сообщений (CMS)»; *А.А. Сиротский* «Измеримые критериальные методы оценки состояния информационной безопасности объектов информатизации в непрерывных управленческих процессах»; *А.А. Мелихов* «Разработка методики формирования стеганоконтейнеров на основе морфологической структуры предложений естественного языка».

Работы, посвященные проблемам обеспечения безопасности и надежности функционирования технологических комплексов и систем можно с определенной степенью условности разделить на две группы: доклады, в которых основное внимание уделяется поиску путей решения широкого круга методологических проблем обеспечения безопасности на объектовом уровне, и работы, посвященные анализу безопасности транспортных систем и их инфраструктуры, включая космическую отрасль.

В первой тематической группе представленных докладов можно выделить работы: *Б.А. Мавлянкариев, Б.Б. Хатамов, А.Ю. Пен, И.Р. Талибджанов* «Системная интеграция этапов жизненного цикла технической системы как инновационный ресурс ее эффективного применения»; *В.В. Гучук* «Вопросы применения технологии упреждающей критериальной адаптации для мониторинга и управле-



ния сложными системами»; *Л.А. Сорокин* «Модель информационно-аналитической поддержки управления безопасностью на основе анализа и синтеза состояний объектов управления»; *В.К. Мусаев* «Моделирование безопасности по несущей способности плотины Койна (Индия) с основанием в виде полуплоскости при нестационарном переходном процессе»; *О.Б. Скворцов* «Вибрационная безопасность больших энергетических агрегатов»; *В.С. Маций, Д.И. Кацко* «Геотехническая безопасность и субъективная оценка факторов оползневого риска»; *В.В. Пицык, Л.В. Суховерхова* «Обоснование информационных свойств извещателей в системах пожарной сигнализации»; *О.М. Прошина* «Моделирование системы обеспечения пожарной безопасности образовательного комплекса».

Проблемам обеспечения безопасности транспортных систем и объектов посвящены работы *В.П. Иванова, Е.Б. Кабловой, Л.Г. Кленовой, И.В. Фомичева* «Информационно-аналитическое обеспечение терминальных систем СУРТ и ПГСП для повышения безопасности жидкостных средств выведения»; *В.К. Завадского, Н.Н. Стаменковича* «Обеспечение устойчивой работы маршевых ЖРД большой мощности перспективных ракет-носителей с широким диапазоном регулирования тяги»; *Д.В. Морозова* «Алгоритм повышения надежности функционирования системы управления беспилотным летательным аппаратом»; *Н.И. Плотникова* «Проблемы идентификации предмета безопасности авиации»; *Л.А. Баранова, Л.Н. Логиновой* «Моделирование сложных транспортных систем для обеспечения безопасности движения»; *А.И. Сафронова* «Составляющие автоматизации построения плановых графиков движения поездов метрополитена, нацеленные на обеспечение безопасности перевозки пассажиров»; *В.Г. Сидоренко, М.А. Ку-*

лагина «Прогнозирование совершения нарушения безопасности движения по вине локомотивной бригады с использованием современных методов машинного обучения»; *М.А. Людаговской* «Концепция разработки многоуровневой интеллектуальной системы информационной безопасности на железнодорожном транспорте».

К сожалению, объективные ограничения на объем данной публикации не позволяют сделать полноценный обзор и тем более раскрыть содержание всех представленных на конференции разнообразных по тематике и, безусловно, интересных докладов. Подробно ознакомиться с представленными работами можно в опубликованных материалах конференции¹.

В заключительном слове председательствующий на конференции д-р техн. наук, профессор *В.В. Кульба* сообщил о планах проведения XXVII конференции по рассматриваемой тематике, которая, по сложившейся традиции, пройдет в декабре 2019 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Телефон оргкомитета (495) 334-89-59, e-mail: conf20@ipu.ru. Технический секретарь конференции — *Алла Фариссовна Ибрагимова*.

Ученый секретарь Оргкомитета конференции
А.Б. Шелков

Шелков Алексей Борисович — канд. техн. наук,
✉ abshelkov@gmail.com

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

¹ Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXVI Международной конференции, 19 дек. 2018 г., Москва / под общ. ред. А.О. Калашникова, В.В. Кульбы. — М.: ИПУ РАН. — 2018. — 411 с.

XXVI INTERNATIONAL CONFERENCE «THE PROBLEMS OF COMPLEX SYSTEMS SECURITY CONTROL»

A.B. Shelkov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
✉ abshelkov@gmail.com

Abstract. Scientific results of participants of the conference are presented. The thematic directions (sections) of the conference were theoretical and methodological questions of security support, problems of economic and sociopolitical security support, problems of information security support, ecological and technogenic security, methods of modelling and decision making of complex systems security control, automatic systems and instruments of complex systems security support, legal aspects of complex systems security support.

Keywords: conference, complex systems, security control.



**Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
осуществляет подготовку (по очной и заочной форме)
научных кадров в аспирантуре**

Направление подготовки: 01.06.01 — «Математика и механика»

Специальность:

- 01.01.02 — Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление.

Направление 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.

Направление подготовки: 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.

Сроки обучения. В очной форме аспирантуры — 4 года (по направлению подготовки 38.06.01 — 3 года); В заочной форме аспирантуры — 5 лет (по направлению подготовки 38.06.01 — 4 года).

Прием в аспирантуру. Все поступающие в аспирантуру проходят предварительное собеседование с предполагаемым научным руководителем. Результаты собеседования учитываются при решении вопроса о допуске поступающего к вступительным экзаменам.

Прием вступительных испытаний в аспирантуру проводится в конце августа — сентябре.

Прием заявлений и документов в аспирантуру — с 25 июня по 1 августа. Зачисление в аспирантуру до 1 октября. Документы и заявления подаются в Отдел докторантуры и аспирантуры ИПУ РАН. Вступительные экзамены по специальной дисциплине и иностранному языку проводятся до середины сентября. Вступительные экзамены могут быть проведены на русском и иностранных языках.

В Институте читаются лекции для аспирантов по следующим программам:

- «Эконометрический анализ экономического развития» — д-р экон. наук, профессор Нижегородцев Р.М.;
- «Теория автоматического управления» — д-р техн. наук, профессор С.А. Краснова;
- «Теория робастного управления» — д-р техн. наук, профессор А.П. Курдюков;
- «Теория многоагентных систем» — д-р техн. наук, профессор Р.П. Агаев;
- «Идентификация систем управления» — канд. техн. наук Макаров В.В.;
- «Методы дискретной оптимизации и управление проектами» — д-р физ.-мат. наук, профессор РАН М.В. Губко;
- «Управление и искусственный интеллект» — канд. техн. наук А.В. Макаренко;
- «Технологические основы управления производством продукции на промышленных предприятиях» — д-р техн. наук, профессор А.Л. Генкин;
- «Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети» — д-р техн. наук, профессор В.М. Вишневыский;
- «Системы автоматизации проектирование» — д-р техн. наук, профессор А.В. Толок.

