

ISSN 1819-3161

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6/2021

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,  
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,  
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,  
В. М. Вишнеvский, д-р техн. наук,  
В. В. Клочков, д-р экон. наук,  
С. А. Краснова, д-р техн. наук,  
Н. В. Кузнецов, д-р физ.-мат. 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,  
Н. Е. Максимова, канд. техн. наук  
(ответственный секретарь),  
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 физ.-мат. наук,  
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,  
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,  
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,  
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,  
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,  
д-р техн. наук,  
Самара – М. И. Гераськин, д-р экон. наук,  
Саратов – В. А. Твердохлебов, д-р техн. наук,  
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук

## ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, Academician of RAS<sup>1</sup>,  
I. A. Kalyaev, Academician of RAS,  
V. A. Levin, Academician of RAS,  
N. A. Makhutov, Corr. Member of RAS,  
A. F. Rezchikov, Corr. Member of RAS,  
S. N. Vassilyev, Academician of RAS

## EDITORIAL BOARD

V. N. Afanas'ev, Dr. Sci. (Tech.),  
F. T. Aleskerov, Dr. Sci. (Tech.),  
N. N. Bakhtadze, Dr. Sci. (Tech.),  
V. N. Burkov, Dr. Sci. (Tech.),  
P. Yu. Chebotarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
V. V. Klochkov, Dr. Sci. (Econ.),  
M. V. Khlebnikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
S. A. Krasnova, Dr. Sci. (Tech.),  
V. V. Kulba, Dr. Sci. (Tech.),  
A. G. Kushner, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
N. V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
O. P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Tech.),  
A. A. Lazarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
V. G. Lebedev, Dr. Sci. (Tech.),  
V. E. Lepskiy, Dr. Sci. (Phych.),  
N. E. Maximova, Cand. Sci. (Tech),  
Executive Editor-in-Chief,  
A. S. Mandel, Dr. Sci. (Tech.),  
R. V. Meshcheryakov, Dr. Sci. (Tech.),  
A. I. Michalski, Dr. Sci. (Biol.),  
D. A. Novikov, Corr. Member of RAS,  
Editor-in-Chief,  
F. F. Pashchenko, Dr. Sci. (Tech.),  
Deputy Editor-in-Chief,  
B. V. Pavlov, Dr. Sci. (Tech.),  
L. B. Rapoport, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
S. V. Ratner, Dr. Sci. (Econ.),  
E. Ya. Rubinovich, Dr. Sci. (Tech.),  
V. Yu. Rutkovskii, Dr. Sci. (Tech.),  
A. D. Tsvirkun, Dr. Sci. (Tech.),  
V. M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Tech.),  
I. B. Yadykin, Dr. Sci. (Tech)

## LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Kursk – S. G. Emelyanov, Dr. Sci. (Tech.),  
Lipetsk – A. K. Pogodaev, Dr. Sci. (Tech.),  
Perm – V. Yu. Stolbov, Dr. Sci. (Tech.),  
Rostov-on-Don – G. A. Ougolnitsky,  
Dr. Sci. (Tech.),  
Samara – M. I. Geraskin, Dr. Sci. (Econ.),  
Saratov – V. A. Tverdokhlebov, Dr. Sci. (Tech.),  
Ufa – B. G. Ilyasov, Dr. Sci. (Tech.),  
Vladivostok – O. V. Abramov, Dr. Sci. (Tech.),  
Volgograd – A. A. Voronin, Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
Voronezh – S. A. Barkalov, Dr. Sci. (Tech.)

<sup>1</sup>Russian Academy of Sciences.



**CONTROL SCIENCES**  
Научно-технический  
журнал

6 номеров в год  
ISSN 1819-3161 (Print)  
ISSN 2712-8687 (Online)  
Издается с 2003 года

**УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ**

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

Главный редактор  
чл.-корр. РАН  
Д.А. Новиков

Заместитель главного редактора  
Ф.Ф. Пащенко

Ответственный секретарь  
Н.Е. Максимова

Выпускающий редактор  
Л.В. Петракова

Адрес редакции  
117997, ГСП-7, Москва,  
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410

Тел./факс (495) 198-17-20, доб. 1410

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: <http://pu.mtas.ru>  
<http://controlsciences.org>

Опубликовано: 24 декабря 2021 г.

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.  
выдано Министерством Российской  
Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых  
коммуникаций

Свидетельство о регистрации  
Эл № ФС 77-80482 от 17 февраля 2021 г.  
выдано Федеральной службой  
по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и  
массовых коммуникаций

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](http://www.elibrary.ru)) доступны  
полные тексты статей.

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

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## 6.2021

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Обзоры

Лепский А.Е. Анализ противоречивости информации в теории функций доверия Ч. 2. Внутренний конфликт ..... 3

#### Управление в социально-экономических системах

Богомолов А.С., Дворяшина М.М., Дранко О.И. и др.  
Стресс-тестирование нефинансовых организаций: подход к обратной задаче на основе аналитического решения ..... 15

Гусев В.Б. Экстремальные характеристики модели технологического ядра крупномасштабной экономической системы ..... 30

#### Информационные технологии в управлении

Стецюра Г.Г., Мосин О.В. Автономная коллективная корректировка движения автотранспорта на трассе ..... 40

#### Управление техническими системами и технологическими процессами

Гребенюк Г.Г., Никишов С.М., Серeda Л.А.  
Анализ уязвимости сложных сетевых инфраструктур с применением генетического алгоритма ..... 52

#### Хроника

Двадцатая международная конференция по технологиям, культуре и международной стабильности Международной федерации по автоматическому управлению TECIS'2021 ..... 60

24-я международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN-2021 ..... 70

Четырнадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2021 ..... 74



**CONTROL SCIENCES**  
Scientific Technical  
Journal

6 issues per year

ISSN 1819-3161 (Print)

ISSN 2712-8687 (Online)

Published since 2003

FOUNDER and PUBLISHER

V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences  
of Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

D.A. Novikov, Corr. Member of RAS

Deputy Editor-in-Chief

F.F. Pashchenko

Executive Editor-in-Chief

N.E. Maximova

Editor

L.V. Petrakova

Editorial address

65 Profsoyuznaya st., office 410,  
Moscow 117997, Russia

+7(495) 198-17-20, ext. 1410

✉ pu@ipu.ru

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

Published: December 24, 2021

Registration certificate of  
ПИ № ФС 77-49203 of 30 March 2012  
issued by the Ministry of Press,  
Broadcasting, and Mass Media  
of the Russian Federation

Registration certificate of  
Эл № ФС 77-80482 of 17 February 2021  
issued by the Federal Service  
for Supervision of Communications,  
Information Technology, and Mass Media

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

On the website of the Scientific electronic  
library ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) full texts of  
articles are available

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

# CONTROL SCIENCES

## 6.2021

### CONTENTS

---

#### Surveys

---

**Lepskiy, A.E.** Analysis of Information Inconsistency  
in Belief Function Theory. Part II: Internal Conflict . . . . . 3

---

#### Control in Social and Economic Systems

---

**Bogomolov, A.S., Dvoryashina, M.M., Dranko, O.I., et al.**  
Stress Testing of Non-financial Organizations:  
An Analytical Approach to Solving the Reverse Problem . . . . . 15

**Gusev, V.B.** The Technological Core Model of a Large-Scale  
Economic System: Optimal Characteristics . . . . . 30

---

#### Information Technology in Control

---

**Stetsyura, G.G. and Mosin, O.V.** Autonomous Collective  
Adjustment of Vehicles Motion on a Highway . . . . . 40

---

#### Control of Complex Technological Processes and Production

---

**Grebenyuk, G.G., Nikishov, S.M., and Sereda, L.A.**  
Vulnerability Analysis of Complex Network Infrastructures  
Using a Genetic Algorithm . . . . . 52

---

#### Chronicle

---

**20th IFAC Conference on Technology, Culture and International  
Stability (TECIS'2021)** . . . . . 60

**24th International Conference on Distributed Computer  
and Communication Networks: Control, Computation,  
Communications (DCCN-2021)** . . . . . 70

**14th International Conference on Management  
of Large-Scale System Development (MLSD'2021)** . . . . . 74

# АНАЛИЗ ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ИНФОРМАЦИИ В ТЕОРИИ ФУНКЦИЙ ДОВЕРИЯ. Ч. 2. ВНУТРЕННИЙ КОНФЛИКТ<sup>1</sup>

А.Е. Лепский

**Аннотация.** Во второй части обзора рассматривается понятие меры внутреннего конфликта тела свидетельств в рамках теории функций доверия (теории свидетельств Демпстера – Шейфера). Рассматривается понятие неконфликтных фокальных элементов одного тела свидетельств, а также требования, предъявляемые к мерам внутреннего конфликта. Обсуждается некоторая аксиоматика меры внутреннего конфликта, основанная на усилении желательных свойств. Анализируются результаты об общем виде меры внутреннего конфликта, удовлетворяющей этой системе аксиом. Рассматриваются различные способы оценивания внутреннего конфликта: энтропийный подход; методы, основанные на вычислении автоконфликтности и максимизации контурной функции; метрический подход. Подробно рассмотрен декомпозиционный подход, предполагающий, что источник информации, который формирует тело свидетельств с большим внутренним конфликтом, мог быть неоднородным. Материал статьи проиллюстрирован большим количеством примеров.

**Ключевые слова:** теория функций доверия, правила комбинирования, конфликтность фокальных элементов, мера внутреннего конфликта.

## ВВЕДЕНИЕ

Данная статья является непосредственным продолжением аналитического обзора [1], в котором рассматривались основные методы анализа противоречивости информации между телами свидетельств в теории функций доверия (теории свидетельств Демпстера – Шейфера). Но противоречивой может быть и информация, предоставляемая одним телом свидетельств. В этом случае говорят о внутреннем конфликте. В качестве примера свидетельства, в котором наблюдается большой внутренний конфликт, можно привести следующее: стоимость акций компании завтра будет в промежутке  $[0,10]$  или в промежутке  $[30,35]$  с равными весами.

Различные понятия, описывающие внутренние противоречия самих тел свидетельств (или функций доверия, им соответствующих), обсуждались

в ряде работ 80–90-х годов XX в. Но идея разграничения понятий внешнего и внутреннего конфликтов свидетельств восходит к работам [2, 3].

Настоящий обзор посвящен анализу аксиоматики и основных методов оценивания внутреннего конфликта тела свидетельств. Основная часть статьи имеет следующую структуру. В § 1 вводятся основные определения и обозначения, приводятся базовые сведения из теории функций доверия. При этом более подробная вводная информация представлена в первой части обзора [1]. В § 2 обсуждаются понятия неконфликтных фокальных элементов, а также требования, предъявляемые к мерам внутреннего конфликта. В § 3 приводятся результаты, касающиеся общего вида меры, удовлетворяющей некоторой системе аксиом. В § 4 рассматриваются различные способы оценивания внутреннего конфликта: энтропийный подход (п. 4.1); методы, основанные на вычислении автоконфликтности и максимизации функции правдоподобия (п. 4.2); метрический подход (п. 4.3); декомпозиционный подход (п. 4.4). Наконец, в заключении подведены некоторые результаты данного исследования.

<sup>1</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-11-50077.

## 1. НЕКОТОРЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ФУНКЦИЙ ДОВЕРИЯ

Для удобства напомним основные понятия из теории Демпстера – Шейфера [4, 5]. Более подробную информацию можно найти в § 1 и 2 первой части обзора [1].

Пусть  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  – конечное множество и  $2^X$  – множество всех подмножеств из множества  $X$ . Базовым доверительным назначением (БДН, англ. *basic belief assignment*), или функцией масс, называют функцию множеств  $m: 2^X \rightarrow [0, 1]$ , которая удовлетворяет условию  $\sum_{A \in 2^X} m(A) = 1$ .

Подмножество  $A \subseteq X$  называют фокальным элементом, если  $m(A) > 0$ . Пару  $F = (\mathcal{A}, m)$  из множества всех фокальных элементов  $\mathcal{A} = \{A\}$  и соответствующей БДН  $m(A)$ ,  $A \in \mathcal{A}$ , называют телом свидетельства. Пусть  $\mathcal{F}(X)$  – множество всех тел свидетельств на множестве  $X$ , а  $\mathcal{P}(X)$  – множество всех вероятностных мер на множестве  $X$ .

Телу свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  можно поставить во взаимно однозначное соответствие функцию доверия (*belief function*)  $Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$  и функцию правдоподобия (*plausibility function*)  $Pl(A) = 1 - Bel(A^c) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B)$ , где  $A^c$  – дополнение множества  $A$ . Функция  $Pl(x) = \sum_{A \in \mathcal{A}: x \in A} m(A)$ ,  $x \in X$ , называется контурной функцией тела свидетельств. Будем обозначать функции доверия и правдоподобия через  $Bel_F$  и  $Pl_F$  соответственно, если надо подчеркнуть их зависимость от тела свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$ .

На множестве функций множеств  $g: 2^X \rightarrow \mathbb{R}$  можно ввести отношение порядка:  $g_1 \leq g_2$ , если  $g_1(A) \leq g_2(A) \quad \forall A \in 2^X$ .

Функция доверия (и тело свидетельств) называется:

- категоричной (*categorical*), если она имеет только один фокальный элемент; соответствующее тело свидетельств будем обозначать  $F_A = (A, 1)$ ;

- бессодержательной (*vacuous*), если единственным фокальным элементом этой функции является всё множество  $X$ ,  $F_X = (X, 1)$ ;

- консонантной (*consonant*), если её фокальные элементы являются вложенными, т. е.  $\forall A, B \in \mathcal{A}: A \subseteq B$  или  $B \subseteq A$ ;

- простой, если БДН имеет не более двух фокальных элементов, и если их два, то  $X$  – один из них;

- догматической (*dogmatic*), если  $X \notin \mathcal{A}$  (т. е.  $m(X) = 0$ ).

Любое тело свидетельства  $F = (\mathcal{A}, m)$  можно представить в виде  $F = \sum_{A \in \mathcal{A}} m(A)F_A$ . Простое тело свидетельств будет иметь вид  $F_A^\omega = (1 - \omega)F_A + \omega F_X$ , где  $\omega \in [0, 1]$ .

Тело свидетельств  $F' = (\mathcal{A}', m')$  называется специализацией тела свидетельств  $F'' = (\mathcal{A}'', m'')$  (обозначают:  $F' \sqsubseteq F''$ ), если существует такое разбиение множества  $\mathcal{A}' = \mathcal{A}'_1 \cup \dots \cup \mathcal{A}'_k$ ,  $\mathcal{A}'_i \cap \mathcal{A}'_j = \emptyset \quad \forall i \neq j$ ,  $k = |\mathcal{A}''|: \bigcup_{A \in \mathcal{A}'_i} A \subseteq B_i$ ,  $\sum_{A \in \mathcal{A}'_i} m'(A) = m''(B_i) \quad \forall B_i \in \mathcal{A}''$ ,  $i = 1, \dots, k$ . Другими словами, тело свидетельств  $F'$  уточняет (специализирует) тело свидетельств  $F''$ . Последнее в этом случае называют обобщением тела свидетельств  $F'$ .

Количество незнания в информации, содержащейся в теле свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$ , оценивается с помощью индексов неточности [6]. Примером такого индекса является нормированная обобщенная мера Хартли [7, 8]  $H_0(F) = \sum_{A \in \mathcal{A}} m(A) \log_{|X|} |A|$ , которую в основном и будем использовать далее.

В теории функций доверия развит инструментальный комбинирования тел свидетельств. Под правилом комбинирования понимают некоторую операцию  $\otimes: \mathcal{F}(X) \times \mathcal{F}(X) \rightarrow \mathcal{F}(X)$ . Наиболее популярными являются такие правила [9]:

- Ненормализованное правило Демпстера  $\otimes_{ND}: m_{ND}(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C) \quad \forall A \in 2^X$ .

**Канонической мерой (внешнего) конфликта** называется величина  $K = K(F_1, F_2) = m_{ND}(\emptyset) = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)m_2(C) \in [0, 1]$ , которая характеризует степень конфликтности источников информации, описываемых телами свидетельств  $F_1$  и  $F_2$ : чем больше значение этого параметра, тем более противоречивую информацию предоставляют источники.

- Правило Демпстера [4]  $\otimes_D: m_D(A) = \frac{m_{ND}(A)}{1 - K} \quad \forall A \in 2^X \setminus \emptyset$ . Если  $K = 1$  (полная конфликтность), то правило Демпстера неприменимо.

- Дизъюнктивное правило консенсуса  $\otimes_{\cup}$  [10]:

$$m_{\cup}(A) = \sum_{B \cup C = A} m_1(B)m_2(C), \quad A \in 2^X. \quad (1)$$



## 2. ПОНЯТИЯ НЕКОНФЛИКТНЫХ ФОКАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕРЫ ВНУТРЕННЕГО КОНФЛИКТА

Под мерой внутреннего конфликта тела свидетельств понимают некоторый функционал  $Con_{int} : \mathcal{F}(X) \rightarrow [0, 1]$ , который должен быть максимальным в случае полного конфликта между фокальными элементами этого тела свидетельств и минимальным в случае их неконфликтности.

По аналогии с неконфликтностью между телами свидетельств (см. § 3 в первой части обзора [1]) рассматривают такие случаи неконфликтности фокальных элементов одного тела свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  (соответствующие источники информации называют конфликтно-свободными):

- 1) сильная неконфликтность:  $\bigcap_{A \in \mathcal{A}} A \neq \emptyset$ ;
- 2) (простая) неконфликтность:  $A \cap B \neq \emptyset \forall A, B \in \mathcal{A}$ .

**Замечание 1.** Фокальные элементы, удовлетворяющие условию 1), называют логически согласованными [11], а удовлетворяющие условию 2) – попарно согласованными [12]. Из логической согласованности следует попарная согласованность, но не наоборот. В статье [12] исследовались свойства тел свидетельств, удовлетворяющих общему условию  $s$ -согласованности:  $\bigcap_{i=1}^s A_i \neq \emptyset \forall A_1, \dots, A_s \in \mathcal{A}$ , где  $2 \leq s \leq |\mathcal{A}|$ .

В общем случае желательно, чтобы мера внутреннего конфликта  $Con_{int}$  удовлетворяла следующим условиям:

**I1:**  $Con_{int}(F) = 0$ , если фокальные элементы тела свидетельств  $F$  являются логически (или попарно в слабом случае) согласованными.

В частности, при выполнении условия I1 верно, что:

- $Con_{int}(F) = 0$ , если  $F$  – категоричное тело свидетельств;
- $Con_{int}(F) = 0$ , если  $F$  – консонантное тело свидетельств;
- $Con_{int}(F) = 0$ , если  $F$  – простое тело свидетельств.

**I2:**  $Con_{int}(F_1) \geq Con_{int}(F_2) \quad \forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(X)$ ,  $F_1 \sqsubseteq F_2$  (антимонотонность по специализации).

Кроме того, мера внутреннего конфликта «сложного» тела свидетельств не должна быть меньше минимальной меры конфликта составляющих его «простых» тел свидетельств. Это требование может быть сформулировано относительно

класса  $\mathcal{OR}$  так называемых оптимистичных правил комбинирования тел свидетельств.

Правило комбинирования  $\otimes$  называется оптимистичным (пессимистичным) относительно индекса неточности [6]  $f$ , если  $f(F_1 \otimes F_2) \leq f(F_i)$  ( $f(F_1 \otimes F_2) \geq f(F_i)$ ),  $i = 1, 2$ .

Справедливо следующее утверждение (см., например, работу [13]).

**Утверждение 1.**  $H_0(F_1 \otimes_{ND} F_2) \leq H_0(F_i)$  и  $H_0(F_1 \otimes_{\cup} F_2) \geq H_0(F_i)$ ,  $i = 1, 2$ ,  $\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(X)$ .

Таким образом, ненормализованное правило Демпстера  $\otimes_{ND}$  является оптимистичным, а дизъюнктивное правило консенсуса – пессимистичным относительно нормированной обобщенной меры Хартли  $H_0$ . Этот же результат верен и для любого линейного строгого индекса неточности [6].

**I3:**  $Con_{int}(F_1 \otimes F_2) \geq \min\{Con_{int}(F_1), Con_{int}(F_2)\} \forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(X)$  и  $\forall \otimes \in \mathcal{OR}$ .

К желательным свойствам меры внутреннего конфликта также относят свойство независимости от упорядочивания альтернатив множества  $X$  или некоторое его обобщение. Пусть  $\varphi: X \rightarrow Y$  – взаимно однозначное отображение. Тогда можно рассмотреть образ тела свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  при отображении  $\varphi: F^\varphi = (\mathcal{A}^\varphi, m^\varphi)$ , где  $\mathcal{A}^\varphi = \{\varphi(A) : A \in \mathcal{A}\} \subseteq 2^Y$ ,  $m^\varphi(B) = \sum_{A: \varphi(A)=B} m(A) \quad \forall B \in \mathcal{A}^\varphi$ .

**I4:**  $Con_{int}(F^\varphi) = Con_{int}(F) \quad \forall F \in \mathcal{F}(X)$  и любого взаимно однозначного отображения  $\varphi$ .

## 3. АКСИОМАТИКА МЕР ВНУТРЕННЕГО КОНФЛИКТА

Аксиоматизация меры внутреннего конфликта в неявной форме встречается при аксиоматизации так называемых мер неопределенности в рамках теории функций доверия [14] и теории неточных вероятностей [15].

В явной форме аксиоматика мер внутреннего конфликта была рассмотрена в статье [16]. Исследовалась система аксиом мер внутреннего конфликта, основанная на усилении условий I1 – I4:

**B1:**  $Con_{int}(F) = 0 \Leftrightarrow$  фокальные элементы тела свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  являются сильно неконфликтными, т. е.  $\bigcap_{A \in \mathcal{A}} A \neq \emptyset$ ;

**B2:**  $Con_{int}(F_1) \geq Con_{int}(F_2) \quad \forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(X)$ ,  $Bel_{F_1} \geq Bel_{F_2}$ ;

**B3:**  $Con_{int}(\alpha F_1 + (1 - \alpha)F_2) \geq \alpha Con_{int}(F_1) + (1 - \alpha)Con_{int}(F_2) \quad \forall \alpha \in [0, 1]$  и  $\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(X)$ ;

**В4:**  $Con_{int}(F^\varphi) \leq Con_{int}(F) \quad \forall F \in \mathcal{F}(X)$  и любого отображения  $\varphi: X \rightarrow Y$ ;  $Con_{int}(F^\varphi) = Con_{int}(F)$ , если  $\varphi$  – инъективное отображение.

Аксиома В2 является усилением свойства И2, поскольку из  $Bel_{F'} \geq Bel_{F''}$  следует, что  $F' \subseteq F''$ , но не наоборот [10].

Аксиома В3 является усилением свойства И3 на случай множества линейных правил комбинирования (эти правила будут одновременно оптимистичными и пессимистичными относительно линейного индекса неточности), поскольку  $\alpha Con_{int}(F_1) + (1-\alpha)Con_{int}(F_2) \geq \min\{Con_{int}(F_1), Con_{int}(F_2)\}$ .

Аксиома В4 является усилением свойства И4 на случай, когда отображение  $\varphi$  не является инъективным: если образами различных элементов из множества  $X$  будет один элемент из множества  $Y$ , то мера внутреннего конфликта тела свидетельств  $F^\varphi$  будет не больше меры конфликта тела свидетельств  $F$ .

Тогда справедлива следующая теорема о продолжении меры внутреннего конфликта с множества вероятностных мер  $\mathcal{P}(X)$  на множество тел свидетельств  $\mathcal{F}(X)$ .

**Теорема 1** [16]. Если функционал  $Con: \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, 1]$  удовлетворяет аксиомам В1, В3, В4 на множестве  $\mathcal{P}(X)$ , то функционал

$$Con_{int}(F) = \inf\{Con(P): P \in \mathcal{P}_{Bel_F}\}$$

будет удовлетворять аксиомам В1 – В4 на множестве  $\mathcal{F}(X)$ , где  $Bel_F$  – функция доверия, соответствующая телу свидетельств  $F$ ,  $\mathcal{P}_{Bel_F} = \{P \in \mathcal{P}(X): Bel_F(A) \leq P(A) \quad \forall A \subseteq X\}$  – множество вероятностных мер, согласованных с функцией  $Bel_F$ .

Эта теорема позволяет определить меру внутреннего конфликта на множестве  $\mathcal{F}(X)$ , если она будет задана на множестве  $\mathcal{P}(X)$ . Поскольку

$$P = \sum_{i=1}^n P(\{x_i\})F_{\{x_i\}},$$

$$Con(P) = f(P(\{x_1\}), \dots, P(\{x_n\})), \quad (2)$$

где  $f(t_1, \dots, t_n)$  – некоторая функция,  $n = |X|$ . В статье [16] были найдены необходимые и достаточные условия на функцию  $f$  для того, чтобы функционал (2) удовлетворял аксиомам В1 – В4 на множестве  $\mathcal{P}(X)$ . В частности, следующее утверждение описывает широкий класс таких функций.

**Утверждение 2** [16]. Пусть функция  $g: [0, 1] \rightarrow [0, +\infty)$  является вогнутой и удовлетворяет условиям:  $g(0) = g(1) = 0$ ;  $g$  строго убывает

в точке  $t=1$ . Тогда функция  $f(t_1, \dots, t_n) = \sum_{i=1}^n g(t_i)$  будет по формуле (2) определять меру внутреннего конфликта на множестве  $\mathcal{P}(X)$ , которая удовлетворяет аксиомам В1 – В4.

Примерами функции  $g$  из утверждения 2, которую можно назвать образующей функцией для меры конфликта на множестве  $\mathcal{P}(X)$ , являются:

$$g(t) = \begin{cases} -t \ln t, & t \in (0, 1], \\ 0, & t = 0, \end{cases} \quad \text{в этом случае } Con(P) =$$

$$= -\sum_{i=1}^n P(\{x_i\}) \ln P(\{x_i\}) \quad \text{– энтропия Шеннона;}$$

$$g(t) = t - t^2, \quad t \in [0, 1], \quad \text{в этом случае } Con(P) = E_t(P),$$

где  $E_t$  – энтропийный функционал из представления (6) в первой части обзора [1].

## 4. СПОСОБЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОНФЛИКТА

### 4.1. Энтропийный подход

В этом случае мера внутреннего конфликта тела свидетельств  $F = (A, m)$  должна отражать распределение значений функции масс тела свидетельства на «конфликтующих» фокальных элементах, т. е. на тех фокальных элементах, которые не являются сильно или слабо неконфликтующими. Такой подход к определению внутреннего конфликта исследовался в начале 1980-х гг. в рамках обобщения энтропии Шеннона в теории Демпстера – Шейфера [17]. Как правило, энтропийный функционал имеет вид среднего значения распределения фокальных элементов относительно некоторой функции конфликтности:

$$\sum_{A \in \mathcal{A}} m(A) \theta(\psi(A)),$$

где  $\theta: [0, 1] \rightarrow [0, +\infty)$  – возрастающая, выпуклая функция,  $\theta(0) = 0$  (например, для функционалов, рассматриваемых ниже, используется функция  $\theta(t) = -\log_2(1-t)$ );  $\psi: 2^X \rightarrow [0, 1]$  – функция множеств, значения которой  $\psi(A)$ ,  $A \in 2^X$ , характеризуют суммарные массы конфликтующих с множеством  $A$  фокальных элементов. В частности, рассматривают:

- меру диссонанса (*measure of dissonance*) [18]

$$\begin{aligned} E(F) &= -\sum_{A \in \mathcal{A}} m(A) \log_2 Pl(A) = \\ &= -\sum_{A \in \mathcal{A}} m(A) \log_2 (1 - K(A)), \end{aligned}$$





где  $K(A) = \sum_{A \cap B = \emptyset} m(B)$  – суммарное значение масс конфликтующих с множеством  $A$  фокальных элементов касательно отношения «непересечения»;

- меру конфузии (*measure of confusion*) [19] как среднее значение конфликтующих фокальных элементов относительно отношения «невключения»

$$C(F) = - \sum_{A \in A} m(A) \log_2 Bel(A) = - \sum_{A \in A} m(A) \log_2 (1 - L(A)),$$

где  $L(A) = \sum_{B \not\subseteq A} m(B)$  – суммарное значение масс конфликтующих с множеством  $A$  фокальных элементов касательно отношения «невключения»;

- меру расхождения (*measure of discord*) [20]

$$D(F) = - \sum_{A \in A} m(A) \log_2 (1 - Conf(A)),$$

где  $Conf(A) = \sum_{B \in A} m(B) \frac{|B \setminus A|}{|B|}$  – суммарное взвешенное значение масс конфликтующих с множеством  $A$  фокальных элементов; очевидно, что  $K(A) \leq Conf(A) \leq L(A)$ ;

- меру раздора (*measure of strife*) [21]

$$ST(F) = - \sum_{A \in A} m(A) \log_2 (1 - CONF(A)),$$

где  $CONF(A) = \sum_{B \in A} m(B) \frac{|A \setminus B|}{|A|}$  – суммарное

взвешенное значение масс конфликтующих с множеством  $A$  фокальных элементов.

Каждый энтропийный функционал характеризует определенный тип конфликтности фокальных элементов. Условиям П1 и П2 удовлетворяет только энтропийная мера диссонанса  $E$ . Остальные из рассмотренных энтропийных мер этим условиям, вообще говоря, не удовлетворяют.

**Пример 1.** Пусть  $X = \{x_1, \dots, x_3\}$ . Найдем энтропийные меры конфликта для тел свидетельств  $F_i(\alpha) = \alpha F_A + (1 - \alpha) F_{B_i}$ ,  $\alpha \in [0, 1]$ ,  $i = 1, 2, 3$ , и различных случаев взаимного расположения фокальных элементов  $A \in 2^X$  и  $B_i \in 2^X$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Во всех случаях пусть  $A = \{x_1, x_2\}$  и  $|B_i| = 3$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

1)  $B_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$ . В этом случае  $A \subseteq B_1$ . Тогда  $K(A) = K(B_1) = 0$ ;  $L(A) = 1 - \alpha$ ,  $L(B_1) = 0$ ;  $Conf(A) = \frac{1}{3}(1 - \alpha)$ ,  $Conf(B_1) = 0$ ;  $CONF(A) = 0$ ,  $CONF(B_1) = \frac{1}{3}\alpha$ . Следовательно, имеем такие энтропийные меры:  $E(F_1(\alpha)) = 0$ ,  $C(F_1(\alpha)) = -\alpha \log_2 \alpha$ ,  $D(F_1(\alpha)) = -\alpha \times \log_2 (\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha)$ ,  $ST(F_1(\alpha)) = -(1 - \alpha) \log_2 (1 - \frac{1}{3}\alpha)$ .

2)  $B_2 = \{x_2, x_3, x_4\}$ . В этом случае  $A \cap B_2 \neq \emptyset$ , но  $A \not\subseteq B_2$  и  $B_2 \not\subseteq A$ . Тогда  $K(A) = K(B_2) = 0$ ;  $L(A) = 1 - \alpha$ ,  $L(B_2) = \alpha$ ;  $Conf(A) = \frac{2}{3}(1 - \alpha)$ ,  $Conf(B_2) = \frac{1}{2}\alpha$ ;

$CONF(A) = \frac{1}{2}(1 - \alpha)$ ,  $CONF(B_2) = \frac{2}{3}\alpha$ . Следовательно, имеем такие энтропийные меры:  $E(F_2(\alpha)) = 0$ ,  $C(F_2(\alpha)) = -\alpha \log_2 \alpha - (1 - \alpha) \log_2 (1 - \alpha)$ ,  $D(F_2(\alpha)) = -\alpha \log_2 (\frac{1}{3} + \frac{2}{3}\alpha) - (1 - \alpha) \log_2 (1 - \frac{1}{2}\alpha)$ ,  $ST(F_2(\alpha)) = -\alpha \log_2 (\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\alpha) - (1 - \alpha) \log_2 (1 - \frac{2}{3}\alpha)$ .

Таким образом, в первых двух случаях мера диссонанса будет неинформативной (т. е.  $E(F_i) \equiv 0$ ,  $i = 1, 2$ ), поскольку она учитывает только отношение «непересечения» фокальных элементов, которого в этих случаях нет.

3)  $B_3 = \{x_3, x_4, x_5\}$ . В этом случае  $A \cap B_3 = \emptyset$ . Тогда  $K(A) = L(A) = Conf(A) = CONF(A) = 1 - \alpha$ ,  $K(B_3) = L(B_3) = Conf(B_3) = CONF(B_3) = \alpha$ . Следовательно,  $E(F_3(\alpha)) = C(F_3(\alpha)) = D(F_3(\alpha)) = ST(F_3(\alpha)) = -\alpha \log_2 \alpha - (1 - \alpha) \log_2 (1 - \alpha)$ . То есть в этом случае все энтропийные меры конфликта совпадают и принимают максимальное значение для любого фиксированного  $\alpha \in [0, 1]$ .

Заметим, что во всех случаях  $D(F_i(1 - \alpha)) = ST(F_i(\alpha))$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Кроме того, энтропийный конфликт относительно любой меры поточно возрастает с увеличением «степени непересечения» фокальных элементов (например,  $D(F_1(\alpha)) \leq D(F_2(\alpha)) \leq D(F_3(\alpha)) \forall \alpha \in [0, 1]$ ). ♦

#### 4.2. Методы, основанные на вычислении автоконфликтности и максимизации контурной функции

Тело свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  можно считать внутренне неконфликтным, если оно не конфликтует с самим собой относительно какой-нибудь меры внешнего конфликта (см. первую часть обзора [1]). Например, тело свидетельств  $F$  может быть неконфликтным с самим собой относительно канонической меры конфликта  $K$ , т. е.  $K(F, F) = 0$ . Саму величину  $K(F, F)$  можно тогда рассматривать как меру внутреннего конфликта. В работе [22] был введен так называемый автоконфликт (*auto-conflict*) порядка  $s$ :  $Con_{aut,s}(F) = K(\underbrace{F, \dots, F}_s)$ .

Если  $s = 2$ , то такую меру будем называть просто автоконфликтом:  $Con_{aut}(F) = Con_{aut,2}(F)$ . Мера автоконфликта  $Con_{aut}$  будет удовлетворять условиям П1 (для случая простой неконфликтности фокаль-

ных элементов), а также условиям I2, I4 и I3, если  $\mathcal{R} = \{\otimes_{ND}\}$ .

Другой подход связан с понятием сильной неконфликтности фокальных элементов. Нетрудно видеть, что

$$\Omega_{\mathcal{A}} = \bigcap_{A \in \mathcal{A}} A \neq \emptyset \Leftrightarrow \exists x \in X : Pl(x) = \sum_{A \in \mathcal{A}: x \in A} m(A) = 1.$$

Другими словами, логическая согласованность тела свидетельств ( $\Omega_{\mathcal{A}} \neq \emptyset$ ) равносильна тому, что контурная функция будет достигать максимального единичного значения:  $\max_{x \in X} Pl(x) = 1$ . Заметим, что если  $|\mathcal{A}| = s$  и  $\Omega_{\mathcal{A}} \neq \emptyset$ , то  $Con_{aut,s}(F) = 0$ . Основываясь на этом наблюдении, в работе [23] была введена мера внутреннего конфликта  $Con_{pl}(F) = 1 - \max\{Pl(x) : x \in X\}$ . В этом случае максимум контурной функции  $\max\{Pl(x) : x \in X\} = 1 - Con_{pl}(F)$  представляет собой меру неконфликтности. Мера  $Con_{pl}$  удовлетворяет условиям I1 – I4 (условию I3 она удовлетворяет, если  $\mathcal{R} = \{\otimes_{ND}\}$ ). Другие свойства этой меры исследовались в работах [2, 23].

**Замечание 2.** В статье [16] показано, что меру внутреннего конфликта  $Con_{pl}(F)$  можно получить с помощью описанного в теореме 1 продолжения на множество  $\mathcal{F}(X)$  меры конфликта вида (2), где функция  $f$  имеет вид:  $f(t_1, \dots, t_n) = \min\{1 - t_1, \dots, 1 - t_n\}$ ,  $n = |X|$ . Причем эта мера будет удовлетворять аксиомам B1 — B4.

**Пример 2.** Для тел свидетельств  $F_i(\alpha)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , из примера 1, имеем:  $Con_{pl}(F_1(\alpha)) = Con_{pl}(F_2(\alpha)) = 1 - \max_{1 \leq k \leq 5} Pl(x_k) = 0$ , поскольку в первом случае  $Pl(x_1) = Pl(x_2) = 1$ , а во втором  $Pl(x_2) = 1$ . В третьем случае  $Pl(x_1) = Pl(x_2) = \alpha$ ,  $Pl(x_3) = Pl(x_4) = Pl(x_5) = 1 - \alpha$ . Поэтому  $Con_{pl}(F_3(\alpha)) = 1 - \max_{1 \leq k \leq 5} Pl(x_k) = \min\{\alpha, 1 - \alpha\}$ .

Мера автоконфликтности в этом примере будет равна  $Con_{aut}(F_1(\alpha)) = Con_{aut}(F_2(\alpha)) = 0$  и  $Con_{aut}(F_3(\alpha)) = 2\alpha(1 - \alpha)$ . ♦

Поскольку мера конфликта  $Con_{pl}$  легко вычисляется и удовлетворяет многим желательным свойствам (в частности, аксиомам B1 — B4), то это делает ее наиболее популярной при использовании в прикладных задачах. В то же время, как показывает пример 2, она будет нечувствительной при наличии пересекающихся фокальных элементов.

### 4.3. Метрический подход

В этом случае мера внутреннего конфликта тела свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  вычисляется как

$$Con_{int}(F) = \inf_{F' \in \mathcal{V}(X)} d(F, F'), \quad (3)$$

где  $d$  – некоторая метрика между телами свидетельств (см. п. 4.3.1 в первой части обзора [1]), а  $\mathcal{V}(X)$  – некоторое множество тел свидетельств с заведомо нулевым внутренним конфликтом, т. е. удовлетворяющих условию I1. Это может быть, например, множество категоричных или простых тел свидетельств. Такой подход рассматривался в работе [24] и применялся для оценивания надежности экспертных прогнозов погоды. В общем случае такая мера может и не удовлетворять всем желательным свойствам меры конфликта. Результат вычисления внутреннего конфликта будет существенно зависеть от выбора множества  $\mathcal{V}(X)$ . Кроме того, решение оптимизационной задачи (3) может иметь большую вычислительную сложность.

**Пример 3.** Найдем внутренний конфликт тел свидетельств  $F_i(\alpha)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , из примера 1 по формуле (3), где метрика  $d = d_J$  вычисляется по формуле (см. статью [25] и п. 4.3.1 в первой части обзора [1])

$$d_J(F_1, F_2) = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{A, B \in 2^X \setminus \{\emptyset\}} \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} (m_1(A) - m_2(A))(m_1(B) - m_2(B))},$$

$$F_1 = (\mathcal{A}, m_1), \quad F_2 = (\mathcal{A}_2, m_2).$$

Пусть  $\mathcal{V}(X)$  – множество простых тел свидетельств на множестве  $X$  вида  $F_{\{x\}}^\omega = (1 - \omega)F_{\{x\}} + \omega F_X$ , где  $\omega \in [0, 1]$ ,  $x \in X$ . Тогда  $Con_{int}(F_i(\alpha)) = \min_{1 \leq i \leq 5} \min_{\omega_i \in [0, 1]} d_J(F_i(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\omega_i})$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

В частности, для множества  $B_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$  (в этом случае  $A \subseteq B_1$ ) имеем

$$d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\omega_i}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{h^2(\alpha, \omega_i) - \alpha(1 - \omega_i) - \frac{2}{3}(1 - \alpha)(1 - \omega_i)}, \quad i = 1, 2,$$

$$d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_3\}}^{\omega_3}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{h^2(\alpha, \omega_3) - \frac{2}{3}(1 - \alpha)(1 - \omega_3)},$$

$$d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\omega_i}) = \frac{1}{\sqrt{2}} h(\alpha, \omega_i), \quad i = 4, 5,$$

где

$$h(\alpha, \omega) = \sqrt{\alpha^2 + (1 - \alpha)^2 + \omega^2 + (1 - \omega)^2 - \frac{4}{5}\alpha\omega - \frac{6}{5}(1 - \alpha)\omega}.$$

Теперь

$$\min_{\omega_i \in [0, 1]} d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\omega_i}) = d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\omega_i}) \Big|_{\omega_i = \frac{38 - 11\alpha}{60}} =$$

$$= \frac{1}{30} \sqrt{\frac{3479}{4}\alpha^2 - 841\alpha + 239}, \quad i = 1, 2,$$

$$\min_{\omega_3 \in [0, 1]} d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_3\}}^{\omega_3}) = d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_3\}}^{\omega_3}) \Big|_{\omega_3 = \frac{38 + 4\alpha}{60}} =$$

$$= \frac{1}{30} \sqrt{896\alpha^2 - 676\alpha + 239},$$



$$\min_{\alpha_i \in [0,1]} d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\alpha_i}) = d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\alpha_i}) \Big|_{\alpha_i = \frac{\alpha}{10}} =$$

$$= \frac{1}{10} \sqrt{99\alpha^2 - 84\alpha + 36}, \quad i = 4, 5.$$

Тогда

$$Con_{int}(F_1(\alpha)) = \min_{1 \leq i \leq 5} \min_{\alpha_i \in [0,1]} d_J(F_1(\alpha), F_{\{x_i\}}^{\alpha_i}) =$$

$$= \frac{1}{30} \sqrt{\frac{3479}{4}\alpha^2 - 841\alpha + 239}.$$

Для множества  $B_2 = \{x_2, x_3, x_4\}$  (в этом случае  $A \cap B_2 \neq \emptyset$ , но  $A \not\subseteq B_2$  и  $B_2 \not\subseteq A$ ) получим, что  $Con_{int}(F_2(\alpha)) = Con_{int}(F_1(\alpha)) \quad \forall \alpha \in [0, 1]$ , а для множества  $B_3 = \{x_3, x_4, x_5\}$  (в этом случае  $A \cap B_3 = \emptyset$ )

$$Con_{int}(F_3(\alpha)) =$$

$$= \min \left\{ \frac{1}{20} \sqrt{351\alpha^2 - 376\alpha + 144}, \frac{1}{30} \sqrt{896\alpha^2 - 676\alpha + 239} \right\}.$$

Нетрудно видеть, что  $Con_{int}(F_1(\alpha)) = Con_{int}(F_2(\alpha)) \leq Con_{int}(F_3(\alpha)) \quad \forall \alpha \in [0, 1]$ . ♦

#### 4.4. Декомпозиционный подход к вычислению меры внутреннего конфликта

В основе декомпозиционного подхода лежит предположение, что источник информации, который формирует тело свидетельств с большим внутренним конфликтом, мог быть неоднородным. Например, информация о прогностической стоимости акций получена с помощью нескольких различных методик. В этом случае можно считать, что тело свидетельств  $F = (\mathcal{A}, m)$  является результатом комбинирования нескольких декомпозируемых тел свидетельств  $F_i = (\mathcal{A}_i, m_i) \in \mathcal{F}(X)$ ,  $i = 1, \dots, l$ , с помощью некоторого правила комбинирования  $\otimes$ :  $F = F_1 \otimes \dots \otimes F_l$ . Поэтому для фиксированного правила комбинирования  $\otimes$  и фиксированной меры (внешнего) конфликта  $Con_{ext} : \underbrace{\mathcal{F}(X) \times \dots \times \mathcal{F}(X)}_l \rightarrow [0, 1]$  (см. первую часть

обзора [1]) внутренний декомпозиционный конфликт  $Con_{dec}$  тела свидетельств  $F$  можно оценить по формуле [26, 27]:

$$Con_{dec}(F) = Con_{ext}(F_1, \dots, F_l)$$

при условии

$$F = F_1 \otimes \dots \otimes F_l.$$

Поскольку последнее уравнение имеет множество решений, то можно поставить оптимизационные задачи о нахождении наибольшего  $\overline{Con_{dec}}(F)$  и наименьшего  $\underline{Con_{dec}}(F)$  конфликтов:

$$\overline{Con_{dec}}(F) = \sup_{F = F_1 \otimes \dots \otimes F_l} Con_{ext}(F_1, \dots, F_l),$$

$$\underline{Con_{dec}}(F) = \inf_{F = F_1 \otimes \dots \otimes F_l} Con_{ext}(F_1, \dots, F_l). \quad (4)$$

Пусть  $S_n = \{s = (s_i)_{i=1}^n : s_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n s_i = 1\}$  –  $n$ -мерный симплекс.

Рассмотрим некоторые частные случаи указанной задачи.

**Декомпозиция с помощью правила Демпстера.** Пусть для декомпозиции применяется правило Демпстера  $\otimes_D$ . Тогда задачи (4) для  $l = 2$  примут вид:

найти

$$K(F_1, F_2) = \sum_{\substack{B \cap C = \emptyset, \\ B \in \mathcal{A}_1, C \in \mathcal{A}_2}} m_1(B)m_2(C) \rightarrow \sup (\inf) \quad (5)$$

при условии, что

$$\mathbf{m}_1 = (m_1(B))_{B \in \mathcal{A}_1} \in S_{|\mathcal{A}_1|}, \quad \mathbf{m}_2 = (m_2(C))_{C \in \mathcal{A}_2} \in S_{|\mathcal{A}_2|}, \quad (6)$$

$$(1 - K_0(F_1, F_2))m(A) =$$

$$= \sum_{\substack{B \cap C = A, \\ B \in \mathcal{A}_1, C \in \mathcal{A}_2}} m_1(B)m_2(C), \quad A \in \mathcal{A}, \quad (7)$$

$$K(F_1, F_2) < 1. \quad (8)$$

Это задачи квадратичного программирования при линейных (6) и квадратичных (7)–(8) ограничениях. Заметим, что в случае общей постановки (5)–(8) мера декомпозиционного конфликта  $\underline{Con_{dec}^{\otimes_D}}(F) = 0$  и достигается для тел свидетельств  $F_1 = F$  и  $F_2 = F_X$ . Наибольшее значение конфликта  $K(F_1, F_2) = 1$  для двух тел свидетельств, удовлетворяющих условиям (6)–(7) (без условия (8)), будет достигаться, например, для таких тел свидетельств  $F_i = (\mathcal{A}_i, m_i) \in \mathcal{F}(X)$ ,  $i = 1, 2$ , в которых  $B \cap C = \emptyset \quad \forall B \in \mathcal{A}_1, \forall C \in \mathcal{A}_2$ . Причем последние тела свидетельств никак не связаны с телом свидетельств  $F$ .

**Декомпозиция с помощью дизъюнктивного правила консенсуса.** Пусть для декомпозиции применяется дизъюнктивное правило консенсуса  $\otimes_{\cup}$  вида (1). Тогда вместо условия (7) в задаче нахождения внутреннего конфликта будет применяться условие (1). Таким образом, в этом случае мы имеем задачу о нахождении тел свидетельств, имеющих наибольший (наименьший) канонический конфликт (5) и удовлетворяющих условиям (1), (6).

**Замечание 3.** В случае использования дизъюнктивного правила консенсуса иногда удобно считать, что пустое множество тоже может быть фокальным элементом тела свидетельств. Это можно интерпретировать как то, что альтернатива  $x \notin X$ , а значение  $m(\emptyset)$  – как степень доверия к тому, что  $x \notin X$ . Соответствующие решения будем называть обобщенными и обозначать через

$\mathcal{CON}_{dec}^{\otimes \cup}(F)$ . Тогда наибольшее значение канонического конфликта (5), удовлетворяющего условиям (1) и (6), будет равно  $\mathcal{CON}_{dec}^{\otimes \cup}(F)=1$  и достигаться на декомпозиции тела свидетельств  $F$  вида  $F_1 = F, F_2 = F_{\emptyset}$ .

Как видно, в общей постановке задача нахождения наибольшего и наименьшего внутренних конфликтов  $\mathcal{Con}_{dec}^{\otimes}(F)$  и  $\mathcal{Con}_{dec}^{\otimes \cup}(F)$  часто приводит к тривиальным решениям.

В то же время понятно, что предположение о неоднородности источника информации тела свидетельств с большим внутренним конфликтом подразумевает, что те тела свидетельств, композиция которых образует исходное тело свидетельств, должны быть в некотором смысле более простыми, чем исходное тело свидетельств. Кроме того, сам способ комбинирования также может накладывать определенные ограничения на декомпозируемое множество тел свидетельств. В частности, можно выделить такие ограничения на декомпозируемое множество тел свидетельств:

- структурные ограничения,
- ограничения по конфликтности,
- ограничения, связанные с правилами комбинирования,
- смешанные ограничения.

**Структурные ограничения** предполагают, что декомпозируемое множество тел свидетельств ищется в некотором классе простых по структуре тел свидетельств. Примерами таких классов являются простые тела свидетельств (или их обобщения, см. ниже), консонантные тела свидетельств и т. д.

Так, в работе [28] внутренний конфликт определялся как конфликт между так называемыми обобщенными простыми БДН (*generalized simple basic belief assignment*, это тела свидетельств вида

$F_A^{\omega} = (1-\omega)F_A + \omega F_X$ , где  $\omega \in (0, \infty)$ ), на которые однозначно раскладывается исходное недогматическое (т. е.  $m(X) > 0$ ) тело свидетельств (такое разложение Шейфер назвал каноническим). Если исходное тело свидетельств является догматическим (т. е.  $m(X) = 0$ ), то перед разложением необходимо выполнить дисконтирование БДН с малым параметром  $\varepsilon > 0$ :  $m(X) = \varepsilon > 0$ , функции масс остальных фокальных элементов пересчитываются пропорционально исходным значениям. Само разложение недогматического тела свидетельств  $F$  на обобщенные простые БДН можно выполнить в два этапа с помощью следующего способа согласно изложенному в докладе [29]. На первом этапе

вычисляются значения так называемой функции общности (*commonality function*):

$$q(A) = \sum_{B \supseteq A} m(B).$$

На втором этапе для каждого подмножества  $B \in 2^X \setminus X$  вычисляются веса  $\omega_B$  тел свидетельств  $F_B^{\omega_B}$  по формуле

$$\omega_B = \prod_{A \supseteq B} q(A)^{(-1)^{|A|-|B|+1}}.$$

Тогда [29]  $F = \otimes_{B \in 2^X \setminus X} F_B^{\omega_B}$ , где  $\otimes = \otimes_{ND}$  – ненормализованное правило Демпстера. В качестве меры внутреннего конфликта в работе [28] было предложено использовать значение  $\mathcal{Con}_{dec\_simple}(F) = \tilde{m}(\emptyset)$ , где  $\tilde{F} = (\mathcal{A}, \tilde{m}) =$

$$= \otimes_{B \in 2^X \setminus \{\emptyset, X\}} F_B^{\omega_B}.$$

$$\mathcal{Con}_{dec\_simple}(F) = \sum_{\substack{B_1 \cap \dots \cap B_k = \emptyset, \\ B_1, \dots, B_k \in 2^X \setminus \{\emptyset, X\}}} \prod_{s=1}^k (1 - \omega_{B_s}) \times \prod_{B \in (2^X \setminus \{\emptyset, X\}) \setminus \{B_1, \dots, B_k\}} \omega_B. \quad (9)$$

**Пример 4.** Если  $X = \{x_1, x_2\}$  и  $F = \alpha F_{\{x_1\}} + \beta F_{\{x_2\}} + (1-\alpha-\beta)F_X$ ,  $\alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta < 1$ , то  $q(\emptyset) = 1, q(\{x_1\}) = 1-\beta, q(\{x_2\}) = 1-\alpha, q(X) = 1-\alpha-\beta$ . Поэтому

$$\omega_{\emptyset} = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{1-\alpha-\beta}, \quad \omega_{\{x_1\}} = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\beta}, \quad \omega_{\{x_2\}} = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\alpha}.$$

$$\text{Следовательно, } \mathcal{Con}_{dec\_simple}(F) = \tilde{m}(\emptyset) = (1 - \omega_{\{x_1\}}) \times (1 - \omega_{\{x_2\}}) = \frac{\alpha\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)}. \blacklozenge$$

Для вычисления меры  $\mathcal{Con}_{dec\_simple}$  тела свидетельств из примера 1 нам понадобится следующая

**Лемма.** Пусть  $F = \alpha F_A + \beta F_B + (1-\alpha-\beta)F_X$ ,  $\alpha, \beta \in (0, 1), \alpha + \beta < 1, A, B \in 2^X$ . Тогда:

$$\text{– если } A \subseteq B \subseteq X, \text{ то } \omega_A = 1-\alpha, \omega_B = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\alpha},$$

$$\omega_D = 1 \quad \forall D \in 2^X \setminus \{\emptyset, A, B, X\};$$

$$\text{– если } A \cap B \neq \emptyset, A \not\subseteq B \text{ и } B \not\subseteq A, \text{ то}$$

$$\omega_A = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\beta}, \omega_B = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\alpha}, \omega_{A \cap B} = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{1-\alpha-\beta},$$

$$\omega_D = 1 \quad \forall D \in 2^X \setminus \{\emptyset, A \cap B, A, B, X\};$$

$$\text{– если } A \cap B = \emptyset, \text{ то } \omega_A = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\beta},$$

$$\omega_B = \frac{1-\alpha-\beta}{1-\alpha}, \omega_D = 1 \quad \forall D \in 2^X \setminus \{\emptyset, A, B, X\}.$$

**Следствие.** Если  $F = \alpha F_A + \beta F_B + (1-\alpha-\beta)F_X$ ,  $\alpha, \beta \in (0, 1), \alpha + \beta < 1$  то:

$$\text{– } \mathcal{Con}_{dec\_simple}(F) = 0, \text{ если } A \cap B \neq \emptyset;$$

$$\text{– } \mathcal{Con}_{dec\_simple}(F) = \frac{\alpha\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)}, \text{ если } A \cap B = \emptyset.$$



**Пример 5.** Для тел свидетельств  $F_i(\alpha) = \alpha F_A + (1-\alpha)F_{B_i}$ ,  $\alpha \in [0, 1]$ ,  $A = \{x_1, x_2\}$ ,  $|B_i| = 3$ ,  $i = 1, 2, 3$ , на множестве  $X = \{x_1, \dots, x_5\}$  (см. пример 1) выполним сначала дисконтирование с малым параметром  $\varepsilon > 0$ , получим тела свидетельств  $F_i(\alpha, \varepsilon) = \alpha(1-\varepsilon)F_A + (1-\alpha)(1-\varepsilon)F_{B_i} + \varepsilon F_X$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Тогда из доказанного выше следствия вытекает, что в первом случае  $B_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$  (когда  $A \subseteq B_1$ ) и во втором случае  $B_2 = \{x_2, x_3, x_4\}$  (когда  $A \cap B_2 \neq \emptyset$ , но  $A \not\subseteq B_2$  и  $B_2 \not\subseteq A$ ) имеем  $Con_{dec\_simple}(F_i(\alpha, \varepsilon)) = 0$ ,  $i = 1, 2$ . В третьем же случае  $B_3 = \{x_3, x_4, x_5\}$ , когда  $A \cap B_3 = \emptyset$ , имеем  $Con_{dec\_simple}(F_3(\alpha, \varepsilon)) = (1 - \omega_{\{x_1, x_2\}}) \times (1 - \omega_{\{x_3, x_4, x_5\}}) = \frac{\alpha(1-\alpha)(1-\varepsilon)^2}{(\alpha(1-\varepsilon) + \varepsilon)((1-\alpha)(1-\varepsilon) + \varepsilon)}$ . В пределе при  $\varepsilon \rightarrow +0$  получим, что  $Con_{dec\_simple}(F_3(\alpha)) = \begin{cases} 1, & \alpha \in (0, 1), \\ 0, & \alpha = 0 \vee \alpha = 1. \end{cases}$  ♦

Последний пример показывает, что для догматических тел свидетельств мера конфликта  $Con_{dec\_simple}$  является довольно «грубой». Кроме того, разложение на обобщенные простые БДН имеет и другие недостатки. Прежде всего, тела свидетельств вида  $F_A^\omega$ , когда  $\omega \notin [0, 1]$ , требуют определенной интерпретации. В этом случае нельзя сказать, что исходное тело свидетельств получено в результате комбинирования информации из нескольких других источников. Кроме того, в разложении может быть до  $2^{|X|} - 1$  обобщенных простых БДН, отличных от бессодержательного тела свидетельств  $F_X$ . Хотя на самом деле (как показывает следующий пример) исходное тело свидетельств может быть результатом комбинирования небольшого числа более сложных, чем обобщенные простые БДН, но внутренне неконфликтных тел свидетельств.

**Пример 6.** Пусть на множестве  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  заданы два тела свидетельств:  $F_1 = \alpha F_{\{x_2, x_3\}} + (1-\alpha)F_{\{x_1, x_2, x_3\}}$ ,  $\alpha \in (0, 1)$ , и  $F_2 = \beta F_{\{x_1, x_4\}} + (1-\beta)F_{\{x_1, x_2, x_4\}}$ ,  $\beta \in (0, 1)$ . Эти тела свидетельств являются консонантными, т. е. каждое из них неконфликтно с самим собой. Их каноническая мера конфликта  $K = K(F_1, F_2) = \alpha\beta$ . Если мы выполним комбинирование этих тел свидетельств с помощью ненормализованного правила Демпстера, то получим:  $F = F_1 \otimes_{ND} F_2 = (1 - \alpha)\beta F_{\{x_1\}} + \alpha(1-\beta)F_{\{x_2\}} + (1-\alpha)(1-\beta)F_{\{x_1, x_2\}}$ . После декомпозиции этого тела свидетельств на обобщенные простые БДН и вычисления соответствующей меры кон-

фликта получим (см. пример 4):  $Con_{dec\_simple}(F) = \frac{\alpha\beta(1-\alpha)(1-\beta)}{(1-\alpha+\alpha\beta)(1-\beta+\alpha\beta)} < K$ . То есть конфликт между исходными консонантными телами свидетельств будет больше того, который мы получим в результате декомпозиции комбинированного тела свидетельств на обобщенные простые БДН. ♦

Близкий к изложенному в работе [28] декомпозиционный подход к оцениванию внутреннего конфликта тел свидетельств рассматривался в статье [30]. В этой работе исследовалась функция конфликта на наборах непересекающихся подмножеств  $\{B_1, \dots, B_k\}$ ,  $B_i \cap \dots \cap B_k = \emptyset$ , вида  $f_\emptyset(\{B_1, \dots, B_k\}) = \prod_{s=1}^k (1 - \omega_{B_s}) \prod_{B \in (2^X \setminus \{\emptyset, X\}) \setminus \{B_1, \dots, B_k\}} \omega_B$  (см. формулу (9)), а также функция локального конфликта (*local conflict function*)  $\bar{f}_\emptyset(A) = \sum_{\substack{A \in \{B_1, \dots, B_k\} \\ B_i \cap \dots \cap B_k = \emptyset}} \frac{1}{|\{B_1, \dots, B_k\}|} f_\emptyset(\{B_1, \dots, B_k\})$ ,  $A \subseteq X$ .

Эти функции использовались в работе [30] для принятия решения о выборе наименее конфликтных источников информации для комбинирования в задаче локализации положения робота.

**Ограничения по конфликтности** предполагают, что декомпозируемое множество тел свидетельств ищется в классе таких тел свидетельств, которые имеют меньший внутренний конфликт, чем исходное тело свидетельств относительно какой-либо другой (недекомпозиционной) меры конфликта.

**Пример 7.** Пусть  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$  и  $F = \alpha F_{\{x_1\}} + \beta F_{\{x_2\}} + \gamma F_{\{x_3\}} + (1-\alpha-\beta-\gamma)F_{\{x_2, x_3\}}$ ,  $\alpha, \beta, \gamma > 0$ ,  $\alpha + \beta + \gamma < 1$ . Рассмотрим декомпозицию тела свидетельств  $F$  с помощью ненормализованного правила Демпстера:  $F = F_1 \otimes_{ND} F_2$ . Причем декомпозицию будем искать в классе неконфликтных тел свидетельств (т. е. с нулевым автоконфликтом:  $Con_{aut}(F_i) = 0$ ,  $i = 1, 2$ ). Нетрудно показать, что единственная декомпозиция в этом случае будет иметь вид:

$$\begin{cases} F_1 = \lambda_1 F_{\{x_2, x_3\}} + \lambda_2 F_{\{x_1, x_2\}} + \lambda_3 F_{\{x_2\}}, \\ F_2 = \mu_1 F_{\{x_2, x_3\}} + \mu_2 F_{\{x_1, x_3\}} + \mu_3 F_{\{x_3\}}. \end{cases}$$

Из равенства  $F = F_1 \otimes_{ND} F_2$  следует, что неотрицательные коэффициенты  $\lambda_i, \mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , должны удовлетворять системе

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1, & \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1, \\ \lambda_1 \mu_1 = 1 - \alpha - \beta - \gamma, & \lambda_2 \mu_2 = \alpha, \\ (\lambda_2 + \lambda_3) \mu_1 = \beta, & \lambda_1 (\mu_2 + \mu_3) = \gamma. \end{cases}$$

Эта система имеет решение, если  $\alpha(1-\alpha-\beta-\gamma)=\beta\gamma$ . В этом случае решением будет

$$\lambda_1=1-\alpha-\beta, \quad \mu_1=1-\alpha-\gamma, \quad \lambda_2=\frac{\alpha}{\alpha+\gamma}, \quad \mu_2=\alpha+\gamma,$$

$\lambda_3=\mu_3=0$ . При этом  $Con_{dec}(F)=K(F_1, F_2)=0$ . Но, например,  $Con_{aut}(F)=\alpha(1-\alpha)+\beta\gamma$ . ♦

**Ограничения, связанные с правилами комбинирования.** Выбор правила комбинирования накладывает определенные ограничения на множество допустимых тел свидетельств. Это обусловлено различным характером этих правил. Например, конъюнктивное правило является оптимистичным, а дизъюнктивное – пессимистичным. Ограничения на множество допустимых тел свидетельств, согласованные с характером правил комбинирования, можно задать, например, с помощью индексов неточности [6]. Здесь и далее в качестве индекса неточности будем использовать нормированную обобщенную меру Хартли  $H_0(F)=\sum_{A \in \mathcal{A}} m(A) \log_{|X|} |A|$ , хотя все результаты справедливы и для более широкого класса таких индексов, в частности, для строгих линейных индексов неточности (см. работы [26, 27]).

С учетом оптимистичности правила Демпстера (см. утверждение 1) задача оценивания внутреннего конфликта тела свидетельств  $F$  при декомпозиции его на два тела свидетельств  $F_i=(\mathcal{A}_i, m_i) \in \mathcal{F}(X)$ ,  $i=1,2$ , может быть сформулирована следующим образом. Требуется найти наибольшее (наименьшее) значение функционала  $K(F_1, F_2)$  при выполнении ограничений (6)–(8) и условий

$$H_0(F) \leq H_0(F_i), \quad i=1,2. \quad (10)$$

Решения указанных задач обозначим через  $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)$  и  $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)$  соответственно. Заметим, что для тел свидетельств  $F_1=F$  и  $F_2=F_X$  выполняются условия (10), так как  $H_0(F_X)=1$ . Поэтому всегда  $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)=0$ . Тогда может быть поставлена задача о нахождении тел свидетельств, имеющих наибольший канонический конфликт (5) и удовлетворяющих условиям (6)–(8), (10).

Кроме ограничений снизу вида (10), могут рассматриваться и ограничения сверху на количество незнания в информации, содержащейся в декомпозируемых телах свидетельств:  $H_0(F_i) \leq H_{\max}$ ,  $i=1,2$ , где  $H_{\max}$  – максимально допустимый уровень незнания.

Если декомпозиция тела свидетельств  $F$  осуществляется с помощью дизъюнктивного правила

консенсуса, то вместо условий (7) в задаче нахождения внутреннего конфликта будут использованы условия (1). Кроме того, для дизъюнктивного правила консенсуса и любого линейного индекса неточности, в частности для  $H_0$ , верна оценка (см. утверждение 1)

$$H_0(F) \geq H_0(F_i), \quad i=1,2. \quad (11)$$

Таким образом, в этом случае мы имеем задачу о нахождении тел свидетельств, имеющих наибольший (наименьший) канонический конфликт (5) и удовлетворяющих условиям (1), (6), (11). Решения соответствующих задач будем обозначать через  $Con_{dec\_gen}^{\otimes \cup}(F)$  и  $Con_{dec\_gen}^{\otimes \cup}(F)$ .

**Пример 8.** Пусть  $X=\{x_1, x_2\}$  и  $F=\alpha F_{\{x_1\}}+\beta F_{\{x_2\}}+(1-\alpha-\beta)F_X$ ,  $\alpha, \beta \geq 0$ ,  $\alpha+\beta < 1$ . Тогда [26]  $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)=\frac{\alpha\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)}$ , и если  $\sqrt{\alpha}+\sqrt{\beta} \leq 1$ , то  $Con_{dec\_gen}^{\otimes \cup}(F)=2\sqrt{\alpha\beta}$ . При  $\sqrt{\alpha}+\sqrt{\beta} > 1$  соответствующая декомпозиционная задача для нахождения меры конфликта  $Con_{dec\_gen}^{\otimes \cup}$  не имеет решения (но будет иметь решение в обобщенном смысле, см. замечание 3). Отметим, что на множестве  $X=\{x_1, x_2\}$   $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)=Con_{dec\_simple}$  (см. пример 4). ♦

Некоторые свойства мер конфликта, полученных декомпозиционным методом с ограничениями, связанными с правилами комбинирования, можно найти в статье [31], где, в частности, показано, что  $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)=1$  в случае полной конфликтности фокальных элементов,  $Con_{dec\_gen}^{\otimes D}(F)=0$  для простых тел свидетельств.

Общим недостатком декомпозиционного подхода является его высокая вычислительная сложность. Но это компенсируется хорошей интерпретируемостью такой меры в случае, когда источник информация является неоднородным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дан аналитический обзор современного состояния исследований по анализу противоречивости (конфликтности) информации в рамках теории функций доверия в том случае, когда эта информация описывается одним телом свидетельств.

Отметим, что:

- существует ряд требований к мере внутреннего конфликта: минимальность при той или иной степени неконфликтности фокальных эле-



ментов, антимонотонность по специализации, неубывание при оптимистичном комбинировании, невозрастание при отображении базового множества;

- эти свойства положены в основу аксиоматики меры внутреннего конфликта; найден общий вид меры внутреннего конфликта; показано, что на множестве вероятностных мер он будет совпадать с некоторым энтропийным функционалом (в частности, с энтропией Шеннона при соответствующем выборе образующей функции);

- существует несколько способов оценивания внутреннего конфликта: энтропийный, на основе вычисления автоконфликтности, на основе вычисления контурной функции, метрический, декомпозиционный.

Рассмотренные методы оценивания внутреннего конфликта отличаются условиями выполнения желательных свойств, различной чувствительностью, вычислительной сложностью и той моделью, которая положена в основу оценивания: среднее распределения масс конфликтующих фокальных элементов, удаленность от множества неконфликтующих тел свидетельств, автоконфликтность, мера логической согласованности фокальных элементов, неоднородность источников информации и т. д.

Конечно же, существует и ряд открытых проблем в оценивании внутреннего конфликта тел свидетельств:

- исследование свойств мер внутреннего конфликта, основанных на той или иной модели;
- нахождение общего вида меры внутреннего конфликта для других систем аксиом;
- исследование мер конфликта для тел свидетельств, определенных на пространстве с мерой
- и др.

Актуальными являются прикладные задачи, связанные с оцениванием внутреннего конфликта. Среди них можно выделить проблему уменьшения внутреннего конфликта тела свидетельств (в том числе полученных на основе обработки экспертных данных). Эта проблема, в частности, может быть решена путем обобщения исходного тела свидетельств (см. условие I2) или его декомпозиции на внутренне неконфликтные тела свидетельств (см. п. 4.4).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лепский А.Е. Анализ противоречивости информации в теории функций доверия. Ч. 1. Внешний конфликт // Проблемы управления. – 2021. – № 5. – С. 3–19. [Lepskiy, A. Analysis of the inconsistency of information in the theory of be-

- lief functions. Part 1. External conflict // Control Sciences. – No. 5. – P. 2–16]
2. Daniel, M. Conflicts within and between Belief Functions // Hüllermeier, E., Kruse, R., Hoffmann, E. (Eds.) – IPMU 2010: LNAI 6178, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010. – P. 696–705
3. Daniel, M. Non-conflicting and Conflicting Parts of Belief Functions // Coolen, F., de Cooman, G., Fetz, T., Oberguggenberger, M. (Eds.) – ISIPTA'11. Proc. of the 7th ISIPTA: Studia Universitätsverlag. – Innsbruck, 2011. – P. 149–158.
4. Dempster, A.P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping // Annals of Mathematical Statistics. – 1967. – Vol. 38. – P. 325–339.
5. Shafer, G. A Mathematical Theory of Evidence. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1976.
6. Bronevich, A., Lepskiy, A. Imprecision Indices: Axiomatic, Properties and Applications // Int. J. of General Systems. – 2015. – Vol. 44, no. 7-8. – P. 812–832.
7. Higashi, M., Klir, G.J. Measures of Uncertainty and Information Based on Possibility Distributions // Int. J. General Systems. – 1983. – No. 9. – P. 43–58.
8. Dubois, D., Prade, H. A Note on Measures of Specificity for Fuzzy Sets // Int. J. of General Systems. – 1985. – No. 10. – P. 279–283.
9. Sentz, K., Ferson, S. Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory // In: Report SAND 2002-0835, Sandia National Laboratories, 2002.
10. Dubois, D., Prade, H. A Set-Theoretic View on Belief Functions: Logical Operations and Approximations by Fuzzy Sets // Int. J. of General Systems. – 1986. – No. 12. – P. 193–226.
11. Destercke, S., Burger, T. Toward an Axiomatic Definition of Conflict between Belief Functions // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2013. – Vol. 43, no. 2. – P. 585–596.
12. Pichon, F., Jusselme, A.-L., Ben Abdallah, N. Several Shades of Conflict // Fuzzy Sets and Systems. – 2019. – Vol. 366. – P. 63–84.
13. Lepskiy, A. General Schemes of Combining Rules and the Quality Characteristics of Combining // F. Cuzzolin (Ed.): BELIEF 2014, LNAI 8764. – Springer-Verlag, 2014. – P. 29–38.
14. Harmanec, D. Toward a Characterization of Uncertainty Measure for the Dempster-Shafer Theory // Proc. of the 11 Intern. Conf. on Uncertainty in Artificial Intel. – Montreal, Canada, 1995. – P. 255–261.
15. Bronevich, A., Klir, G.J. Measures of Uncertainty for Imprecise Probabilities: An Axiomatic Approach // Int. J. of Approximate Reasoning. – 2010. – Vol. 51. – P. 365–390.
16. Bronevich, A., Lepskiy, A. Measures of Conflict, Basic Axioms and Their Application to the Clusterization of a Body of Evidence // Fuzzy Sets and Systems. – 2021. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2021.04.016>.
17. Klir, G.J. Uncertainty and Information: Foundations of Generalized Information Theory. – Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.
18. Yager, R.R. Entropy and Specificity in a Mathematical Theory of Evidence // Int. J. of General Systems. – 1983. – Vol. 9, no. 4. – P. 249–260.
19. Höhle, U. Entropy with respect to plausibility measures // Proc. of the 12 IEEE Intern. Symposium on Multiple-Valued Logic. – Paris, 1982. – P. 167–169.
20. Klir, G.J., Ramer, A. Uncertainty in the Dempster-Shafer Theory: A Critical Re-examination // Int. J. of General Systems. – 1990. – Vol. 18, no. 2. – P. 155–166.

21. *Klir, G.J., Parviz, B.* Probability-Possibility Transformations: A Comparison // *Int. J. of General Systems.* – 1992. – Vol. 21, no. 3. – P. 291–310.
22. *Osswald, C., Martin, A.* Understanding the Large Family of Dempster-Shafer Theory's Fusion Operators – A Decision-Based Measure // *Int. Conf. on Information Fusion.* – Florence, Italy, 2006.
23. *Daniel, M.* Properties of Plausibility Conflict of Belief Functions // *Rutkowski, L., Korytkowski, M., Scherer, R., et al. (Eds.). – ICAISC 2013, Part I, LNAI 7894.* – Springer-Verlag, 2013. – P. 235–246.
24. *Bronevich, A.G., Spiridenkova, N.S.* Measuring Uncertainty for Interval Belief Structures and Its Application for Analyzing Weather Forecasts // in: *Kacprzyk, J., Szmidt, E., Zadrożny, S., Krawczak, M. (Eds.). – Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing.* – Vol. 641. – Springer, Cham, 2018. – P. 273–285.
25. *Jousselme, A.-L., Grenier, D., Bossé, E.* A New Distance between Two Bodies of Evidence // *Information Fusion.* – 2001. – No. 2. – P. 91–101.
26. *Lepskiy, A.* On Internal Conflict as an External Conflict of a Decomposition of Evidence // *Vejnarová J., Kratochvil V. (Eds.): – BELIEF 2016, LNAI 9861.* – Springer-Verlag, 2016. – P. 25–34.
27. *Lepskiy, A.* Decomposition of Evidence and Internal Conflict // *Procedia Computer Science.* – 2017. – Vol. 122. – P. 186–193.
28. *Schubert, J.* The Internal Conflict of a Belief Function // *Denoëux T., Masson, M.H. (Eds.) – Belief Functions: Theory and Applications: Advances in Intelligent and Soft Computing.* – Vol. 164. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – P. 169–177.
29. *Smets, P.* The Canonical Decomposition of a Weighted Belief // *Proc. of the 14<sup>th</sup> Intern. Joint Conf. on Artificial Intel., 1995.* – P. 1896–1901.
30. *Roquel, A., Le Hégarat-Masclé, S., Bloch, I., Vincke, B.* Decomposition of Conflict as a Distribution on Hypotheses in the Framework on Belief Functions // *Int. J. of Approximate Reasoning.* – 2014. – Vol. 55. – P. 1129–1146.
31. *Lepskiy, A.E.* Decompositional Approach for Evaluation of Internal Conflict in the Framework of the Evidence Theory // *Nechetkie Sistemy i Myagkie Vychisleniya.* – 2020. – Vol. 15, no. 1. – P. 43–63.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии  
П.Ю. Чеботаревым.*

*Поступила в редакцию 19.07.2021,  
после доработки 27.08.2021.  
Принята к публикации 31.08.2021*

**Лепский Александр Евгеньевич** – д-р физ.-мат. наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, ✉ alex.lepskiy@gmail.com.

## ANALYSIS OF INFORMATION INCONSISTENCY IN BELIEF FUNCTION THEORY. PART II: INTERNAL CONFLICT

A.E. Lepskiy

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

✉ alex.lepskiy@gmail.com

**Abstract.** Part II of the survey considers the measure of internal conflict in a body of evidence within belief function theory (the Dempster–Shafer theory of evidence). The concepts of non-conflict focal elements in a body of evidence and the basic requirements applied to measures of internal conflict are discussed. Some axiomatics of a measure of internal conflict based on strengthening desirable properties is studied. The general forms of measures of internal conflict that satisfy this system of axioms are presented and analyzed. Different methods for estimating internal conflict are considered: an entropy approach, methods based on auto-conflict calculation and contour function maximization, and metric and decompositional approaches. The decompositional approach assumes that the information source for a body of evidence with great internal conflict could be heterogeneous. This approach is considered in detail. Many illustrative examples are provided.

**Keywords:** belief function theory, combining rules, inconsistency of bodies of evidence, measure of internal conflict.

**Funding.** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-11-50077.



# **СТРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЕ НЕФИНАНСОВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ: ПОДХОД К ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ**

А.С. Богомолов, М.М. Дворяшина, О.И. Дранко, В.А. Кушников, А.Ф. Резчиков

**Аннотация.** Разработан подход к проведению стресс-тестирования нефинансовых организаций, включающий постановку и методику решения обратной задачи, а также математическую модель на основе данных из открытых источников (финансовой отчетности компаний). Актуальность применения данного подхода возрастает в условиях кризисов различной природы (экономический кризис, пандемия COVID-19 и др.), тестирования устойчивости компаний (особенно системообразующих) к шокным ситуациям в целях разработки превентивных управленческих воздействий компенсирующего характера. Постановка прямой задачи предполагает определение параметров финансовой модели компании, обеспечивающих неотрицательный уровень остатка денежных средств в прогнозном периоде. Обратная задача состоит в определении характеристик финансово-экономического состояния предприятия, соответствующих различным критическим сочетаниям параметров финансового результата его деятельности. Авторами разработана оригинальная методика, позволяющая значительно снизить трудоемкость и вычислительную сложность проведения стресс-тестирования, используемого в технологиях риск-менеджмента финансовых организаций, благодаря применению новой математической модели в аналитическом виде. Работа модели продемонстрирована на примере стресс-тестирования системообразующего предприятия реального сектора экономики, значительно пострадавшего от ограничительных мер в условиях пандемии COVID-19. Для модельных расчетов использованы открытые данные финансовой отчетности организации.

**Ключевые слова:** стресс-тестирование, критическое сочетание параметров, риск-менеджмент, финансовое прогнозирование, моделирование, обратная задача, движение денежных средств, операционная эффективность, COVID-19.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Масштабный экономический кризис, вызванный ограничительными мерами при пандемии COVID-19, спровоцировал резкое снижение спроса на многих рынках товаров и услуг реального сектора мировой экономики, повлекшее в некоторых отраслях массовые банкротства, запрос от бизнеса на финансовую поддержку наиболее пострадавших от кризиса компаний<sup>1</sup>, чрезвычайные меры правительства. Постановлением Правительства Российской Федерации<sup>2</sup> предусматриваются такие меры финансовой поддержки бизнеса, как субсидии на

возмещение затрат, отсрочка уплаты налогов и авансовых платежей, госгарантии, необходимые для реструктуризации существующих или выдачи новых кредитов и облигационных займов. В первую очередь указанные меры касаются так называемых системообразующих предприятий<sup>3</sup>.

Цель соответствующих усилий Правительства – повышение устойчивости развития российской экономики. В качестве одного из условий доступа компаний к государственным мерам финансовой поддержки заявлено проведение анализа финансово-хозяйственной деятельности системообразующей организации, выполнение оценки ее финансовой устойчивости (стресс-тест) в соответствии с

<sup>1</sup> URL: <https://www.cbr.ru/covid/> (дата обращения 25.05.2021).

<sup>2</sup> URL: <http://government.ru/docs/39665/> (дата обращения 25.05.2021).

<sup>3</sup> URL: <https://data.economy.gov.ru/> (дата обращения 25.05.2021).

порядком, установленным Министерством экономического развития Российской Федерации<sup>4</sup>.

Методики оценки финансовой устойчивости (стресс-тестирование) известны в теории и практике риск-менеджмента более двух десятилетий. Но более широкое распространение они получили в банковском секторе экономики, который наряду с факторами внешней среды находится под сильным давлением регуляторов. В реальном секторе экономики процедуры стресс-тестирования практически не проводятся в силу сложности привлекаемых математических моделей. Сложность и неоднозначность проведения стресс-тестов для нефинансовых организаций заключаются в необходимости разработки:

- сценариев поведения экономических показателей предприятий в ситуации стресса (кризиса),
- модели прогнозирования.

Авторами предложена схема стресс-тестирования, которая заключается в проведении следующих основных мероприятий:

- получение данных о финансово-экономическом состоянии объекта управления;
- разработка сценариев проведения стресс-тестирования;
- настройка математической модели объекта управления, на который влияет реализация выбранных сценариев стресс-тестирования;
- проведение вычислительных экспериментов с математической моделью;
- анализ результатов математического моделирования;
- разработка планов мероприятий по предотвращению возможных критических ситуаций, диагностированных в процессе стресс-тестирования.

В рамках предлагаемого подхода возможна коррекция используемых сценариев, параметров математической модели с последующим проведением вычислительных экспериментов и анализом полученных результатов лицами, принимающими решения. Важным и трудоемким этапом проведения данных исследований является имитационное моделирование изменения производственного процесса предприятия при различных сценариях стресс-тестирования.

<sup>4</sup> Приказ Министерства экономического развития РФ от 13 мая 2020 г. N 276 «Об утверждении Порядка проведения оценки финансовой устойчивости (стресс-теста) системообразующих организаций российской экономики, претендующих на предоставление в 2020 году мер государственной поддержки». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73936434/#1000> (дата обращения 25.05.2021).

Авторами разработана оригинальная методика, позволяющая значительно уменьшить трудоемкость и вычислительную сложность проводимых экспериментов благодаря использованию новой математической модели в аналитическом виде. Эта модель позволяет описать динамику финансово-экономического состояния предприятия при различных значениях управляющих параметров моделей и возмущений.

Вычислительная сложность уменьшена путем:

- Разработки модели прогнозирования динамики финансово-экономического состояния предприятия в аналитическом виде, используемой для решения прямой задачи. Данная задача заключается в прогнозировании значений показателей финансово-экономического состояния предприятия на различных временных интервалах и в определении критического сочетания параметров, приводящих к дестабилизации или полной остановке предприятия.
- Разработки моделей и методов решения обратной задачи, заключающейся в определении состояний предприятия, соответствующих различным критическим сочетаниям параметров. Трудоемкость значительно сокращается благодаря использованию математической модели в аналитическом виде.

---

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

---

В общенаучном смысле стресс-тест представляет собой одну из форм тестирования, которое используется для определения устойчивости системы в условиях некоторых внешних возмущающих воздействий.

Базой для работ по стресс-тестированию выступают исследования финансовой устойчивости бизнес-организации. В работах М.Е. Змиевского [1] приведен обзор исследований по определению показателей финансовой неустойчивости (проблемы, *distress*, банкротства). В частности, для обоснования индикаторов (финансовых коэффициентов) банкротства чаще всего применялся сравнительный анализ финансовых показателей выборок компаний с финансовыми проблемами (*distressed*) и без них.

В области финансов организации понятие стресс-теста появилось в конце 1990-х гг., предпосылками чего явились разработки в теории и практике анализа кредитных рисков компаний, моделирования вероятности банкротств, исследования на основе больших массивов эмпирических данных



американских компаний, проводимые крупными рейтинговыми агентствами (Moody's, S&P, Fitch). Обзор нескольких поколений подходов к соответствующим задачам представлен в работах [2–4].

Стресс-тест – это испытание на прочность финансового положения организации в условиях «серьезного, но вместе с тем вероятного шока»<sup>5</sup>. Стресс-тестирование организации выступает альтернативой финансовым прогнозам. Модели стресс-тестирования позволяют определить не только чувствительность к отдельным факторам риска, но и к сочетаниям критических факторов. Стресс-тест, как правило, включает в себя четыре элемента:

- Набор тестируемых рисков.
- Сценарий, при котором происходит реализация рисков. Это могут быть сценарии экономического спада, роста безработицы, падения цен на недвижимость на горизонте стресс-теста. Как правило, горизонт стресс-тестирования находится в интервале 2–5 лет.

- Модели, описывающие влияние рисков на тестируемые параметры. Модели, используемые для стресс-тестирования финансовых институтов, определяют связи между макроэкономическими показателями и рыночными индикаторами: процентными ставками, доходностями облигаций, ценами акций и т. д., а также финансовыми параметрами – например, рейтингами корпоративных заемщиков, которые, в свою очередь, влияют на объем доформирования резервов по ссудам.

- Измерение результатов. В большинстве случаев оценивается финансовый результат на горизонте стресс-теста, итоговый показатель достаточности капитала сравнивается с нормативом и рассчитывается дефицит капитала; в ряде стресс-тестов также оценивается дефицит ликвидности.

В качестве двух основных подходов к проведению стресс-тестирования выделяют *bottom-up* и *top-down* стресс-тесты. Первый предполагает работу с методикой стресс-тестирования самой организации (инициативное стресс-тестирование). *Top-down* стресс-тест проводится регулятором с использованием надзорной или публично доступной информации об отдельных организациях по единому определенному сценарию. *Bottom-up* стресс-тест реализуется самими финансовыми институтами с использованием внутренних данных и моделей, но с одинаковым сценарием, определяемым регулятором. Наиболее полно принципы стресс-

<sup>5</sup> URL: [https://www.cbr.ru/finstab/stress\\_testing/chto-takoe-stress-testirovanie/what\\_is\\_stress\\_testing/](https://www.cbr.ru/finstab/stress_testing/chto-takoe-stress-testirovanie/what_is_stress_testing/) (дата обращения 20.04.2021).

тестирования для финансовых институтов отражены в Требованиях Базельского комитета по банковскому надзору (*The Basel Committee*)<sup>6</sup>.

В октябре 2009 г. Совет по финансовой стабильности (*Financial Stability Board*) выпустил документ «Уроки риск-менеджмента, полученные в период глобального банковского кризиса 2008 года»<sup>7</sup>. Особое внимание в нем обращается на вопросы стресс-тестирования, особенно подчеркивается значимость проведения обратных или реверсивных стресс-тестов (*reverse stress test*). Они отличаются от стандартных стресс-тестов тем, что нацелены на определение набора сценариев (комбинаций риск-факторов), в случае реализации которых организация потеряет свою финансовую устойчивость. То есть *обратное стресс-тестирование* (обратная задача) анализирует финансовую устойчивость с другой стороны, определяя те предельные значения риск-факторов, при наступлении которых организация окажется банкротом. Для этого выявляются пограничные значения показателей финансовой устойчивости, при которых организация становится банкротом, и далее определяются события, которые могут привести к таким значениям показателей.

Для компаний реального сектора экономики работ по методикам стресс-тестирования немного, хотя эта тематика изучается в рамках достаточно быстро развивающейся дисциплины риск-менеджмента. В западной практике стресс-тестирования нефинансовых организаций описаны и используются:

- модель кредитного риска (SEBRA-model), разработанная Норвежским банком для прогноза годовой вероятности банкротства фирмы-заемщика;

- модель Moody's AnalyticsRiskCalc<sup>8</sup>. Модель основывается на показателях финансового анализа на основе бухгалтерской отчетности с дополнительной поправкой на вероятность банкротства [5]. Модель рассчитывает прогнозную вероятность банкротства и ожидаемых убытков кредитных организаций.

В работе [6] рассматривается «Ooghe-Joos-DeVos» модель (учитывающая восемь факторов для одного года и шесть факторов для трех лет) предсказания банкротства компаний и проведено

<sup>6</sup> URL: <https://www.bis.org/bcbs/index.htm> (дата обращения 25.05.2021).

<sup>7</sup> URL: <https://www.sec.gov/news/press/2009/report102109.pdf> (дата обращения 01.06.2021).

<sup>8</sup> URL: <https://www.moodyanalytics.com/product-list/riskcalc> (дата обращения 05.01.2021).

исследование точности предсказания банкротства по ошибке первого рода «кредитного риска» (банкротные фирмы определены как небанкротные) и ошибке второго рода «коммерческого риска» (небанкротные фирмы определены как банкротные). Ошибки обоих родов этой модели лежат в диапазоне 14–33 % на выборке из 280 тыс. компаний Бельгии, из которых 6,5 % были банкротными.

Среди работ, имеющих в базе российской научной электронной библиотеки РИНЦ<sup>9</sup> на 01.05.2021, с ключевым словом «стресс-тест» удалось обнаружить всего девять публикаций по банковскому сектору и одну публикацию по нефинансовым организациям. В статье [7] приводится обзор различных подходов по формированию стресс-тестов в финансовой сфере.

В основном для стресс-тестирования используются модели регрессионного типа, имитационные модели не применяются. В работе [8] приведен краткий обзор публикаций по стресс-тестированию предприятий. В частности, выделяются три способа оценивания (эконометрический, дискриминантный, смешанный), а также пять подходов по набору переменных: рыночный, микроэкономический (балансовый), макроэкономический, гибридный, рейтинговый. Кроме того, в данной работе рассматривается подход к стресс-тестированию компаний реального сектора российской экономики на основе отчетности предприятий, микроотраслевых показателей, а также прогнозов отраслевых показателей в рамках макроэкономических прогнозов, делается обзор возможных подходов к оценке вероятности дефолта (банкротства) организации.

В работах [9, 10] рассматриваются финансовые коэффициенты, разработанные на основе бухгалтерской отчетности организаций, по их корреляции с дефолтами организаций.

Применение моделей Альтмана (пять факторов) для выборки предприятий Оренбургской области [11] показало, что точность прогнозирования банкротства в течение четырех лет составляет 20 %. Модель предсказания банкротства Ольсона (девять факторов) показывает точность порядка 20 % в течение года.

Принципы корпоративных финансов включают в себя [12] понятия вероятности возникновения рисков и определение возможного ущерба. Для оценки ущерба целесообразно применение математических моделей.

Актуальные задачи стресс-тестирования требуют анализа влияния совокупностей факторов внутренней и внешней среды на исследуемые целевые показатели финансового состояния. При решении таких задач, по мнению авторов, целесообразно применение концепции критических (аварийных) комбинаций событий [13, 14]. Данная концепция подразумевает анализ влияния отдельных факторов с учетом их контекста в виде причинно-следственных связей с другими факторами. Это позволяет учесть то обстоятельство, что относительно незначимые по отдельности события могут складываться в определенном порядке и давать синергетический эффект. Для предупреждения развития нежелательных эффектов подобного рода потребуются комплексы мер, определяемых по предлагаемому в концепции алгоритмам [15]. При этом исследование влияния критических комбинаций факторов важно начинать с анализа частного влияния отдельных рассматриваемых факторов с учетом возможных существенных причинно-следственных связей рассматриваемого фактора с остальными переменными.

В работе [16] выполнен обзор методов однофакторных стресс-тестов для банков. В работе [17] рассматривается регрессионная модель выявления влияющих факторов на финансовую устойчивость (в данном случае – зависимость от источников финансирования) предприятий на примере пищевой отрасли Украины по панельным открытым данным.

Приказом Министерства экономического развития РФ от 13 мая 2020 г. № 276 (см. сноску 4) установлено, что необходимо ежемесячно формировать сценарии оценки устойчивости системообразующих организаций России и определять категорию риска организации. Разработан перечень отраслей российской экономики, в наибольшей степени пострадавших в условиях ухудшения ситуации в результате распространения новой коронавирусной инфекции<sup>10</sup>. Выделено 12 отраслей, деятельность которых была фактически парализована в условиях действовавших ограничений, в частности транспортная деятельность, организация досуга и развлечений, гостиничный бизнес и общественное питание, деятельность по предоставле-

<sup>9</sup> URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения 02.05.2021).

<sup>10</sup> Постановление Правительства РФ от 03.04.2020 N 434 (ред. от 16.10.2020) «Об утверждении перечня отраслей российской экономики, в наибольшей степени пострадавших в условиях ухудшения ситуации в результате распространения новой коронавирусной инфекции». URL: <https://base.garant.ru/73846630/> (дата обращения 25.05.2021).



нию бытовых услуг населению. Кроме того, Минэкономразвития России разработало перечень 1392 системообразующих предприятий по состоянию на 20.05.2021<sup>11</sup>.

По мнению авторов, данная работа не получила продолжения по причинам отсутствия надежных инструментов для проведения стресс-тестирования нефинансовых организаций, что подчеркивает научно-практическую значимость предложенного в настоящей работе подхода.

Цель данной статьи заключается в разработке методики определения значений параметров математической модели процесса стресс-тестирования, обеспечивающих неотрицательность величины денежного остатка нефинансовой организации на различных временных интервалах управления при значительных возмущениях внешней среды. Данная методика отличается от существующих использованием модели прогнозирования финансово-экономического состояния предприятия в аналитическом виде, что позволило получить аналитическое решение обратной задачи и значительно уменьшить временную сложность разработанных алгоритмов.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЩИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ

Модель прогнозирования финансового состояния предприятия является ключевой в проведении стресс-теста [18]. Однако, как показывает практика, при использовании данного формального аппарата не решается задача формирования математической модели для стресс-тестирования предприятий, позволяющая определить условия неотрицательности величины остатка денежных средств на конец прогнозного периода при известных ограничениях на материальные и финансовые ресурсы предприятия.

Необходимо разработать модель для управления предприятием по критерию величины денежного потока в условиях значительных неблагоприятных воздействий со стороны внешней среды, например, таких, как локдаун и падение потребительского спроса («нокдаун для бизнеса»).

В общем виде процедура стресс-тестирования нефинансовых организаций представлена информационно-логической схемой, изображенной на рисунке.

Одной из наиболее важных, по мнению авторов, является задача стресс-тестирования нефинансовых организаций.

Пусть  $F(x, u, t)$  – основной финансово-экономический критерий деятельности предприятия, где  $x$  – вектор параметров,  $u$  – вектор управляющих параметров,  $t$  – время.

Для анализа «критических факторов» деятельности предприятия можно выделить один существенный показатель: прогноз наличия денежных средств на конец прогнозного периода

$$F(x, u, t) = Cash_t.$$

Критическая важность этого критерия обусловлена тем, что при условии  $Cash_t \geq 0$  предприятие продолжает работать (по крайней мере, по финансовым условиям), а при  $Cash_t < 0$  произойдет остановка деятельности из-за реальной неплатежеспособности.

Пусть в результате решения прямой задачи расчета прогноза получено, что  $F(x, u, t) = Cash_t < 0$ . В расчетном прогнозе значение показателя  $Cash_t$  может быть менее нуля, но по факту отрицательного остатка активов (к которым относятся денежные средства) не бывает. Такой прогноз неосуществим. Фактически это может свидетельствовать о несбалансированности финансовых планов организации и ее возможной неплатежеспособности (банкротстве). Частое рассуждение: в случае отрицательного остатка денежных средств предприятие «влезает» в долги. Но тем самым предполагаются две операции: увеличение заемных средств (долгов) и увеличение денежных средств (до неотрицательной величины).

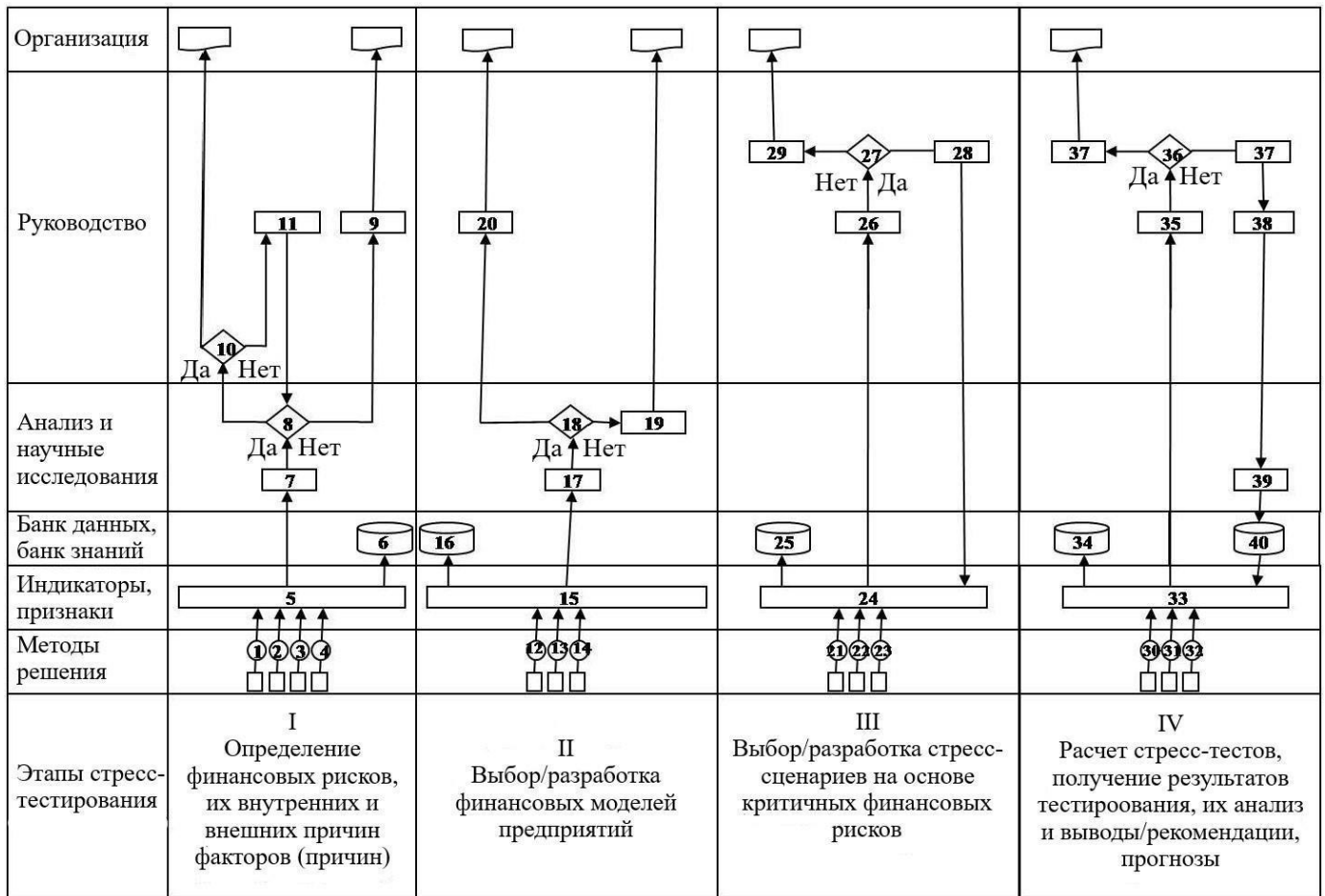
Задача: разработать математическую модель для стресс-тестирования предприятий, позволяющую определить условия для неотрицательности величины остатка денежных средств на конец прогнозного периода при известных ограничениях на материальные и финансовые ресурсы предприятия.

В общем виде решение не единственно и определяется некой гиперповерхностью  $U$  параметров  $u$ . Для упрощения зафиксируем все параметры, кроме одного – изменения выручки (обозначим его  $u_1$ ). Ставится «обратная задача»: найти предельное значение параметра  $u_1$ , при котором

$$F(x, u_1, t) = Cash_t = 0.$$

В силу аналитического вида предложенной ниже модели прогнозирования финансового состояния, решение обратной задачи возможно в аналитическом виде, что существенно упрощает расчеты и возможные исследования.

<sup>11</sup> URL: <https://data.economy.gov.ru/analytics/facilities/industry> (дата обращения 20.05.2021).



**Информационно-логическая схема осуществления процессов стресс-тестирования нефинансовых организаций:** 1–4 – параметрический метод, регрессионный анализ, историческое моделирование, метод аналогичных компаний; 5 – выбор метода анализа рисков на основании современных индикаторов и признаков; 6 – фиксация результатов в базе данных и знаний компании; 7 – обоснование и тестирование выбираемых рисков, полноты комплекса влияющих на них факторов; 8 – «результаты анализа удовлетворительны?»; 9 – вернуться к блоку 5; 10 – «руководство одобряет выбранные риски и факторы?»; 11 – вернуться к анализу результатов первого этапа (блок 8); 12 – анализ исторических данных; 13 – экспертные методы; 14 – методы определения устойчивости параметров модели к стресс-факторам и горизонтам использования модели; 15 – выбор финансовой модели организации; 16 – занесение в базу данных и знаний; 17 – определение точности модели на рассматриваемых горизонтах; 18 – «точность модели удовлетворительна?»; 19 – вернуться к определению горизонтов и др.; 20 – утверждение у руководителя аналитического отдела; 21–23 – методы разработки стресс-сценариев; 24 – выбор базового множества стресс-сценариев; 25 – занесение в базу данных и знаний; 26 – оценка руководством организации выработанных сценариев; 27 – «соответствует ли рассматриваемый спектр сценариев текущим требованиям к полноте и точности решения задачи?»; 28 – выбор актуальных процедур и ответственных исполнителей по доработке рассматриваемого спектра сценариев; 29 – подготовка промежуточных итогов; 30 – моделирование; 31 – анализ результатов; 32 – формирование выводов; 33 – формирование вариантов ответов на основные поставленные вопросы на базе полученных выводов; 34 – занесение в базу данных и знаний; 35 – представление результатов; 36 – «получены ли в результате стресс-тестирования удовлетворительные ответы на поставленные вопросы?»; 37 – подготовка к представлению полученных решений для реализации; 38 – детализация претензий к результатам стресс-тестирования; 39 – анализ обновленных требований; 40 – обновление баз данных и знаний

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СТРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ

Перечень финансово-экономических показателей верхнего уровня определяется финансовой отчетностью предприятия. Выбор такого комплекса показателей обусловлен наличием открытых данных о финансовой отчетности. Для реального управления руководство предприятия использует значительно более широкий перечень показателей управленческой отчетности, недоступной внешним

пользователям. Рассматриваемый подход разработан с учетом этого факта. На «верхнем» уровне на основе открытой информации определяются направления изменения параметров, которые уточняются на «нижнем» уровне с использованием информации, доступной менеджменту.

Предлагается подход к построению математической модели, основную идею которой можно описать следующим образом.

- Финансовое состояние организации описывается совокупностью баланса (состояния на опре-



деленную дату) и отчета о доходах/расходах (прироста за период).

- Выделяются «драйверы» роста. В настоящей работе в таком качестве используется выручка (объем продаж).

- Прогнозируются параметры управления. Так как технологии производства и бизнес-процессы управления достаточно инерционны<sup>12</sup>, удельные характеристики финансового состояния принимаются постоянными или незначительно изменяющимися за прогнозный период. Такой подход называют методом процента от продаж [19, 20].

- В общем виде прогноз показателей финансово-экономической деятельности рассчитывается как

$$x_t = x_{t-1}(x_{t-1}, u),$$

где  $x$  – вектор переменных модели, соответствующих финансово-экономическим параметрам предприятия,  $u$  – вектор управления.

Для прогнозирования различных показателей используются различные подмодели прогнозирования [18]. Например, прогноз дебиторской задолженности осуществляется по формуле

$$Y_t = l_{Y_t} S_t,$$

где  $Y$  – выделенный показатель из вектора  $x$ , соответствующий дебиторской задолженности, тыс. руб.;  $S$  – выручка, тыс. руб./год;  $l_Y$  – срок оборачиваемости выделенного показателя (дебиторской задолженности), в годах. В последующих формулах для показателей, измеряемых в денежных единицах, значения также указываются в тыс. руб., для показателей оборачиваемости – в годах.

Срок оборачиваемости определяется по среднему коэффициенту срока оборачиваемости прошлых периодов

$$l_{Y_t} = \frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^{t-1} \frac{Y_j}{S_j}.$$

Возможно использование линейной зависимости вида  $l_{Y_t} = A_Y S_t + B_Y$ , где  $A_Y$  и  $B_Y$  – коэффициенты линейной регрессии. Линейная регрессия представляет собой один из простейших подходов, не исключено (но авторам не встречалось на практике использования в организациях реального сектора экономики) применение более сложных видов регрессий для экономических расчетов.

Содержательно срок оборачиваемости запасов определяется технологическими и управленчески-

ми бизнес-процессами: технологическими операциями, внутрипроизводственными перемещениями, процессами закупки и доставки товарно-материальных ценностей. Такие процессы инерционны и для предприятий со сложившимися технологиями являются достаточно устойчивыми. Это позволяет предполагать, что при неизменности бизнес-процессов срок оборачиваемости останется неизменным (или с небольшим изменением) на следующий прогнозный период.

- Учитывается взаимосвязь баланса и отчета о доходах/расходах: нераспределенная прибыль увеличивает собственный капитал.

- Формируется прогноз денежного потока косвенным методом<sup>13</sup>. При превышении прогнозных активов над прогнозными пассивами формируется отрицательный остаток денежных средств. Это свидетельствует о неплатежеспособности предприятия.

- Рассматриваются и реализуются мероприятия по устранению дефицита денежных средств в реальном управлении. В модели стресс-тестирования ограничимся фиксацией предельного значения выручки, которое приводит к неплатежеспособности, а параметры управления «не успевают» за «стрессовое» время повысить эффективность системы и остаются постоянными.

В реальном управлении чаще всего одновременно происходит изменение нескольких параметров. Для прогнозирования поведения предприятия (с ориентацией на производство) необходимо задать сценарии изменения параметров продаж, производства, закупок, потребности в оборотных активах и т. п. Общее количество декартова множества сочетаний комбинаций параметров составляет  $N_i \times N_j \times N_l \times N_m \times N_f \times N_d$ , где  $N_i$  – количество видов продукции;  $N_j$  – количество видов ресурсов;  $N_l$  – количество видов валют;  $N_m$  – количество видов оборудования;  $N_f$  – количество статей постоянных затрат;  $N_d$  – количество кредитов.

«Прямые расчеты» могут быть трудо-, время- и вычислительноемкими. Но главное – не обеспеченными информацией в оперативном режиме. Один из вариантов поиска критического сочетания параметров – анализ Монте-Карло при задании распределения вероятностей по каждому параметру. Отметим, что на многих предприятиях нет готовой информации о вероятностном распределении параметров, а ее сбор и обработка – достаточно трудоемкая процедура, и такой подход фактически не реализуем.

<sup>12</sup> При существенном изменении характеристик финансового состояния дополнительно необходимы подмодели прогнозирования этих параметров.

<sup>13</sup> В данной работе важен именно косвенный метод движения денежных средств, так как он позволяет увязать денежный поток с изменением статей баланса.

В данной работе рассмотрим другой подход – использование суммарных значений показателей и рассмотрение сценариев их изменения.

Запишем математическую модель расчета остатка денежных средств  $Cash$  на конец периода

$$Cash_t = Cash_{t-1} + CF_t, \quad (1)$$

где  $Cash$  – остаток денежных средств;  $CF$  – денежный поток;  $t$  – индекс периода (времени).

Поток денежных средств определяется косвенным методом с помощью формулы (индекс времени  $t$  опустим для упрощения вида формул в рамках одного периода):

$$CF = Pr + Am - I + \Delta D, \quad (2)$$

где  $Pr$  – нераспределенная прибыль;  $Am$  – амортизация;  $I$  – инвестиции;  $\Delta D$  – изменение долга.

Нераспределенная прибыль прогнозного периода определяется формулой

$$Pr = (S(1-v) - FC - r_D D)(1-r_\tau)(1-r_u), \quad (3)$$

где  $v$  – доля переменных расходов;  $FC$  – условно-постоянные расходы без процентов;  $D$  – долг (кредиты);  $r_D$  – ставка процентов по кредитам;  $r_\tau$  – ставка налога на прибыль;  $r_u$  – доля чистой прибыли на потребление (дивиденды).

Чистые инвестиции определяются как прирост внеоборотных активов по остаточной стоимости с учетом амортизации и изменения чистого оборотного капитала:

$$I - Am = \Delta FA + \Delta WC = n_{FA} FA + l_{WC} \Delta S, \quad (4)$$

где  $FA$  – внеоборотные активы;  $WC$  – чистый оборотный капитал, равный разности оборотных активов и текущих пассивов;  $n_{FA}$  – прирост остаточной стоимости внеоборотных активов;  $l_{WC}$  – срок оборачиваемости чистого оборотного капитала.

Математическая модель с учетом суммарных значений показателей будет иметь вид:

$$Cash_t = Cash_{t-1} + (S(1-v) - FC - r_D D) \times (1-r_\tau)(1-r_u) - (\Delta FA + \Delta WC) + \Delta D.$$

#### 4. СТРЕСС-ТЕСТ КАК СЦЕНАРИЙ ИЗМЕНЕНИЯ РЯДА ПАРАМЕТРОВ

Формулирование сценариев стресс-тестирования является сложной частью работы, так как содержательно необходимо описать изменение целевых показателей, показателей эффективности, учесть влияние программы развития и т. п. Но в «шоковом» варианте многие параметры не успевают измениться, и это упрощает и формулирование задачи, и вычисления.

В данной работе будем рассматривать однофакторный стресс-тест (изменение одного параметра).

Предложенная модель прогнозирования позволяет провести анализ и параметрические расчеты для большого количества параметров, но это выходит за рамки текущей статьи.

По каждому параметру введем коэффициент влияния стресс-теста на данный параметр. Ситуация стресс-теста предполагает негативные влияния, что приводит к уменьшению выручки, экономии затрат, сокращению инвестиций и т. п. Поэтому, как правило, эти коэффициенты принадлежат отрезку  $[0, 1]$ . При увеличении показателей коэффициент будет больше единицы.

Будем рассматривать следующий сценарий изменения факторов:

- Основной параметр – уменьшение выручки: падение спроса, уменьшение объема продаж  $k_S < 1$ .

- Сокращения прямых (условно-переменных) расходов реализованной продукции не происходит: удельные переменные затраты постоянны ( $k_V = 1,0$ ).

- Фонд оплаты труда сохраняется на прежнем уровне (или уменьшается не более, чем на 10 %) из-за требования сохранить занятость работников;  $k_{ФОТ} = 0,9-1,0$  при сохранении численности,  $k_{ФОТ} = 0,5-0,9$  при сокращении численности.

- Сокращения накладных (условно-постоянных) расходов реализованной продукции не происходит: условно-постоянные расходы (административные и коммерческие расходы) не изменяются ( $k_{FC} = 1,0$ ).

- Изменения учетной политики не происходит: сальдо прочих доходов/расходов не изменяются (отметим, что это достаточно крупные суммы, сопоставимые с прибылью от продаж, и расшифровки их, как правило, недоступны):  $k_{OthInc} = 1,0$ .

- Запасы изменяются под влиянием двух факторов:

- пополнение непроданных товаров из-за инертности производства; коэффициент реагирования производства  $k_P = 1$  для инерционных производств с прежней производственной программой,  $k_P = 0$  для организаций с быстрой перестройкой закупок / производства / продаж;

- сокращение срока оборачиваемости.

- Изменение дебиторской задолженности может проходить в «шоковом» состоянии (т. е. она приходит в резко уменьшенном объеме): у покупателей тоже отмечается падение продаж и поступления денежных средств. В данной работе рассмотрен сценарий «умеренного» шока – дебиторская задолженность уменьшается пропорционально выручке.

- Погашение кредиторской задолженности перед контрагентами по оплате затрат производится пропорционально затратам.





• Кратко- и долгосрочные кредиты не погашаются (для упрощения объединим их), или  $k_D = 1,0$ . Это важное предположение, так как банки должны (могут) потребовать досрочного погашения кредитов при нарушении банковских ковенантов.

• Инвестиционная программа выполняется в сокращенном варианте с коэффициентом  $k_{FA}$  (в варианте без изменения  $k_{FA} = 1$ ).

В «шоковом» сценарии резко изменяются параметры внешней среды, и организация не успевает изменить параметры и бизнес-процессы внутреннего управления и вынуждена соответствовать критериям стресс-теста без возможности внутреннего изменения.

В данной работе рассматривается сценарий падения выручки в течение анализируемого периода. На практике могут быть более сложные сценарии: уменьшение выручки, но вслед за этим и сокращение затрат, а также оптимизация активов. Более того, на многих предприятиях к концу года завершается производство и отгрузка продукции, и годовая финансовая отчетность «не замечает» внутригодового роста оборотных активов (запасов, авансов выданных, задолженности покупателей). В ситуации падения выручки эти оборотные активы «замораживаются», и последствия являются более серьезными.

## 5. МОДЕЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ «НЕРИСКОВОГО» РАЗВИТИЯ

Система уравнений (1)–(5) с учетом сценарных параметров стресс-тестирования будет иметь следующий вид.

Изменение нераспределенной прибыли описывается уравнением

$$Pr_C = (k_S S(1 - k_v v) - k_{FA} FC - k_D r_D D) \times (1 - r_t)(1 - r_u), \quad (6)$$

где  $k_S$  – коэффициент изменения выручки;  $k_v$  – коэффициент изменения удельных переменных затрат;  $k_{FC}$  – коэффициент изменения постоянных затрат;  $k_D$  – коэффициент изменения процентов по кредитам;  $S$  – индекс стресс-теста.

Прирост активов (внеоборотных и оборотных) определяется инвестициями.

Запасы учитываются по фактическим затратам, состояние запасов на конец  $t-1$ -го периода описывается уравнением

$$\begin{aligned} Inv_{t-1} &= l_{Inv} TC_{t-1}, \\ VC &= v S, \\ TC &= VC + FC = v S + FC, \end{aligned}$$

где  $Inv$  – запасы (*Inventory*);  $l_{Inv}$  – срок оборачиваемости запасов;  $TC$  – полные затраты (без процентов по кредитам);  $VC$  – условно-переменные затраты.

Состояние запасов на конец  $t$ -го периода с учетом затоваривания описывается уравнением

$$Inv_t = k_{Inv} l_{Inv} TC_t - k_p (TC_t - TC_{t-1}),$$

где  $k_{Inv}$  – коэффициент изменения запасов;  $k_p$  – коэффициент реагирования производства.

Инвестиции в запасы (компонент оборотного капитала) описываются уравнением

$$\begin{aligned} \Delta Inv_C &= Inv_t - Inv_{t-1} = k_{Inv} l_{Inv} TC_t - \\ &- l_{Inv} TC_{t-1} - k_p (TC_t - TC_{t-1}). \end{aligned} \quad (7)$$

Для инерционного производства  $k_p = 1$ , при  $k_{Inv} = 1$  получаем  $\Delta Inv_C = Inv_t - Inv_{t-1} = (l_{Inv} - 1) \times (TC_t - TC_{t-1})$ .

Дебиторская задолженность на конец периодов  $t-1$  и  $t$  описывается уравнениями

$$\begin{aligned} AR_{t-1} &= l_{AR} S_{t-1}, \\ AR_t &= k_{AR} l_{AR} S_t, \end{aligned}$$

где  $AR$  – дебиторская задолженность (*Accounts Receivable*);  $k_{AR}$  – коэффициент изменения дебиторской задолженности;  $l_{AR}$  – срок оборачиваемости дебиторской задолженности.

Инвестиции в дебиторскую задолженность (компонент оборотного капитала) описываются уравнением

$$\begin{aligned} \Delta AR_C &= k_{AR} l_{AR} S_t - l_{AR} S_{t-1} = \\ &= l_{AR} (k_{AR} S_t - S_{t-1}). \end{aligned} \quad (8)$$

Кредиторская задолженность на конец периодов  $t-1$  и  $t$  описывается уравнениями

$$\begin{aligned} AP_{t-1} &= l_{AP} TC_{t-1}, \\ AP_t &= k_{AP} l_{AP} TC_t, \end{aligned}$$

где  $AP$  – кредиторская задолженность (*Accounts Payable*);  $k_{AP}$  – коэффициент изменения кредиторской задолженности;  $l_{AP}$  – срок оборачиваемости кредиторской задолженности.

Инвестиции в кредиторскую задолженность (компонент оборотного капитала) описываются уравнением

$$\begin{aligned} \Delta AP_C &= k_{AP} l_{AP} TC_t - l_{AP} TC_{t-1} = \\ &= l_{AP} (k_{AP} TC_t - TC_{t-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Изменение оборотного капитала описывается уравнением

$$\begin{aligned} \Delta WC_C &= l_{Inv} (k_{Inv} TC_t - TC_{t-1}) - k_p (TC_t - TC_{t-1}) + \\ &+ l_{AR} (k_{AR} S_t - S_{t-1}) - l_{AP} (k_{AP} TC_t - TC_{t-1}), \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta WC_C = & (k_{AR} l_{AR} S_t - l_{AR} S_{t-1}) + \\ & + (k_{Inv} l_{Inv} - k_{AP} l_{AP} - k_p) TC_t - \\ & - (l_{Inv} - l_{AP} - k_p) TC_{t-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Инвестиционная программа выполняется с коэффициентом  $k_{FA}$  (в варианте без изменения  $k_{FA} = 1$ ):

$$\Delta FA_C = k_{FA} n_{FA} FA_{t-1},$$

где  $k_{FA}$  – коэффициент изменения инвестиций во внеоборотные активы.

Инвестиции во внеоборотные и оборотные активы за вычетом кредиторской задолженности равны

$$\begin{aligned} I_C = & k_{FA} n_{FA} FA_{t-1} + (k_{AR} l_{AR} S_t - l_{AR} S_{t-1}) + \\ & + (k_{Inv} l_{Inv} - k_{AP} l_{AP} - k_p) TC_t - \\ & - (l_{Inv} - l_{AP} - k_p) TC_{t-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Изменение задолженности по кредитам описывается уравнением

$$\Delta D_C = (k_D - 1) D_{t-1}, \quad (12)$$

где  $k_D$  – доля непогашенных кредитов.

Обозначим для краткости  $r_{tu} = (1 - r_\tau)(1 - r_u)$ ,  $l_{TC1} = (l_{Inv} - l_{AP} - k_p)$ ,  $l_{TC} = (k_{Inv} l_{Inv} - k_{AP} l_{AP} - k_p)$ .

Условие неотрицательности остатка денежных средств  $Cash_t$  с учетом формул (5)–(12) имеет вид

$$\begin{aligned} Cash_t = & Cash_{t-1} + (k_D - 1) D_{t-1} - \\ & - k_{FA} n_{FA} FA_{t-1} + (S_t(1 - k_v v) - k_{FC} FC_t - k_D r_D D_{t-1}) r_{tu} - \\ & - [(k_{AR} l_{AR} S_t - l_{AR} S_{t-1}) + l_{TC} (k_v v S_t + FC_t) - l_{TC1} TC_{t-1}] \geq 0, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} Cash_t = & Cash_{t-1} + (k_D - 1) D_{t-1} - k_{FA} n_{FA} FA_{t-1} + \\ & + S_t [(1 - k_v v) r_{tu} - k_{AR} l_{AR} - l_{TC} k_v v] - \\ & - (k_{FC} FC_t + k_D r_D D_{t-1}) r_{tu} - \\ & - l_{TC} FC_t + l_{AR} S_{t-1} + l_{TC1} TC_{t-1} \geq 0. \end{aligned}$$

Модель финансового прогнозирования позволяет решать обратную задачу в аналитическом виде: определить предельные значения сценарных параметров эффективности, еще обеспечивающих выполнение условий стресс-теста.

Для однофакторного теста предельное изменение выручки для условия  $Cash_t = 0$  с учетом  $S_t = k_S S_{t-1}$  составляет

$$k_S^{\Delta} = - \frac{Z}{S_{t-1} [(1 - k_v v) r_{tu} - k_{AR} l_{AR} - l_{TC} k_v v]},$$

$$\begin{aligned} Z = & Cash_{t-1} + (k_D - 1) D_{t-1} - k_{FA} n_{FA} FA_{t-1} - \\ & - (k_{FC} FC_t + k_D r_D D_{t-1}) r_{tu} - l_{TC} FC_t + l_{AR} S_{t-1} + l_{TC1} TC_{t-1}, \end{aligned}$$

где «д» – индекс бездефицитности.

Комплекс параметров  $Cash_{t-1} + (k_D - 1) D_{t-1} - k_{FA} n_{FA} FA_{t-1}$  учитывает переходящий остаток денежных средств, погашение долга и чистые инвестиции во внеоборотные активы. Комплекс параметров  $(1 - k_v v) r_{tu} - k_{AR} l_{AR} - l_{TC} k_v v$  показывает влияние выручки на остатки денежных средств через переменные затраты и переменную часть инвестиций.

## 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДЛЯ ОДНОГО СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В качестве иллюстрирующего примера выполнены «кабинетные» расчеты для ведущего машиностроительного предприятия России с помощью имитационной модели прогнозирования финансовой отчетности. Рассмотрена одна из системообразующих организаций автомобильной промышленности<sup>14</sup> (ИНН 6320002223). Данные для расчета получены из открытых источников информации за 2012–2018 гг. из Росстата<sup>15</sup>, за 2019–2020 гг. – из Федеральной налоговой службы<sup>16</sup> (ФНС).

Для расчетов используем имитационную модель, формульная модель несколько упрощена для сокращения количества параметров. Для прогнозирования прибыли в качестве переменной части расходов будем рассматривать себестоимость продаж. Управленческие и коммерческие расходы, а также сальдо прочих доходов и расходов будем считать условно-постоянными расходами. Для рассматриваемого предприятия выгрузка по отчету о финансовых результатах приведена в столбце «Факт» в таблице. Расчет за очередной год (2020 г.) проведен по исходным данным предыдущего года (2019 г.). Укрупненный прогноз финансовой отчетности и денежного потока представлен таблице. В верхней части показан прогноз доходов/расходов, в нижней – активов и пассивов; в первом столбце – наименования статей, во втором – фактическая информация согласно представленной отчетности; в третьем столбце – изменение параметров эффективности по стресс-тесту; в четвертом столбце – расчет статей при изменении эффективности; пятый столбец – оценка вклада статьи в денежные потоки.

Дадим комментарии по некоторым статьям. В сценарии стресс-теста рассматривается уменьшение выручки на заданный процент. Изменения других параметров эффективности в части доходов/расходов нет. Результат – практически бездефицитность, переходящий остаток денежных средств уменьшается до нуля отрицательным денежным потоком.

<sup>14</sup>URL: <https://www.rusprofile.ru/accounting?ogrn=1026301983113> (дата обращения 14.08.2021).

<sup>15</sup> URL: <https://rosstat.gov.ru/opendata/7708234640-7708234640bdboo2018> (дата обращения 20.05.2021).

<sup>16</sup> URL: <https://bo.nalog.ru/> (дата обращения 20.05.2021).



### Прогноз показателей финансовой отчетности при стресс-тесте, млн руб.

Статьи доходов/расходов	Факт 2019 г.	Изменение, %	Прогноз при стресс-тесте	Увеличение прибыли
Выручка	292 010	-22,2	227 165	-4 543
Себестоимость проданных товаров (Ф.2)	-271 533	-	-211 251	0
Административные, коммерческие расходы	-16 353	-	-16 353	0
Сальдо процентов по кредиту	-5 306	-	-5 306	0
Прочие доходы/расходы	-481	-	-481	0
Налог на прибыль	-423	-	0	423
Чистая прибыль	385	-	-3 734	-4 120
Нераспределенная прибыль	385	-	-3 734	-4 120
Статьи активов/пассивов	Факт 2019 г.	Изменение, %	Прогноз баланса	Увеличение денежных средств
Внеоборотные активы	93 704	0,0	93 704	0
Запасы	15 316	-22,2	11 915	3 401
Дебиторская задолженность покупателей	19 179	-22,2	14 920	4 259
Прочие оборотные активы	344	-	344	0
Денежные средства, краткосрочные финансовые вложения	5 253	-100,0	0	5 253
Кредиторская задолженность	41 335	-22,2	32 156	-9 179
Прочие текущие пассивы	5 465	-	5 465	0
Кредиты долгосрочные	81 350	-	81 350	0
Кредиты краткосрочные	4 876	-	4 876	0
Условный капитал	55 750	-	55 750	0
Нераспределенная прибыль	-143 636	-	-147 370	-3 734
Прочие статьи собственного капитала	88 659	-	88 659	0
<b>Итого убыток (+)/дефицит (-) финансирования</b>	<b>0</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Уменьшение выручки, при котором обнуляются остатки денежных средств, в однофакторном стресс-тесте без изменения эффективности составляет  $k_s^{\Delta} = 22,2\%$ . Дополнительно укажем, что предельное значение падения выручки для безубыточности составляет около  $\Delta S_{\text{бу}} = -4,0\%$ . Предприятие чувствительно по критерию прибыли к падению выручки и не так сильно чувствительно по критерию остатка денежных средств в «шоковом» сценарии стресс-теста. Отметим, что большую часть отрицательного денежного потока в данном примере составляют убытки от операционной деятельности. Если компания успеет принять управленческие решения о сокращении затрат, приостановке инвестиций и уменьшении запасов, то результаты стресс-теста на один год будут мало зависеть от изменения выручки.

#### 7. УПРАВЛЕНИЕ: РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЕНСИРУЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Данный раздел не является частью процедуры собственно стресс-тестирования, однако в большинстве случаев стресс-тестирование проводится для понимания глубины проблем бизнеса и разработки компенсирующих мероприятий.

Общие направления повышения эффективности («система заблаговременной подготовки») практи-

чески общеизвестны и могут осуществляться уже при получении слабых сигналов о приближении кризисной ситуации. Как правило, при наступлении кризиса компенсирующие мероприятия применяются в ускоренном режиме, часть из них будет запаздывать и обладать малой полезностью, также могут применяться меры «хирургического» воздействия. Перечень возможных мероприятий и практика их применения (не претендуя на полноту) отражены в работах [19–22]. В целом рост финансового результата и денежного потока обеспечивается с помощью комплекса мероприятий:

- увеличение продаж (критерий – дополнительная (маржинальная) прибыль),
- сокращение технологических затрат,
- уменьшение цен на закупки,
- сокращение накладных затрат,
- сокращение финансово-производственного цикла,
- оптимизация инвестиционной программы,
- оптимизация ассортимента, включая структурные изменения по долям продукции и условиям финансирования.

Методы формирования и выбора перспективных проектов повышения эффективности описаны

в работах [23, 24]. Имитационной моделью, которая может помочь организациям в моделировании мероприятий поддержки, является система «ТЭО Инвест» [25]. В работе [26] рассмотрен перечень энергосберегающих технологий, позволяющих повлиять на сокращение затрат.

Опыт успешной реализации программ инновационного развития показывает, что за календарный год возможно дополнительно увеличить выручку на 20 %, сократить удельные расходы до 10 % и сроки оборачиваемости до 20 %. Отметим, что на многих предприятиях «знают» про направления повышения эффективности, но реализуют их не в полном объеме, особенно методы управления оборотным и основным капиталом и рисками, сосредоточившись на критерии прибыли.

Выработка сценариев стресс-тестов позволяет сконцентрироваться прежде всего на направлениях изменений, имеющих наибольшее влияние на целевые критерии и потенциал изменений.

По факту деятельности за 2020 г. падение выручки рассматриваемого предприятия составило 12,0 %, с 292 до 257 млрд руб. Данный показатель меньше значения, полученного при однофакторном стресс-тестировании. Был реализован комплекс мероприятий по улучшению экономического состояния. В частности:

- себестоимость проданных товаров уменьшилась на 13,1 % к значению базового года; доля переменных расходов не осталась неизменной, а уменьшилась на 1,1 % от выручки;

- административные, коммерческие расходы уменьшились на 12,9 %;

- отрицательное сальдо (разница) прочих доходов и расходов увеличилось в 7,5 раз;

- сальдо процентов по кредитам уменьшилось на 13,7 %.

Итого, нераспределенная прибыль составила 0,3 % от выручки.

Более значительные изменения произошли в активах и пассивах:

- запасы увеличились на 1,8 млрд руб., срок оборачиваемости запасов вырос с 20 до 26 дней;

- дебиторская задолженность увеличилась на 18,2 млрд руб., срок оборачиваемости дебиторской задолженности увеличился с 24 до 52 дней;

- внеоборотные активы увеличились на 9,7 млрд руб.; в кризисный год предприятие реализовало инвестиционную программу;

- кредиторская задолженность увеличилась на 30,1 млрд руб., срок ее оборачиваемости увеличился с 55 до 109 дней;

- кредиты увеличились на 41,4 млрд руб.

- остатки денежных средств увеличились на 42,8 млрд руб.

Увеличение кредитов близко к изменению остатка денежных средств. Увеличение кредиторской задолженности близко к росту дебиторской задолженности, запасов и инвестиций во внеоборотные активы. Предприятие смогло успешно функционировать в кризисном 2020 г.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В работе поставлена задача разработки подхода к стресс-тестированию нефинансовых организаций. Предложена модель стресс-тестирования в аналитическом виде, на основе финансового прогнозирования. Рассмотрена и решена обратная задача по определению «критического» изменения выручки для достижения бездефицитности организации (при постоянстве других параметров).

Рассмотрены сценарии стресс-тестирования с учетом особенностей промышленного предприятия.

Проведены расчеты по данным финансовой отчетности одного из ведущих предприятий страны, которые показывают, что «запас прочности» по падению выручки составляет менее 10 % и может быть признан критичным.

Применение процедур стресс-тестирования для нефинансовых организаций целесообразно для понимания запаса прочности компании, стратегических рисков бизнеса и, соответственно, разработки комплекса компенсирующих мероприятий для обеспечения устойчивости финансово-экономического состояния компании.

Отметим, что в представленной статье предложен метод определения одного параметра и оценки его изменения, необходимого для обеспечения неотрицательности прогнозируемого остатка денежных средств предприятия.

Однако изменение только одного параметра является частным случаем изменения нескольких параметров управления. Поэтому актуальна задача определения комбинаций нескольких параметров, относительно небольшие изменения которых будут в совокупности давать аналогичный результат. Такая задача может быть решена с привлечением концепции критических комбинаций событий в последующих работах.

Приведенный анализ фактических изменений показывает, что однофакторный стресс-тест является началом исследований допустимых параметров и их изменений. Предложенная модель может быть использована для анализа последствий эко-



номических кризисов, в частности кризиса, вызванного эпидемией COVID-19.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Zmijewski, M.E.* Methodological Issues Related to the Estimation of Financial Distress Prediction Models // *Journal of Accounting Research*. – 1984. – No. 22. – P. 59–82.
2. *Altman, E.I., Resti A., Sironi A.* Analyzing and explaining default recovery rates. A report submitted to International Swaps and Derivatives Dealers' Association. – London, 2001.
3. *Nehrebecka, N.* COVID-19: stress-testing non-financial companies: a macroprudential perspective. The experience of Poland // *Eurasian Economic Review*. 2021. – Vol. 11. – P. 283–319.
4. *Greene, J.R., Krouskos, S., Hood, J., et al.* The Stress Test Every Business Needs: A Capital Agenda for Confidently Facing Digital Disruption, Difficult Investors, Recessions and Geopolitical Threats. – Wiley, 2018.
5. *Кораблева И.* Измерение риска дефолта частных российских фирм с помощью модели Moody'sAnalyticsRiskCalc // Риск-менеджмент. – 2011. – № 3 (189). – С. 54–55. [*Korabljeva, I.* Izmerenie riska defolta chastnyh rossijskikh firm s pomoshh'ju modeli Moody'sAnalyticsRiskCalc // Risk-menedzhment. – 2011. – No. 3 (189). – S. 54–55. (In Russian)]
6. *Ooghe, H., Balcaen, S., Camerlynck, J.* The Ooghe-Joos-De Vos Failure Prediction Models: A Cross-Industry Validation // *Brussels economic review*. – 2003 – Vol. 46 – No. 1. – P. 39–70.
7. Андриевская И.К. Стресс – тестирование: обзор методологий // Управление в кредитной организации. – 2007. – № 5. – С. 88. [*Andrievskaya, I.K.*, Stress Testing: A Survey of Methodologies // *Upravlenie v kreditnoi organizatsii*. – 2007. – No. 5. – S. 88 (In Russian)]
8. *Сальников В.А., Могилат А.Н., Маслов И.Ю.* Стресс-тестирование компаний реального сектора для России: первый подход (методологические аспекты) // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2012. – No. 4(16). – С. 46–70. – <http://www.econorus.org/repec/journal/2012-16-46-70r.pdf>. [*Sal'nikov, V.A., Mogilat, A.N., Maslov, I.Ju.* Stress-testirovanie kompanij real'nogo sektora dlja Rossii: pervyj podhod (metodologicheskie aspekty) // *Zhurnal Novoj ekonomicheskoj associacii*. – 2012. – No. 4(16). – S. 46–70. (In Russian)]
9. *Помазанов М.В., Колоколова О.В.* Разработка формулы вероятности банкротства компании на базе показателей бухгалтерской отчетности // Оперативное управление и стратегический менеджмент в коммерческом банке. – 2004. – № 6. [*Pomazanov, M.V., Kolokolova, O.V.* Razrabotka formuly veroyatnosti bankrotstva kompanii na baze pokazatelej buhgalterskoj otchetnosti // *Operativnoeu pravlenie i strategicheskij menedzhment v kommercheskom banke*. – 2004. – No. 6. (In Russian)]
10. *Коссова Т.В., Коссова Е.В.* Оценка кредитного риска компаний российского корпоративного сектора на основе прогнозирования вероятности дефолта по обязательствам. // Проблемы анализа риска. – 2011. – Т. 8, № 2. – С. 68–78. [*Kossova, T.V., Kossova, E.V.* Ocenka kreditnogo riska kompanij rossijskogo korporativnogo sektora na osnove prognozirovaniya veroyatnosti defolta po obyazatel'stvam // *Problemy analiza riska*. – 2011. – Vol. 8, no. 2. – S. 68–78. (In Russian)]
11. *Евструпов М.В.* Оценка возможностей прогнозирования банкротства предприятий в России // Оренбург: Вестник ОГУ. – 2008. – № 85. – С. 25–32. [*Evpstropov, M.V.* Ocenka vozmozhnostej prognozirovaniya bankrotstva predpriyatij v Rossii // *Orenburg: Vestnik OGU*. – 2008. – No. 5. – S. 25–32. (In Russian)]
12. *Брейли Р., Майерс С.* Принципы корпоративных финансов: 7-е издание: Пер. с англ. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2017. – 1008 с. [*Brealey, R.A., Myers, S.C.* Principles of Corporate Finance, 7<sup>th</sup> Edition. – Irwin: McGraw-Hill, 2003. – 1120 p.]
13. *Богомолов А.С.* Предотвращение аварийных комбинаций событий при управлении человеко-машинными системами // Изв. Саратов. ун-та. Нов.сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Т. 19, вып. 2. – С. 196–206. [*Bogomolov, A.S.* Predotvrashhenie avarijnyh kombinacij sobytij pri upravlenii cheloveko-mashinnymi sistemami // *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mehanika. Informatika*. – 2019. – Vol. 19, vup. 2. – S. 196–206. (In Russian)]
14. *Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А.* и др. Моделирующий комплекс для анализа неблагоприятных сочетаний событий в авиационных транспортных системах // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 74–79. [*Bogomolov, A.S., Ivashchenko, V.A., Kushnikov, V.A., et al.* Modeling Complex for Critical Events Combinations Analysis in Aviation Transport Systems // *Control Sciences*. – 2018. – No. 1. – P. 74–79. (In Russian)]
15. *Резчиков А.Ф., Богомолов А.С.* Проблема предотвращения развития аварийных комбинаций событий в крупномасштабных системах // В сборнике: Управление развитием крупномасштабных систем. MLSD'2019. Материалы двенадцатой международной конференции. – Москва, 2019. – С. 1066–1069. [*Rezhnikov, A.F., Bogomolov, A.S.* Problema predotvrashheniya razvitiya avarijnyh kombinacij sobytij v krupnomasshtabnyh sistemah // *V sbornike: Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem. MLSD'2019. Materialy dvenadcatoy mezhdunarodnoj konferencii*. – Moskva, 2019. – S. 1066–1069. (In Russian)]
16. *Самсоненко Ф.А., Хамидуллин Ф.Ф.* Стресс-тестирование: краткий обзор методов // Вестник ТИСБИ. – 2017. – № 2. – С. 186–190. [*Samsonenko, F.A., Hamidullin, F.F.* Stress-testirovanie: kratkij obzor metodov // *Vestnik TISBI*. – 2017. – No. 2. – S. 186–190. (In Russian)]
17. *Лукьяненко И.Г.* Методы стресс-тестирования финансовой устойчивости предприятий Украины // Бизнес Информ. – 2013. – № 11. – С. 57–64. [*Luk'janenko, I.G.* Metody stress-testirovaniya finansovoj ustojchivosti predpriyatij Ukrainy // *Biznes Inform*. – 2013. – No. 11. – S. 57–64. (In Russian)]
18. *Дранко О.И.* Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. – 2007. – № 1. – С. 37–40. [*Dranko, O.I.* A Financial Prediction Model and Home Investment Scenarios // *Control Sciences*. – 2007. – No. 1. – P. 37–40. (In Russian)]
19. *Ириков В.А., Новиков Д.А., Тренёв В.Н.* Целостная система государственно-частного управления инновационным развитием как средство удвоения темпов выхода России из кризиса и посткризисного роста. – М.: ИПУ РАН, 2009. – 220 с. [*Irikov, V.A., Novikov, D.A., Trenjov, V.N.* Celostnaja sistema gosudarstvenno-chastnogo upravlenija innovacionnym razvitiem kak sredstvo udvoenija tempov vyhoda Rossii iz krizisa i postkrizisnogo rosta. – M.: IPU RAN, 2009. – 220 s. (In Russian)]
20. *Балашов В.Г., Ириков В.А., Иванова С.И.* Рост и прорыв в лидеры: практикум по преодолению кризиса. – М.: Дело, 2009. – 335 с. [*Balashov, V.G., Irikov, V.A., Ivanova, S.I.* Rost i

- proruy v lidery: praktikum po preodoleniju krizisa. – M: Delo, 2009. – 335 s. (In Russian)]
21. *Логиновский О.В., Голлаж А.В., Дранко, О.И.* и др. Эффективное управление организационными и производственными структурами: монография. – М: ИНФРА-М, 2020. – 450 с. [Loginovskij, O.V., Gollaj, A.V., Dranko, O.I., et al. *Jeffektivnoeu pravlenie organizacionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monografija.* – M.: INFRA-M, 2020. – 450 s. (In Russian)]
22. *Голов О.Е., Ириков В.А.* Инструменты и примеры повышения результативности и эффективности управления согласованным развитием региона и отраслей. – Уфа: Изд-во «Белая река», 2015. – 137 с. [Golov, O.E., Irikov, V.A. *Instrumenty i primery povyshenija rezul'tativnosti i jeffektivnosti upravlenija soglasovannym razvitiem regiona i otraslej.* – Ufa: Izd-vo «Belaj areka», 2015. – 137 s. (In Russian)]
23. *Дранко О.И., Отарашвили З.А., Сушков Д.В.* Формирование программы инновационного развития: управление стоимостью // Проблемы управления. – 2012. – № 6. – С. 26–31. [Dranko, O.I., Otarashvili, Z.A., Sushkov, D.V. *Cost Management under Program of Innovations // Control Sciences.* – 2012. – No. 6. – P. 26–31. (In Russian)]
24. *Буркова И.В., Россихина Л.В., Мецгерякова Т.В., Бурков В.Н.* Информационные технологии разработки систем управления развитием // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 10. – С. 95–105. [Burkova, I.V., Rossihina, L.V., Meshherjakova, T.V., Burkov, V.N. *Information Technologies for Development Management Systems // Automation and Remote Control.* – 2018. – Vol. 79, iss. 10. – S. 1813–1822.]
25. *Акинфиев В.К., Цвиркун А.Д.* Методы и инструментальные средства управления развитием компаний со сложной структурой активов. – М.: ИПУ РАН, 2020. – 307 с. [Akinfiev, V.K., Cvirkun, A.D. *Metody i instrumental'nye sredstva va upravlenija razvitiem kompanij so slozhnoj strukturoj aktivov.* – M.: IPU RAN, 2020. – 307 s. (In Russian)]
26. *Burkov, V., Burkova, I., Averina, T., Perevalova, O.* Integrated Technology for Creating a Development Management Systems in the Field of Energy Saving // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2021. – Vol. 1258. – S. 588–600.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Клочковым.*

*Поступила в редакцию 11.06.2021,  
после доработки 25.10.2021.  
Принята к публикации 25.10.2021.*

**Богомолов Алексей Сергеевич** – д-р техн. наук, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
✉ bogomolov@iptmuran.ru,

**Дворяшина Марина Михайловна** – канд. экон. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ dvoryashina@gmail.com,

**Дранко Олег Иванович** – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ olegdranko@gmail.com,

**Кушников Вадим Алексеевич** – д-р техн. наук, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, ✉ kushnikoff@yandex.ru,

**Резчиков Александр Федорович** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ rw4cy@mail.ru.



## STRESS TESTING OF NONFINANCIAL ORGANIZATIONS: AN ANALYTICAL APPROACH TO SOLVING THE REVERSE PROBLEM

A.S. Bogomolov<sup>1,2</sup>, M.M. Dvoryashina<sup>3</sup>, O.I. Dranko<sup>3</sup>, V.A. Kushnikov<sup>1</sup>, and A.F. Rezchikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute for Problems of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

<sup>2</sup>Saratov State University, Saratov, Russia

<sup>3</sup>Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ bogomolov@iptmuran.ru, ✉ dvoryashina@gmail.com, ✉ olegdranko@gmail.com,  
✉ kushnikoff@yandex.ru, ✉ rw4cy@mail.ru

**Abstract.** This paper considers an approach to stress testing of nonfinancial organizations. It includes the problem statement and a methodology for solving the reverse problem. The mathematical model is based on open-source data (the financial statements of companies). The relevance of this approach is increasing due to different-nature crises (economic crisis, the COVID-19 pandemic, etc.). The resilience of companies (especially “backbone” ones) to shock situations is tested, and preventive management measures are developed. The direct problem statement involves determining the company’s financial model parameters that ensure a nonnegative level of cash balance in the forecast period. The reverse problem is to find the characteristics of the financial and economic state of the enterprise that correspond to different critical combinations of its financial result parameters. We develop an original stress-testing methodology that significantly reduces the labor intensity and computational complexity compared to stress-testing technologies for financial institutions. A new analytical model is used. The model results are illustrated by an example: stress testing of a backbone enterprise in the real economy sector, which was significantly affected by restrictive measures in the COVID-19 pandemic. Model calculations employ open data from the organization’s financial statements.

**Keywords:** stress testing, critical combinations of parameters, risk management, financial forecasting, modeling, reverse problem, cash flow, operational efficiency, COVID-19.

# ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЯДРА КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В.Б. Гусев

**Аннотация.** Предметом исследования являются модель технологического ядра экономической системы, а также математические методы ее анализа. В качестве формализованного критерия эффективности структурных инноваций предложен показатель продуктивности. Формализована постановка оптимизационной задачи поиска равновесного состояния, доставляющего экстремум продуктивности технологического ядра экономики. Разработан метод эквивалентного преобразования модели с учетом достигнутых значений показателей. Доказан ряд утверждений о свойствах равновесного состояния. Это позволило построить многоэтапный процесс расчета траектории, приближающей экономическую систему к равновесному состоянию. Разработанная модель использует межотраслевой баланс национальных счетов экономики. Анализ модели заключается в определении предпочтительной структуры выпусков на этапах развития технологического ядра экономической системы. На основе данных для РФ приведен пример расчета поэтапного процесса изменения структуры выпусков, асимптотически приводящего технологическое ядро к максимуму продуктивности. Полученные результаты позволили оценить потенциал роста продуктивности экономики в рамках существующего технологического уклада, достигаемый путем ликвидации структурных диспропорций.

**Ключевые слова:** структурные диспропорции, технологическое ядро экономики, экстремум продуктивности, планы поэтапного развития, равновесное состояние.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на имеющийся высокий потенциал развития, современная экономика Российской Федерации сталкивается с кризисными явлениями. На макроуровне это низкий темп роста ВВП, критическая зависимость экономики от экспорта нефти и газа, неустойчивость и недооцененность валютного курса, малая доля обрабатывающей промышленности, зависимость от внешних санкций, неэффективность механизмов управления. Действие этих факторов обуславливает неполную реализацию потенциала экономики. Приведенные в настоящей статье результаты демонстрируют возможности повышения эффективности экономики, основанные на планомерной модификации структуры ее технологического ядра.

Предметом анализа является эффективное использование существующего технологического потенциала экономической системы и определение путей его развития [1, 2]. Сравнение таких показа-

телей, как производительность труда и темпы роста экономики в развитых странах, демонстрирует, что использование в них сопоставимых технологических процессов может приводить к разным результатам. В определенной степени такое различие можно объяснить структурными особенностями экономики этих стран. «Применительно к России все в большей степени приходит осознание того, что основные ограничения экономического роста в стране обусловлены структурой экономики: это неэффективная структура производства, непродуктивная структура доходов, отсталая структура экспорта, нерациональная региональная структура размещения производительных сил» [2]. Один из путей ускорения экономического роста может заключаться в поиске предпочтительной структуры видов экономической деятельности и путей реализации этой структуры. Как показывают расчеты, такая возможность обоснована.

Рассматриваемый метод анализа использует модель технологического ядра многоотраслевой





экономической системы. Под технологическим ядром экономической системы будем понимать совокупность доступных для наблюдения и измерения видов экономической деятельности, а также затрат, производимых для достижения результатов этой деятельности, достаточную для адекватного представления состояния этой системы. Примером технологического ядра является совокупность факторов, используемых Росстатом при формировании межотраслевого баланса в системе национального счетоводства [3, 4]. Модель технологического ядра описывает статическую картину влияния видов экономической деятельности на объемы поставляемых услуг и продукции. Параметры этого влияния характеризуют достигнутый уровень технологического развития экономики и возможные пределы его использования. Модели подмножеств технологического ядра могут иметь несколько разновидностей, включая либо только товары и услуги, либо также расходы на конечное потребление, накопление, чистый экспорт. В зависимости от разновидности модели интерпретации результатов будут разными. Основным источником данных – межотраслевой баланс – отражает объемы товаров и услуг, потребляемые разными отраслями и видами деятельности [5].

Существенно, что анализируемые технологические связи образуют устойчивую матрицу Шура удельных затрат полного ранга [6]. Это позволяет определять потенциал продуктивности (превышения выпусков над затратами в режиме автономности), а также получить способ повышения эффективности функционирования технологического ядра экономики путем вариации объемов выпуска и цен. Можно также осуществлять поиск «узких мест» в системе технологических взаимодействий: определять, какие услуги, переделы, отрасли на данный момент ограничивают рост ВВП (без их роста в остальных отраслях эффект роста отсутствует) и к какому эффекту может привести наращивание производства именно в этих критических отраслях. Решение этих вопросов базируется на применении оптимизационных задач с целевой функцией продуктивности технологического ядра экономики и различными типами ограничений [7]. В полученных решениях потенциальный спрос уравновешен предложением [8], а потому оптимальные объемы выпусков являются равновесными.

Развитие новых технологий – проблема с большой долей неопределенности. Не все, а скорее лишь малая часть инноваций эффективны и встраиваются в технологическую структуру экономики. Оценка потенциала новых технологий позволяет принимать решения по их включению в структуру

экономики. Кроме того, модель позволяет определять допустимое наращивание выпуска отраслей, значимых по неэкономическим критериям.

С помощью модели воспроизводства [9] многопродуктовой системы определяется мультипликатор выпусков (и показатель продуктивности экономической системы) как функция структурных пропорций выпусков и цен на производимые продукцию и услуги отраслей. Максимизация этого показателя, отображающего соотношение выпуска и затрат, определяет потенциал технологического ядра и сбалансированную структуру выпусков и цен в режиме воспроизводства.

Реализация на практике расчетных параметров структуры выпусков должна учитывать инерционный характер экономических процессов. С этой целью рассмотрена процедура расчета индикативного прогноза индексов выпуска [9]. Сформулированы и доказаны утверждения, определяющие необходимые свойства применяемых расчетных процедур. Приведен пример результатов расчета для структуры межотраслевого баланса Российской Федерации, который демонстрирует перспективность предлагаемого подхода.

## 1. ИНДИКАТОРЫ СТАБИЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

Рассматриваются модели и методы управления, ориентированные на описание стабильного самодостаточного развития экономики. Для этой цели используется замкнутая модель «затраты – выпуск» Леонтьевского типа [3].

*Продуктивность* однопродуктовой (скалярной) модели экономической системы определим как  $\pi = Y/Z$ , где  $Z$  – суммарные промежуточные затраты,  $Y$  – валовая добавленная стоимость (ВВП). Обозначим валовой выпуск  $V$ , материалоемкость  $a = Z/V$ . Если валовой выпуск представить в виде суммы  $V = Y + Z$ , то продуктивность равна

$$\pi = (V - Z)/Z = 1/a - 1. \quad (1)$$

Здесь и далее предполагается, что все показатели представлены в стоимостной форме при сопоставимых ценах базового года. В этой скалярной модели продуктивность экономики зависит только от параметра материалоемкости: чем она меньше, тем больше продуктивность.

Для многопродуктовой (векторной) модели экономики различные конфигурации векторов затрат  $Z$  и выпусков  $V$  дают разную продуктивность. При этом значение имеют не абсолютные, а относительные величины компонент этих векторов. Поэтому можно рассматривать задачу выбора параметров модели с наибольшим значением продуктивности, варьируя структуру этих векторов.

Потенциал продуктивности многопродуктовой экономической системы определяется как максимум продуктивности по допустимым в рамках естественных ограничений векторам выпусков  $\mathbf{V}$  и затрат  $\mathbf{Z}$ :

$$\pi^* = \max_{\mathbf{V}, \mathbf{Z}} \pi.$$

При переходе к модели многопродуктовой экономики предполагается, что заданы прямые затраты  $Z_{ij}$  отрасли  $j$  на выпуск продукции или услуг вида  $i$  и выпуски  $V_j$  продукции и услуг вида  $j$ . На основе этих данных вычисляются коэффициенты удельных затрат

$$a_{ij} = Z_{ij} / V_j, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n,$$

которые образуют технологическую матрицу  $\mathbf{A}$ . Здесь  $n$  – количество отраслей. Сумма затрат отрасли  $i$  определяется как

$$Z_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j, \quad i = 1, \dots, n.$$

Тогда продуктивность отрасли  $i$  определим по аналогии с формулой (1) как долю добавленной стоимости от стоимости промежуточного потребления, а продуктивность ядра экономической системы – как минимум продуктивности отраслей:

$$\pi = \min_i Y_i / Z_i = \min_i \{(V_i - Z_i) / Z_i\}.$$

Модель «затраты – выпуски» может быть представлена равенством, определяющим соотношения сбалансированности между выпусками (предложением) и суммарными затратами (спросом) отраслей:

$$V_i(t) = \gamma_i \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где  $\gamma_i$  – мультипликатор выпуска отрасли  $i$ ,  $\gamma_i \geq 1$ .

Рассмотрим формулировку оптимизационной задачи для структуры выпусков  $V_i$  с критерием максимума нижней границы мультипликаторов выпусков

$$\gamma = \min_i \gamma_i,$$

которая имеет вид

$$\gamma^* = \max_{\gamma, \mathbf{V}} \gamma, \quad (3)$$

с технологическим ограничением балансировки выпусков продукции, соответствующим условию (2). Смысл этого ограничения состоит в том, что прямые затраты должны включать в себя затраты всех видов деятельности и не могут быть меньше объема определенной регулируемой доли выпусков продукции:

$$V_i(t) \geq \gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j(t). \quad (4)$$

Соотношения (3), (4) представляют собой задачу билинейного программирования. Выпуски, удовлетворяющие условию (4), будем называть сбалансированными. Таким образом, задача сводится к поиску сбалансированного вектора выпусков  $\mathbf{V}$  с максимальной нижней границей мультипликатора  $\gamma$ .

Если решение задачи (3), (4) есть  $\mathbf{V}$ ,  $\gamma$ , то максимум показателя продуктивности может быть определен из решения этой задачи как  $\pi^* = \gamma - 1$ . Он представляет собой долю добавленной стоимости в стоимости промежуточного потребления при экстремальном сбалансированном режиме технологического развития экономической системы. Поскольку  $\pi \leq \pi^*$ , то всегда  $\gamma \geq 1/a$ ; в экстремальном сбалансированном режиме имеем:

$$a = 1/\gamma.$$

Для иллюстрации приведем пример двумерной задачи поиска оптимальной структуры выпусков. Условие балансировки (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} V_1 &\geq \gamma(a_{11}V_1 + a_{12}V_2), \\ V_2 &\geq \gamma(a_{21}V_1 + a_{22}V_2). \end{aligned} \quad (4')$$

Пусть  $\mathbf{V}$ ,  $\gamma$  – решение задачи (3), (4') в естественном предположении  $\gamma a_{11} < 1$ ,  $\gamma a_{22} < 1$ , что необходимо для того, чтобы технологическое ядро было продуктивным; значения удельных затрат  $a_{ij}$  и компонент вектора выпусков  $V_i$  положительны. Будем решать систему неравенств (4'), которая выполняется при условии

$$(1 - \gamma a_{11})(1 - \gamma a_{22}) \leq \gamma^2 a_{21} a_{12}.$$

Допустимым решением для этой системы неравенств являются собственный вектор  $\mathbf{V}^*$  и мультипликатор  $\gamma^* = 1/a^*$ , соответствующий собственному значению  $a^*$  матрицы  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ ,  $i, j = 1, 2$ . Будем называть его собственным мультипликатором. Для него справедливо равенство

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \left( (a_{11} + a_{22}) / 2 \pm \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 / 4 + a_{12} a_{21}} \right) / \\ &\quad / (a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12}) = \\ &= \frac{(a_{11} + a_{22}) \mp \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21})}}{2}. \end{aligned}$$

Далее рассматривается ситуация, когда параметры модели имеют экономический смысл:

$$1 < \gamma < \min(1/a_{11}, 1/a_{22}).$$

Будем обозначать  $\gamma_{\min}$ ,  $\gamma_{\max}$  соответственно минимальное и максимальное значения собственного мультипликатора  $\gamma^*$ .

В случае сильного влияния межотраслевых связей, когда



$$a_{11}a_{22} < a_{21}a_{12},$$

собственные мультипликаторы действительны и имеют разные знаки, а ограничения (4') выполняются при условии  $\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$ . Тогда для значения мультипликатора имеем:

$$\gamma_{\max} = \frac{2}{(a_{11} + a_{22}) + \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}} < \frac{2}{(a_{11} + a_{22}) + \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11}a_{22})}} < \frac{1}{\max(a_{11}, a_{22})},$$

$$\gamma_{\min} < 0,$$

$$\gamma_{\max} > 0.$$

Поскольку  $\gamma_{\max} < 1/\max(a_{11}, a_{22})$ , то условие (3) удовлетворяется, соотношения (4') выполняются на строгом равенстве и  $\gamma^* = \gamma_{\max}$ .

При условии

$$a_{11}a_{22} = a_{21}a_{12}$$

имеем

$$\gamma^* = 1/(a_{11} + a_{22}),$$

ограничения (4') выполняются при  $\gamma \leq \gamma^*$ . Решением задачи (3), (4') является  $\gamma = \gamma^*$  и соотношения (4') выполняются на строгом равенстве.

При условии

$$a_{11}a_{22} > a_{21}a_{12},$$

которое можно интерпретировать как малое влияние межотраслевых связей, значения  $\gamma_{\min}, \gamma_{\max}$  положительны,

$$\gamma_{\max} = \frac{2}{(a_{11} + a_{22}) - \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}} > \frac{1}{\max(a_{11}, a_{22})}.$$

Всегда

$$\gamma_{\min} = \frac{2}{(a_{11} + a_{22}) + \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}} < \frac{1}{\max(a_{11}, a_{22})}$$

и ограничения (4') выполняются при условиях  $\gamma \leq \gamma_{\min}$ ,  $\gamma \geq \gamma_{\max}$ . Поскольку  $\gamma_{\max} \geq 1/\max(a_{11}, a_{22})$ , что характерно для слабых межотраслевых связей, то решением является  $\gamma^* = \gamma_{\min}$ .

Таким образом, в каждом случае, если решение существует, оно совпадает с собственным мультипликатором, а для получения корректного решения задачи оптимизации продуктивности технологического ядра (3), (4') можно вместо условия (4') использовать ограничения типа равенств

$$V_1 = \gamma(a_{11}V_1 + a_{12}V_2),$$

$$V_2 = \gamma(a_{21}V_1 + a_{22}V_2).$$

Если значения мультипликатора  $\gamma^*$  действительны и  $\gamma_{\min} > 1$ , то матрица  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ ,  $i, j = 1, 2$ , устойчива (является шуровской) [6].

Для поиска собственного вектора  $\mathbf{V}^*$  решается система неравенств (4'), к которой необходимо добавить условие нормировки, например, задав одну из границ его значений:

$$\mathbf{V}'_i \leq \mathbf{V}_i \leq \mathbf{V}''_i, i = 1, 2.$$

Построение моделей и анализ результатов расчета удобно вести с применением безразмерных относительных цен. В таком виде модели и интерпретация результатов становятся более компактными и наглядными.

## 2. РАВНОВЕСНЫЕ ИНДЕКСЫ ВЫПУСКОВ

Рассмотрим операции преобразования технологической матрицы в текущих ценах к матрице в относительных ценах и обратно.

Обозначим  $\mathbf{D}(\mathbf{X})$  диагональную матрицу с диагональю  $X_1, X_2, \dots, X_n$ :  $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{X})$ ;  $\mathbf{C}(\mathbf{X})$  – диагональную матрицу с диагональю  $1/X_1, 1/X_2, \dots, 1/X_n$ .

При изменении объемов выпусков изменяются оценки удельных затрат  $a_{ij}$ . Для того, чтобы зафиксировать результаты изменения объемов  $V_i$  предыдущего этапа, производится пересчет коэффициентов прямых затрат:

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} V_j / V_i, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n,$$

или

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{D}(\mathbf{V})\mathbf{A}\mathbf{C}(\mathbf{V}). \quad (5)$$

**Утверждение 1.** Если  $\lambda$  – некоторое собственное значение,  $\mathbf{V}$  – соответствующий собственный вектор матрицы  $\mathbf{A}$  и все  $X_i \neq 0, i = 1, \dots, n$ , то преобразованная матрица  $\bar{\mathbf{A}}$  имеет то же собственное значение, а собственный вектор  $\mathbf{v}$  равен исходному с точностью до преобразования растяжения  $\mathbf{D}(\mathbf{X})$ :

$$\mathbf{v} = \mathbf{D}(\mathbf{X})\mathbf{V}.$$

Доказательства этого и последующих утверждений приведены в приложении.

Очевидно, обратное к  $\mathbf{D}(\mathbf{X})$  преобразование будет иметь вид:

$$\mathbf{V} = \mathbf{D}(\mathbf{X})^{-1}\mathbf{v} = \mathbf{C}(\mathbf{X})\mathbf{v}.$$

Величины  $v_i$  интерпретируются как пропорции (индексы) объемов продукции и выполняемых услуг. Таким образом, преобразование (5) не изме-

няет собственного значения матрицы удельных затрат (технологической матрицы  $\mathbf{A}$ ) при переходе к шкале пропорций выпусков  $\bar{\mathbf{A}}$ , а соответствующий собственный вектор подвергается растяжению  $\mathbf{D}(\mathbf{X})$ . Будем называть это преобразование технологической матрицы преобразованием деформации.

Пусть для перехода к ценам в относительной шкале (пропорциям цен) используется собственный вектор выпусков  $\mathbf{V}^0$  в абсолютной шкале путем деформации технологической матрицы

$$\mathbf{A}^1 = \mathbf{C}(\mathbf{V}^0)\mathbf{A}\mathbf{D}(\mathbf{V}^0). \quad (6)$$

В таком случае собственный вектор технологической матрицы после деформации становится единичным. Можно говорить, что векторы  $\mathbf{V}^0$ ,  $\mathbf{v}^0$  описывают равновесное состояние выпусков в разных шкалах.

Сформулируем проблему поиска структуры выпусков, обеспечивающей наибольшее значение мультипликаторов выпуска при выполнении условий сбалансированности выпусков и затрат. В относительной шкале пропорций выпусков формулировка соответствующей оптимизационной задачи для структуры выпусков  $v_i$  имеет вид

$$\max_{v_i} \gamma, \quad (7)$$

с технологическим ограничением на выпуски продукции

$$v_i(t) \geq \gamma \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} v_j(t), \quad i=1, \dots, n, \quad (8)$$

где  $t$  – текущий момент времени. Условие (8) эквивалентно условию (4), поскольку в векторном виде, умножив его слева на положительную матрицу  $\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{V})$ , получим

$$\mathbf{v} = \mathbf{D}\mathbf{V} \geq \mathbf{D}\gamma\mathbf{A}\mathbf{V} = \gamma\mathbf{D}\mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{D}\mathbf{V} = \gamma\bar{\mathbf{A}}\mathbf{v}.$$

При расчетах установим нижнюю границу индексов объемов, равную  $\mu$ . Тогда ограничение на них имеет вид

$$v_i(t) \geq \mu > 0, \quad i=1, \dots, n. \quad (9)$$

Это ограничение является нормирующим, позволяет установить масштаб индексов и не отражается на их отношениях. Экономический смысл такого ограничения состоит в том, что для равновесного вектора выпусков нельзя допускать чрезмерного падения объемов выпуска для тех отраслей, которые мало задействованы в технологических цепочках, но имеют большое значение помимо экономики (социальная сфера, безопасность, экология и др.).

Рассматриваемое решение имеет экономическую интерпретацию, если матрица  $\bar{\mathbf{A}}$  является шуровской (ее максимальное собственное значение

по модулю меньше 1, т. е. полученное значение мультипликатора  $\gamma > 1$ ), ее элементы и компоненты ее собственного вектора неотрицательны.

**Утверждение 2.** Пусть матрица  $\bar{\mathbf{A}}$  – положительная шуровская с действительными собственными значениями. Тогда положительное решение задачи (7), (8) реализуется на равенстве

$$v_i(t) = \gamma^* \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} v_j(t), \quad i=1, \dots, n,$$

и представляет собой собственный вектор этой матрицы и мультипликатор  $\gamma^*$ , соответствующий собственному значению

$$a^* = 1 / \gamma^* > \max_i \{a_{ii}\}.$$

Решение, реализуемое на равенстве, будем называть равновесным, а соответствующее состояние системы – технологическим равновесием. Экономическую целесообразность имеют именно равновесные состояния, поскольку если не выполняется строгое равенство, то

$$\exists i : \bar{\Delta V}_i = V_i - \gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j > 0,$$

что означает избыточный выпуск соответствующей продукции.

Собственный вектор матрицы  $\bar{\mathbf{A}}$  может не удовлетворять условию экстремальности (7) или на выпуски помимо (8) могут быть наложены дополнительные ограничения, такие, что условие равновесия нарушается. В этом случае продуктивность технологического ядра окажется ниже ее потенциального значения  $\pi^* = \gamma^* - 1$ .

Показатель технологичности экономической системы  $u = \pi / \pi^*$  определяет степень близости системы к состоянию технологического равновесия. Очевидно,

$$0 \leq u \leq 1, \quad \max u = 1.$$

### 3. ИНДИКАТИВНЫЙ ПЛАН-ПРОГНОЗ СОВМЕСТНОГО РАЗВИТИЯ ОТРАСЛЕЙ

Если экстремальные значения выпусков существенно различаются с текущими значениями, реализовать скачком или за короткое время изменение структуры выпусков в соответствии с условиями (7)–(9) невозможно. Будем определять рамочную (директивную) оптимальную траекторию выпусков, соответствующую дополнительным условиям реализуемости, путем введения дополнительных ограничений на изменения объемов выпусков на этапах планирования. Реалистичность таких ограничений должна обеспечиваться организационными возможностями и наличием ресурсов для нара-



щивания выпусков соответствующих отраслей. От этих возможностей также зависит календарная продолжительность каждого из этапов плана-прогноза.

Для того, чтобы определить более рациональный план развития отраслей, можно воспользоваться следующей постановкой локальной задачи, добавив к выражениям (6)–(9) ограничение на допустимое изменение индексов выпуска с темпом  $0 > \theta > 1$  на один этап плана:

$$v_i(t) \leq \theta v_i(t-1), \quad i=1, \dots, n.$$

Повторяя процедуры поиска оптимального решения и пересчета матрицы прямых затрат от этапа к этапу, получим индикативный многоэтапный план-прогноз совместного развития отраслей технологического ядра экономики. В процедуре расчета индикативного плана используются величины абсолютных и относительных выпусков. Если  $\mathbf{V}^1$  – вектор текущих выпусков, то на первом шаге для перехода к относительным выпускам  $\mathbf{v}^1$  применяется деформация технологической матрицы

$$\mathbf{A}^2 = \text{diag}(\mathbf{V}^1)^{-1} \mathbf{A} \text{diag}(\mathbf{V}^1).$$

Соответствующим преобразованием осуществляется обратный переход для векторов промежуточных вычислений  $\mathbf{v}$ :

$$\mathbf{V} = \text{diag}(\mathbf{V}^1) \mathbf{v}.$$

Далее решаются задачи поиска вектора относительных объемов выпуска  $\mathbf{v}^k$

$$\max_{\gamma^k, \mathbf{v}^k} \gamma^k, \quad (10)$$

где  $k=1, 2, \dots$  – номер этапа, путем введения технологического ограничения на выпуски продукции

$$\mathbf{v}^k \leq \gamma^k \bar{\mathbf{A}}^k \mathbf{v}^k \quad (11)$$

и условия роста относительных выпусков с темпом  $\theta > 1$  на один этап плана

$$\mu \mathbf{I} \leq \mathbf{v}^k \leq \theta \mathbf{I}, \quad (12)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичный вектор. Тогда для расчета индикативного плана-прогноза совместного развития отраслей можно применить следующие утверждения.

**Утверждение 3.** Последовательность  $\mathbf{V}^k$  и оценка  $\gamma^k$  за конечное число шагов стремятся к решению задачи (7)–(9).

**Замечание.** Пусть  $\mathbf{V}^*$  – решение задачи (7)–(9). При преобразовании технологической матрицы  $\mathbf{A}$  с помощью деформации матрицей  $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{v}^*)$  решение задачи планирования становится тривиальным:  $\mathbf{v} = \gamma \mathbf{I}$ , где  $\mathbf{v} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{C} \mathbf{V}$ . То есть при достижении технологического экстремума структура выпусков становится равновесной и ее дальнейшего изменения не происходит.

**Утверждение 4.** Если существует решение локальных задач при  $k \geq 1$ , на этапе  $i$  могут быть получены объемы индикативных выпусков в абсолютных единицах вида

$$\mathbf{V}^k = \prod_{j=k}^1 \text{diag}(\mathbf{v}^j) \cdot \mathbf{V}^0. \quad (13)$$

**Утверждение 5.** Если для всех этапов коэффициент  $\theta > 1$  постоянный, относительный прирост выпусков, начиная с некоторого этапа, становится одинаковым. Это свойство аналогично магистральному свойству оптимизационных моделей экономической динамики [9].

Рассмотрим экстремальный вектор выпусков для задачи (10)–(12). Отметим, что получаемая в результате решения этой задачи структура выпусков  $\mathbf{v}^k$  на начальных этапах отличается от равновесной и при фиксированной технологической матрице  $\mathbf{A}$  не является устойчивой. Однако изменение структуры выпусков должно приводить к изменению этой матрицы в соответствии с формулой (5)

$$\bar{\mathbf{A}}^k = \mathbf{D}(\mathbf{v}^k) \mathbf{A} \mathbf{C}(\mathbf{v}^k),$$

в результате чего полученная структура выпусков от этапа к этапу планирования стремится к равновесной и устойчивой структуре (см. замечание к утверждению 3).

Для перехода от полученных индексов к выпускам в стоимостной форме следует применить преобразование (13).

#### 4. РАСЧЕТ ИНДИКАТИВНОГО ПЛАНА-ПРОГНОЗА

Рассматривается численная модель технологического ядра экономики (10)–(12). Источник данных – доступный в настоящее время в открытом доступе [5] межотраслевой баланс РФ 2016 г., который отражает объемы товаров и услуг, потребляемые разными отраслями и видами деятельности (базовые таблицы «затраты – выпуск» разрабатываются один раз в пять лет за годы, оканчивающиеся на 1 и 6). При расчетах для решения задач математического программирования использовалась библиотека Excel, аналог которой описан в работе [10].

Ниже приведен график изменения коэффициента продуктивности технологического ядра при балансировке выпусков на последовательных этапах индикативного планирования, где верхний предел изменения пропорций выпусков изменялся с темпом  $\theta = 1,5$  на этап. Оценка продуктивности может быть представлена в виде  $\pi = (\gamma - 1) \cdot 100\%$ .

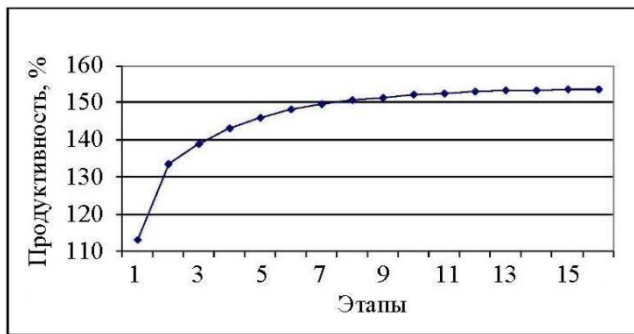


Рис. 1. Изменение коэффициента продуктивности технологического ядра при оптимизации пропорций выпусков на последовательных этапах индикативного планирования

На рис. 2 приведен график индикативной динамики пропорций выпусков некоторых отраслей при решении задачи на последовательных этапах индикативного планирования на основе данных, характеризующих российскую экономику. Для значительной части видов экономической деятельности индексы выпусков сразу выходят на уровень  $\theta = 1,5$  и остаются на нем на всех последующих этапах. Представлены графики для первых восьми рядов из 98 видов экономической деятельности таблицы межотраслевого баланса, для которых

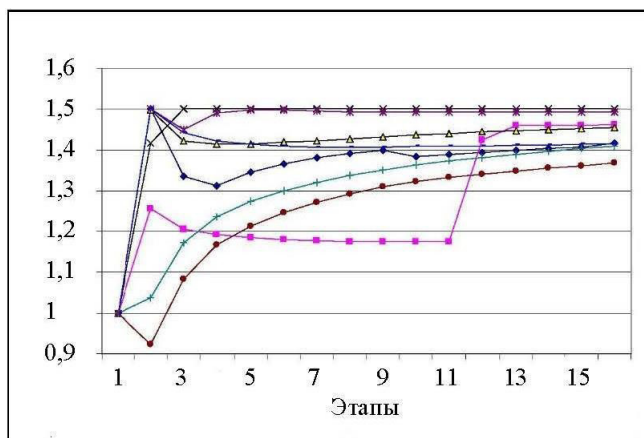


Рис. 2. Индикативная динамика пропорций выпусков некоторых отраслей на последовательных этапах индикативного планирования на основе данных, характеризующих российскую экономику:

- продукция сельского хозяйства;
- услуги, связанные с охотой, ловлей и разведением диких животных;
- △— рыба и прочая продукция рыболовства и рыбоводства; услуги, связанные с рыболовством и рыбоводством;
- ×— нефть, включая нефть, получаемую из битуминозных минералов; сланцы горючие (битуминозные) и песчаники битуминозные;
- \*— продукция горнодобывающих производств прочая;
- мясо, продукты мясные и прочая продукция переработки животных;
- +— рыба и продукты рыбные переработанные и консервированные;
- фрукты, овощи и картофель переработанные и консервированные

расчетные значения индексов выпуска при  $k > 1$  отличны от  $\theta = 1,5$ .

На рис. 1 и 2 демонстрируется магистральное свойство [11] модели развития технологического ядра российской экономики, состоящее в том, что при достаточном времени функционирования индексы выпусков продукции выходят на постоянный уровень. При этом, в соответствии с формулой (13), объемы выпусков в стоимостном выражении возрастают с темпом  $v_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Приведенные расчеты позволяют оценить потенциал роста технологического ядра экономической системы. Они показывают, что изменение структуры выпусков позволяет существенно повысить показатель продуктивности. Для того, чтобы оценить возможности реализации имеющегося потенциала технологического ядра, необходимо в условия балансировки включить также ряд дополнительных условий: ограничение на трудовые и сырьевые ресурсы, затраты на конечное потребление, накопление, фондообразование, экспортно-импортные потоки. Таким образом, полученная динамика индексов выпуска может служить оценкой верхней границы этих индексов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из данных Росстата и полученных результатов расчета, состояние российской экономики не является равновесным, поскольку реальная продуктивность технологического ядра (112% – первая точка на рис. 1) заметно ниже ее потенциального значения (более 152% – асимптотического значения продуктивности), что вселяет надежду в возможность существенного повышения показателя продуктивности в реальности. Практическая реализация такой возможности должна быть связана с разработкой стратегических планов развития экономики, и наряду с выбором приоритетных направлений развития технологического ядра требует применения адекватных методов прогнозирования многоотраслевой динамики, учитывающих все основные аспекты хозяйственной деятельности: фондообразование, накопление, конечное потребление государства и домашних хозяйств, экспортно-импортные потоки [12–14]. Планирование на новом уровне также предполагает применение соответствующих организационных механизмов [15].

Помимо прикладного содержания, изложенные результаты иллюстрируют специфику предложенной методологии, предполагающей применение релевантного инструментария расчетов и анализа. Класс задач, рассмотренных выше, имеет ряд спе-



цифических особенностей. Реальный интерес в макроэкономических разработках рассматриваемого рода представляют модели большой размерности (перечень анализируемых видов экономической деятельности может исчисляться сотнями). Кроме того, для практического применения моделей технологического ядра требуется задействовать эффективные алгоритмы решения задач математического программирования рассматриваемого типа [16–18] и лингвистические средства управления расчетами, а также интегрировать их в рабочую среду [10, 19]. Необходим свободный доступ к актуальным верифицированным данным и современным информационным технологиям, включая соответствующую вычислительную среду и устройства интерфейса. Пример применения аналогичного инструментария открытого доступа (Thread Pool Executor of Akka) для обработки задач большой размерности приведен в статье [20].

### ПРИЛОЖЕНИЕ

**Доказательство утверждения 1.** Пусть  $\mathbf{x}$ ,  $\lambda$  – собственный вектор и собственное значение матрицы  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{Ax} = \lambda \mathbf{x}.$$

Умножив слева обе части уравнения соответственно на матрицу  $\mathbf{D}$ , получим

$$\mathbf{DAx} = \mathbf{D}\lambda \mathbf{x}.$$

Поскольку  $\mathbf{CD} = \mathbf{E}$  – единичная матрица, то  $\mathbf{x} = (\mathbf{CD})\mathbf{x}$  и

$$\mathbf{DA}(\mathbf{CD})\mathbf{x} = \lambda(\mathbf{Dx}), \text{ или}$$

$$\mathbf{DAC}(\mathbf{Dx}) = \lambda(\mathbf{Dx}),$$

т. е.  $\mathbf{Dx}$  – собственный вектор матрицы  $\mathbf{DAC}$ , а  $\lambda$  – ее собственное значение. ♦

**Доказательство утверждения 2.** Пусть  $\mathbf{V}^*$  – собственный вектор матрицы  $\mathbf{A}$ . Поскольку число неравенств в ограничении совпадает с размерностью вектора выпусков, решение задачи билинейного программирования

$$\max_{\gamma, V_i} \gamma, \quad (\text{П.1})$$

$$V_i \geq \gamma \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j, \quad (\text{П.2})$$

достигается на равенстве

$$V_i = \gamma^* \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j, \quad i = 1, \dots, n, \quad (\text{П.3})$$

где  $\gamma^* = 1/a^*$ ,  $a^*$  – собственное значение матрицы  $\mathbf{A}$ .

Действительно, учитывая условие  $\mathbf{V} > 0$  и следующее из него условие  $\gamma < 1/\max_i \{a_{ii}\}$ , исключим в системе неравенств (П.2) переменные  $V_i$  и придем к неравен-

ству для характеристического полинома  $L(\gamma)$  степени  $n$  вида

$$L(\gamma) = (1 - \gamma a_{11})(1 - \gamma a_{22}) \dots (1 - \gamma a_{nn}) - a_{12} a_{21} \times \\ \times (1 - \gamma a_{33}) \dots - a_{13} a_{31} (1 - \gamma a_{22}) \dots \geq 0.$$

В результате получена оптимизационная задача

$$\max \gamma,$$

$$L(\gamma) \geq 0,$$

$$1 \leq \gamma < 1/\max_i \{a_{ii}\}.$$

Эта задача имеет единственное конечное решение  $\gamma^*$ , совпадающее с одним из корней многочлена  $L(\gamma)$ , если значение  $\gamma^*$  удовлетворяет равенству (П.3) и наоборот (иначе матрица  $\mathbf{A}$  имела бы более  $n$  собственных значений).

Предположим, что утверждение 2 неверно: максимум  $\gamma^*$  достигается на полуинтервале  $1 \leq \gamma^* < 1/\max_i \{a_{ii}\}$  на строгом неравенстве  $L(\gamma) > 0$ . Поскольку аналитическую функцию  $L(\gamma)$  в окрестности точки  $\gamma^*$  можно аппроксимировать отрезком ряда Тейлора – Лагранжа

$$L(\gamma) = L(\gamma^*) + L'(\gamma^*)(\gamma - \gamma^*) + L''(\gamma^* + \theta(\gamma - \gamma^*))(\gamma - \gamma^*)^2, \\ 0 < \theta < 1,$$

то в этой окрестности найдется допустимая точка  $\gamma^* + \delta$  и константа  $\varepsilon > 0$ , такие что  $L(\gamma^* + \delta) > 0$ :

$$0 < \delta < \min \left\{ L(\gamma^*) / (|L'(\gamma^*)| + \varepsilon), \right. \\ \left. \sqrt{L(\gamma^*) / (|L''(\gamma^*)| + \varepsilon)}, 1/\max_i \{a_{ii}\} - \gamma^* \right\}.$$

То есть если  $L(\gamma^*) > 0$ , значение  $\gamma^*$  не может доставлять максимум полиному  $L(\gamma)$  при условии  $L(\gamma) \geq 0$ . Следовательно, максимальное значение  $\gamma$  достигается на корне полинома  $L(\gamma)$ , а решение задачи (П.1), (П.2) – на равенстве (П.3). ♦

**Доказательство утверждения 3.** Рассмотрим вспомогательную задачу билинейного программирования

$$\max_{\mathbf{v}} \gamma$$

с ограничением на выпуски продукции

$$\mathbf{v} \geq \gamma \mathbf{A}^0 \mathbf{v}$$

и условием роста относительных выпусков с неограниченным темпом на один этап плана

$$\mathbf{I} \leq \mathbf{v}.$$

Пусть  $\mathbf{v}^*$  – решение этой задачи; положим  $\theta^* = \max_i v_i^*$ . Тогда при  $\theta = \theta^*$  утверждение выполняется и

$$\mathbf{V}^1 \leq \theta^* \mathbf{V}^0.$$

При  $1 < \theta = \theta_1 < \theta^*$  задачу планирования будем решать за два этапа: при  $\theta = \theta_1$  и  $\theta = \theta_2 = \theta^* / \theta_1$ . В результате решения задачи планирования за эти два этапа также будет получено решение  $\mathbf{v}^*$ . На последнем этапе мы имеем условия предыдущей задачи для одного этапа:

$$\mathbf{I} \leq \mathbf{v}^1 \leq \theta_1 \mathbf{I}, \mathbf{v}^2 \leq \theta^* / \theta_1 \mathbf{I}, \\ \mathbf{v}^2 \leq \theta^* \mathbf{v}^0.$$

Аналогично рассуждая, можно разделить интервал  $[1, \theta^*]$  на любое конечное число отрезков, а решение задачи планирования – на соответствующее число этапов. ♦

**Д о к а з а т е л ь с т в о** утверждения 4. При  $i = 1$  имеем  $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{v}^1)$ ,  $\mathbf{V}^0$  – исходный вектор выпусков,  $\mathbf{V}^1$  – вектор выпусков после первого этапа, тогда  $\mathbf{V}^1 = \mathbf{D}\mathbf{V}^0$ . При  $i > 1$  по индукции  $\mathbf{V}^i = \text{diag}(\mathbf{v}^i) \mathbf{V}^{i-1}$ .

Тогда  $\mathbf{V}^i = \text{diag}(\mathbf{v}^i) \prod_{j=i-1}^1 \text{diag}(\mathbf{v}^j) \mathbf{V}^0$ . ♦

**Д о к а з а т е л ь с т в о** утверждения 5. Поскольку величина  $\gamma^* = \max_{\mathbf{v}} \gamma$  ограничена, начиная с некоторого шага  $k^*$ , мультипликатор выпусков выходит на постоянный уровень  $\gamma^*$  и ограничения типа неравенства

$$v^k(t) \leq \theta \cdot \mathbf{I}$$

при  $1 < \theta \leq \theta^*$ , где  $\theta^* = \max_i v_i^*$ , в условиях утверждения 3, выполняются на равенстве

$$v^k(t) = \theta \cdot \mathbf{I}, k \geq k^*. \blacklozenge$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Индикативное планирование и проведение региональной политики* / М.Н. Абдикеев и др. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 368 с. [Indikativnoe planirovanie i provedenie regional'noi politiki / M.N. Abdikeev i dr. – M.: Finansy i statistika, 2007. – 368 s. (In Russian)]
2. *Узяков М.Н.* Проблемы экономических измерений и возможности структурного анализа // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 1 (178). – С. 3–4. [Uzyakov, M.N. Problems of economic measurements and possibilities of structural analysis // Studies on Russian Economic Development. – 2020. – T. 31. – № 1. – P. 1–2.]
3. *Леонтьев В.В.* Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика. – М.: Политиздат, 1990. [Leontief, W.W. Essays in economics. Theories, theorizing, facts, and policies. – New York: Oxford University Press, 1966.]
4. *Саянова А.Р.* Мировые межотраслевые балансы как инструмент оценки «точек роста» национальной экономики // Научные труды ИНИП РАН. – 2019. – Т. 17. – С. 27–39. [Sayarova, A.R. World input output tables as a tool for assessing the «Point of growth» of the national economy. – Vol. 17. – P. 27–39. (In Russian)]
5. *Базовые таблицы «затраты-выпуск» Российской Федерации за 2016 год (в текущих ценах, млн. руб.)* Опубликовано Росстатом. 30 января 2020 года. – <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/baz-tzv-2016.xlsx> [Bazovye tablitsy «zatraty-vypusk» Rossiiskoi Federatsii za 2016 god (v tekushchikh tsenakh, mln. rub.) Opublikovano Rosstatom. 30 yanvarya 2020 goda. – <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/baz-tzv-2016.xlsx> (In Russian)]
6. *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б.* Математическая теория автоматического управления. – М.: Издательство URSS, 2019. – 500 с. [Polyak, B.T., Khlebnikov, M.V., Rapoport, L.B. Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya. – M.: Izdatel'stvo URSS, 2019. – 500 s. (In Russian)]
7. *Гусев В.Б.* Равновесные модели многоресурсных саморазвивающихся систем // Проблемы управления. – 2007. – № 3. – С. 18–25. [Gusev, V.B. Equilibrium Models of Multi-Resource Self-Developing Systems // Control Sciences. – 2007. – No. 3. – P. 18–25. (In Russian)]
8. *Самуэльсон, П.* Экономика. Том 1. – М.: МГП «АЛГОН» ВНИИСИ, 1992. – 333 с. [Samuelson, P.A. Economics. – New York: McGraw-Hill, 1989.]
9. *Гусев В.Б.* Модели автономного управления в развивающихся системах // Проблемы управления. – 2018. – № 6. – С. 2–17. [Gusev, V.B. Models of Autonomous Control in the Developing Systems // Control Sciences. – 2018. – No. 6. – P. 2–17. (In Russian)]
10. *Mason, A.J.* OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel. – Operations Research Proceedings 2011, eds. Klatte, D., Lüthi, H.-J., Schmedders, K. – Berlin, Heidelberg: Springer. – 2012. – P. 401–406. – [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1\\_64](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1_64).
11. *Dorfman, R., Samuelson, P.A., Solow, R.M.* Linear Programming and Economic Analysis. – New York: McGraw-Hill, 1958.
12. *Гусев В.Б.* Достаточные условия стабильного развития при диверсификации экономики // Друкеровский вестник. – 2015. – № 3 (7). – С. 91–98. [Gusev, V. The Sufficient Conditions for Stable Development During the Diversification of the Economy // Drukerovskii vestnik. – 2015. – No. 3 (7). – P. 91–98. (In Russian)]
13. *Однопродуктовая модель долгосрочного прогноза ВВП* / В.И. Антипов и др. – М.: Ин-т пробл. управл. РАН, 2005. [Odnoproduktovaya model' dolgosrochnogo prognoza VVP / V.I. Antipov i dr. – M.: In-t probl. upravl. RAN, 2005. (In Russian)]
14. *Прикладное прогнозирование национальной экономики: учебное пособие* / под ред. И.А. Буданова, В.В. Ивантера, А.Г. Коровкина, В.С. Сулягина. – М.: Экономистъ, 2007. – 896 с. [Prikladnoe prognozirovanie natsional'noi ekonomiki: uchebnoe posobie / pod red. I.A. Budanova, V.V. Ivantera, A.G. Korovkina, V.S. Sulyagina. – M.: «Economist», 2007. – 896 s. (In Russian)]
15. *Антипов В.И.* ГОСПЛАН. Вчера, сегодня, завтра. – М.: Концептуал, 2019. – 208 с. [Antipov, V.I. GOSPLAN. Vchera, segodnya, zavtra. – M.: Kontseptual, 2019. – 208 s. (In Russian)]
16. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. – М.: Наука Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 384 с. [Polyak B.T. Vvedenie v optimizatsiyu. – M.: Nauka





- Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1983. – 384 s. (In Russian)]
17. Fox, W.P., Burks, R. Mathematical programming: linear, integer, and nonlinear optimization in military decision-making. In: Applications of Operations Research and Management Science for Military Decision Making. – New York: Springer, 2019. – P. 137–191.
18. Bergstra, J., Bardenet, R., Bengio, Y., Kégl, B. Algorithms for hyper-parameter optimization // Proceedings of the 24th International Conference on Neural Information Processing Systems, ser. NIPS'11. – Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc., 2011. – P. 2546–2554.
19. Doumic, M., Perthame, B., Ribes, E., et al. Toward an integrated workforce planning framework using structured equations // European Journal of Operational Research. – 2017. – Vol. 262, iss. 1. – P. 217–230.
20. Hai, T.N., Tien, V.D., Csaba, R. Optimizing the resource usage of actor-based systems // Journal of Network and Computer Applications. – 2021. – Vol. 190:103143. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103143>.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Клочковым.*

*Поступила в редакцию 19.02.2021,  
после доработки 21.09.2021.  
Принята к публикации 7.10.2021.*

**Гусев Владислав Борисович** – канд. физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ [gusvbr@mail.ru](mailto:gusvbr@mail.ru).

## THE TECHNOLOGICAL CORE MODEL OF A LARGE-SCALE ECONOMIC SYSTEM: OPTIMAL CHARACTERISTICS

V.B. Gusev

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ [gusvbr@mail.ru](mailto:gusvbr@mail.ru)

**Abstract.** This paper considers the technological core model of an economic system and mathematical methods of its analysis. As a formalized criterion for the effectiveness of structural innovations, an indicator of productivity is proposed. The problem of finding an equilibrium state that optimizes the productivity of the technological core of the economy is formally stated. The method of equivalent transformation of the model considering the achieved value of indicators is developed. Several propositions on the properties of the equilibrium state are proved. A multi-stage process for calculating the trajectory that brings the economic system closer to the equilibrium state is constructed. The developed model uses the intersectoral balance of national accounts of the economy. The model is analyzed by determining the preferred structure of outputs at the development stages of the economic system's technological core. The phased process of changing the structure of outputs that asymptotically brings the technological core to the productivity maximum is calculated on an example of Russia's data. The results allow assessing the potential growth of economic productivity within the existing technological order by eliminating structural disproportions.

**Keywords:** structural disproportions, technological core of the economy, productivity optimum, plans for phased development, equilibrium state.

## АВТОНОМНАЯ КОЛЛЕКТИВНАЯ КОРРЕКТИРОВКА ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ТРАССЕ

Г.Г. Стецюра, О.В. Мосин

**Аннотация.** Предложен полностью децентрализованный автономный способ синхронизации взаимодействия автотранспорта, движущегося по трассе. Синхронизуется одновременная передача сигналов от группы источников сигналов группе приемников сигналов, ускоряются групповая передача данных между компьютерами автомобилей и выполнение ими распределенных вычислений. Автономность позволяет выполнять синхронизацию без взаимодействия с внешними управляющими техническими средствами. Децентрализация исключает наличие внутри группы центра, управляющего процессами синхронизации. В группе выполняется обмен сигналами по беспроводным оптическим и радиоканалам связи. Применены два взаимодействующих процесса синхронизации. Основное назначение первого процесса – децентрализованно и автономно упорядочить обмен сообщениями в группе, определить расположение членов группы, их скорости и направление движения. Первый процесс предоставляет исходную информацию для второго процесса коррекции синхронизации. Второй процесс значительно точнее учитывает изменения в движении, обеспечивая групповую одновременную доставку сообщений от многих источников многим приемникам. Сообщения синхронизируются с точностью до бита. Это, в частности, ускоряет сбор сведений о состоянии  $n$  единиц транспорта с доставкой всем приемникам только одного общего сообщения с совмещением одноименных разрядов  $n$  сообщений. В целом задача предложенных решений – поставлять данные, позволяющие корректировать движение на участках трассы, и согласовывать коллективные действия всех участников движения. При этом их управляющие компьютеры могут действовать как единый мобильный компьютерный кластер с совместным использованием ресурсов отдельных компьютеров.

**Ключевые слова:** автономный автотранспорт, беспилотные автоматизированные транспортные средства, синхронизация движущихся объектов, децентрализованное управление, групповое взаимодействие мобильных объектов, быстрые распределенные внутрисетевые вычисления.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием беспилотных высокоавтоматизированных транспортных средств возросла потребность в средствах автоматического слежения за их движением и его корректировки. Соответствующие исследования и разработки в основном проводятся в трех направлениях, по которым имеется большое количество публикаций. В них разрабатываются средства слежения с использованием:

- 1) спутниковых средств навигации;
- 2) установленных на автомобиле радаров и лидаров;
- 3) средств технического зрения (см. обзоры [1, 2]).

Решения второго и третьего направления действуют автономно. Они определяют расстояние до других находящихся в пределах видимости автомобилей с точностью и скоростью, достаточными для обеспечения безопасного движения объекта (далее вместо понятий «автомобиль» и «транспортное средство» будем по возможности использовать слово «объект»). Но последние два направления не определяют взаимное расположение всех объектов на участке трассы. Решения первого направления определяют взаимное расположение всех объектов, но они не автономны и требуют взаимодействия со спутниками или специальными наземными станциями. По известным координатам здесь определяется взаимное расположение движущихся объектов, но точность ниже, чем для вто-



рого и третьего направления. Все направления могут использоваться совместно.

Предлагаемые в статье способы наблюдения за движением объектов на автотрассе и его корректировки автономны, децентрализованы и добавляют для указанных выше трех направлений исследований новые возможности. По сравнению с первым направлением исключена зависимость от сигналов внешних источников, точность определения расположения объектов сравнима с точностью, получаемой во втором и третьем направлениях. Для второго и третьего направлений добавлена возможность определения каждым объектом текущего положения всех объектов на участке трассы. От всех направлений предлагаемые способы отличает также новая возможность. Простые, не имеющие компьютеров средства связи позволяют компьютерам объектов выполнять ряд важных для оценки состояния объектов распределенных вычислений непосредственно в сети. Эти операции выполняются во время обмена данными между объектами, не вносят дополнительные задержки, их длительность не зависит от количества участвующих в операции объектов. Изложение приведенных возможностей разделено на две группы.

**Первая группа** выполняет корректировку движения – общую для всех находящихся на заданном участке трассы объектов. Объекты действуют как единый коллектив, и каждый объект предоставляет информацию о своем состоянии и действиях одновременно всему коллективу. Скорость выполнения этих действий достаточна для слежения за перемещением объектов на трассе. Сведения о текущем положении коллектива в целом позволяют принимать более качественные частные решения, а также согласовывать их. Эти задачи выполняет предложенный в статье процесс синхронизации  $SP_0$ .

**Вторая группа** предъявляет более высокие требования к взаимодействию объектов. Каждый из движущихся объектов имеет управляющий компьютер, и взаимодействие объектов сводится к взаимодействию их компьютеров. Коллектив объектов следует также воспринимать как работающий в режиме жесткого реального времени (ЖРВ) компьютерный кластер, имеющий следующие особенности. Расстояния между членами кластера непрерывно изменяются во время решения текущей задачи. Состав объектов на участке трассы, т. е. состав членов кластера, изменяется за доли секунды. Входящие на участок компьютеры имеют предысторию своих действий, которую требуется учитывать. Задача управления движением состоит из совокупности мелких задач, выполняемых членами кластера в режиме ЖРВ. Ресурсы такого кластера требуется организовать как общий ресурс с

быстрым доступом к его частям. Для такого кластера имеется возможность выполнять быстрый распределенный сбор сведений о состоянии  $n$  объектов с доставкой всем объектам только одного общего сообщения, в котором совмещены одноименные разряды сообщений  $n$  объектов (см. § 5).

Действия группы компьютеров как единого кластера накладывают ограничения на длину участков трассы, в пределах которых действуют компьютеры. Действия при расстояниях в сотни метров существенно менее гибкие, чем при расстояниях в десятки метров. Это далее учитывается. Таким образом, вторая предоставляемая ниже объектам возможность состоит в том, что они действуют как единая мобильная компьютерная система.

Указанные возможности достигаются введением точной синхронизации действий объектов. При этом координаты объектов определяются с погрешностью не хуже достигнутых приведенными выше способами во всем диапазоне разрешенных для транспорта скоростей движения. Объекты действуют синхронно и обмениваются между собой сведениями о расположении объекта непосредственно в процессе определения объектом своих координат. Все активное оборудование может располагаться непосредственно на объекте. Объекты обмениваются данными об их текущем расположении с высокой скоростью, что позволяет использовать их компьютерные ресурсы как общий ресурс для решения единой задачи обеспечения безопасности движения. Решение приведенных выше задач основано на использовании процесса синхронизации  $SP$ .

Основное назначение статьи – дополнить известные решения оперативным получением данных о состоянии распределенного коллектива мобильных объектов и объединением ресурсов компьютеров, управляющих движением объектов. Разработка алгоритмов, использующих такие возможности, в статье не рассматривается.

Система, объединяющая участки трассы и находящиеся на участках объекты, имеет переменную структуру. Условия для движения на соседних участках в разные моменты времени могут существенно различаться.

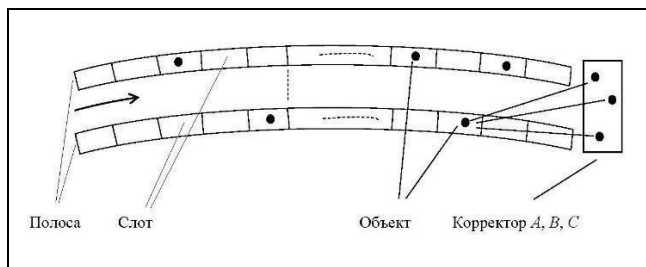
Предлагаемые решения основаны на результатах статьи [3], где рассмотрено взаимодействие мобильных объектов более общего вида, а также на более ранней статье [4] и содержат дополнения, учитывающие специфику указанных выше задач.

В § 1–3 предлагаемой статьи рассмотрена синхронизация действий объектов с точностью, достаточной для коррекции движения объектов на основе сведений о состоянии всех объектов. В § 4 пред-

лагается способ синхронизации, обеспечивающий работу компьютеров объектов как единого кластера. В § 5 показаны распределенные операции кластера, выполняемые со скоростью, не зависящей от количества их участников. В § 6 рассмотрено влияние состояния внешней среды на точность предлагаемых процессов синхронизации.

## 1. УЧАСТНИКИ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКЦИИ ДВИЖЕНИЯ

Обратимся к рисунку.



Участок трассы с коррекцией движения

Трасса, по которой движутся объекты, разделена на участки длиной  $L$  метров (возможно, индивидуальной для каждого участка). В пределах участка одновременно может находиться группа, содержащая не более  $n$  объектов, их скорость и расположение изменяются во времени. На трассе выделено  $p$  полос для движения в одном направлении. Длина объекта не менее  $l$  метров. Перед каждым объектом в целях безопасности движения должен быть свободный от автомобилей участок длины (интервал)  $d$  (далее считаем  $d = 2/3l$ ). В конце участка расположен корректор движения, который может быть пассивным или активным, содержащим источник сигналов. В наиболее простом случае это может быть пассивный корректор, содержащий не менее трех пассивных оптических ретрорефлекторов (световозвращателей), разнесенных на расстояние, достаточное для осуществления трилатерации с необходимой точностью, которые возвращают поступающий на них от движущегося объекта световой сигнал. Определение трилатерации и пример применения трилатерации в робототехнике приведены в стандарте [5]. Каждый из ретрорефлекторов снабжен светофильтром, пропускающим полосу частот, соответствующую конкретному ретрорефлектору. Обозначим фильтры и их частоты как  $A, B, C$ . Относительное положение ретрорефлекторов в корректоре фиксировано.

Такого пассивного оборудования на трассе достаточно для выполнения примененного в § 2, 3 процесса синхронизации  $SP_0$ . В статье дополни-

тельное усложнение оборудования на трассе вводится только по мере необходимости. Так, активный ретранслятор оптических сигналов в корректоре использован в § 4 для работы объектов в режиме мобильного кластера (для выполнения более точного, чем  $SP_0$ , процесса синхронизации  $SP$ ). В случае применения активного корректора объекты смогут посылать ему как оптические, так и радиосигналы. Показана возможность использовать в качестве корректора произвольный мобильный объект и оставить на трассе только пассивное оборудование.

Объекты содержат компьютер, управляющий их движением, источник импульсных оптических сигналов, направляющий сигналы объекта на пассивный корректор, и приемник отраженных сигналов, действующие независимо от приемопередатчиков радиосигналов, которыми обмениваются между собой объекты.

Каждый объект предварительно снабжается картой трассы. На карте фиксируются статические сведения о текущем участке трассы, например, знаки разметки, предупреждающие знаки, координаты размещения корректора, особенности взаимодействия с ним. В эти сведения включены частоты сигналов, которыми разрешено пользоваться объектам на текущем участке трассы, что упростит борьбу с сигналами-помехами. Карта также содержит аналогичные данные для следующего по направлению движения участка трассы.

Компьютер объекта наносит на карту динамическую информацию:

- текущие координаты данного объекта и всех объектов, передавших свои координаты;
- постоянный индивидуальный регистрационный номер объекта;
- описание положения корпуса объекта на карте (см. п. 2.2).

Каждая полоса движения на карте участка трассы разделяется на слоты  $sl$  длиной  $l + d$ , где параметры  $l$  и  $d$  определены выше. В результате карта покрывается сеткой слотов, и автомобиль может занимать один или несколько слотов.

Объект передает и принимает радиосигналы на частотах, разрешенных для текущего участка, но дополнительно принимает также радиосигналы объектов, расположенных на следующем по ходу движения участке.

Получив право передачи сообщений, объект может передать широкоэвещательные, групповые или адресованные конкретным объектам сообщения. Полученные в сообщении новые координаты объекта одновременно корректируют карты у всех объектов.



## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ $SP_0$

### 2.1. Поочередное определение объектами расстояния до корректора движения

Так как объекту, взаимодействующему с корректором движения, известна длина участка трассы  $L$ , то известен и интервал  $T_1$  перемещения сигнала объектов в пределах участка. Для определения расстояния объектам требуется присваивать порядковые номера, о них сказано ниже. Объекты ожидают отсутствия передаваемых ими и корректором движения сигналов в течение интервала  $T_1$ , передают специальный радиосинхросигнал  $S$  длительности не менее  $T_1$  и в момент его завершения  $S^*$  выполняется процесс 1 выделения очередного (вначале первого по порядку номера) объекта, который с помощью процесса 2 определяет свои координаты. Остальные объекты ожидают завершения работы первого объекта, следующий объект передает свои сигналы и т. д. до завершения аналогичных операций всеми находящимися на участке объектами. Первый объект вновь сможет определить свои координаты только после их определения всеми находящимися на участке объектами. В процессе  $SP_0$  объекты выполняют определение координат поочередно, но они не должны ограничивать при этом допустимую для автотрасс скорость движения.

Так как очередную передачу сообщения любой объект начинает после завершения передачи сообщений всеми объектами на участке, то за это время объект может существенно изменить свое положение, не учитываемое процессом  $SP_0$ . Это основная причина, ограничивающая точность процесса  $SP_0$ . В § 3 и 4 будут приняты меры для уменьшения указанной паузы.

В этом разделе использован только пассивный корректор движения. Для порядковой нумерации объектов вначале будем использовать присвоенные объектам личные номера автомобилей. В РФ, например, зарегистрировано более 50 млн автомобилей. Представление этих номеров двоичными числами требует в них иметь  $a = 26$  разрядов. Такой вариант нумерации наиболее простой, но медленный. В других разделах способ нумерации будет ускорен.

Далее для измерения координат объекта с использованием корректора учитываются: длина участка трассы  $L$ ; количество полос в соответствующем направлении движения  $p$ ; минимальная длина объекта  $l$ ; скорость объекта  $v$ ; максимально возможное количество объектов на указанном участке

трассы  $n$ ; скорость света  $c$ ; число двоичных разрядов, необходимых для определения идентификатора каждого объекта  $a = 26$ .

Будем использовать соотношения

$$T_1 = L/c; T_2 = (2a + 3) T_1; n = 3pL/5l; T_3 = nT_2, \quad (1)$$

где  $T_1$  – интервал времени, необходимый для прохождения сигнала в пределах участка длины  $L$ , в частности, для прохождения сигнала до ретрорефлектора от объекта, наиболее удаленного от него. Интервал  $T_2$  определяется временем, необходимым для выделения наименьшего числа в группе  $2^a$ -разрядных чисел. К интервалу  $T_2$  добавлен интервал времени  $2T_1$  для измерения расстояния до корректора и еще один интервал  $T_1$  для передачи данных другим объектам. За время  $T_1$  может быть передан большой объем данных. Соотношение для  $n$  определяет максимальное количество объектов, одновременно находящихся на участке трассы с количеством полос движения  $p$ . Здесь множитель  $5/3$  перед  $l$  учитывает рекомендуемую в литературе минимальную дистанцию до следующего объекта  $d$  размером в  $2/3$  длины корпуса автомобиля. По истечении интервала времени  $T_3$  все находящиеся на участке объекты завершают измерения расстояний и объекты начнут новый цикл определения расстояний до корректора. Если количество объектов меньше  $n$ , то часть интервала  $T_3$  не будет использована. Будем считать, что скорость объектов на трассе  $v \leq 180$  км/ч (50 м/с).

Все находящиеся на участке объекты должны начать измерения времен и расстояний с минимальным разбросом во времени. Для этого они применяют процесс 1.

**Процесс 1 (определение объекта с текущим наименьшим номером).**

*Шаг 1.* Объект передает с помощью радиосигналов значение старшего двоичного разряда своего порядкового номера (старшего из разрядов, не переданных в этом процессе ранее), содержащего  $a$  разрядов. Значение «1» передается сигналом частоты  $f_1$ , значение «0» – сигналом частоты  $f_0$ .

*Шаг 2.* Если на шаге 1 передавший сигнал  $f_1$  объект получает от других объектов сигнал  $f_0$ , то он прекращает выполнение процесса 1. Оставшиеся объекты переходят к шагу 3.

*Шаг 3.* Объект проверяет, есть ли разряды двоичного номера, не переданные на шаге 1. Если они есть, то объект возвращается к шагу 1, иначе процесс 1 завершен.

*Замечание к шагу 1.* Исходный вариант этого простого процесса – способ ДПУ (децентрализованное приоритетное управление), в котором право передачи сообщения получает объект, имеющий наибольший текущий приоритет. Для проводной

шины этот способ разработан в ИАТ (позднее ИПУ) АН СССР в 1970 г. [6]. Расширение возможностей ДПУ дано в монографии [7], он применялся в АСУТП, беспроводной его вариант взят из статьи [3].

Следующий за процессом 1 процесс 2 определяет координаты объекта.

### Процесс 2 (определение координат объекта).

*Шаг 1.* Источник оптических сигналов объекта посылает в корректор ретрорефлекторам  $A, B, C$  одновременно сигналы в полосах частот  $A, B, C$ . Ретрорефлекторы  $A, B, C$  возвращают сигналы объектам. Каждый из этих сигналов принимает соответствующий ему приемник на объекте. С источником и приемниками сигналов соединены таймеры. При посылке сигнала источник включает одновременно все таймеры. При получении отраженного сигнала принимающий его приемник останавливает связанный с ним таймер.

*Замечание к шагу 1.* Одновременная передача сигналов на три ретрорефлектора  $A, B, C$  позволяет процессу  $SP$  исключить влияние перемещения объекта на точность измерений при выполнении компьютерами объектов быстрых процессов (см. § 5). При этом измеренные расстояния до рефлекторов в момент выполнения последнего измерения расстояния будут минимально отличаться от реальных.

*Шаг 2.* С учетом скорости сигналов  $c$  и отсчетов таймеров компьютер объекта определяет расстояния до ретрорефлекторов и, используя способ трилатерации, вычисляет координаты объекта относительно положения корректора.

Чтобы исключить влияние на приемники сигналов со стороны источника, таймеры включаются при завершении передачи сигнала и выключаются при завершении приема отраженных сигналов.

*Шаг 3.* Объект передает с помощью радиосигналов свои координаты (при необходимости, сопровождающиеся дополнительной информацией) одновременно всем объектам и с помощью специального радиосигнала  $rs^*$  информирует объекты о завершении своего измерения.

Координаты объект передает другим объектам с помощью радиосигналов в дополнительном интервале времени длительностью  $T_1$ . Эта передача может быть совмещена с измерением другим объектом его расстояния до корректора при посылке последнему оптических сигналов.

*Вариант шага 3.* Объект, посылая сигналы  $A, B, C$ , передает радиосигнал всем объектам о посылке сигнала. В моменты возвращения каждого из них объект посылает соответствующие радиосигналы другим объектам. Последние на основании полученных данных своими средствами вычисляют координаты посланного сигнала объекта.

*Замечание к процессу 2.* В процессе в каждый момент времени участвует единственный источник сигнала и единственный корректор, передающие единственный сигнал. Поэтому полезный сигнал корректора поступает в приемники раньше его внешних отражений и не влияет на измерение. На шаге 3 приемник получает сообщение с посылкой двоичных нуля и единицы разными частотами.

Требуется убедиться прежде всего в том, что упорядочение действий объектов не ограничивает скорость движения на трассе. Кроме того, приход новых объектов на участок трассы с меньшими порядковыми номерами, чем у существующих, не должен запретить последним определить свои координаты. Покажем, что эти условия выполнены.

Вначале об упорядочении действий объектов. Пусть в некотором месте участка трассы происходит событие  $S^*$  – исчезновение сигнала  $S$ . Находящиеся рядом объекты начнут передачу значения старшего разряда своего номера. Через время  $T_1$  эти сигналы покинут пределы участка. Через интервал  $T_1$  после события  $S^*$  самые удаленные от этого события объекты пошлют свои сигналы, соответствующие значению их старших разрядов номера. Через время  $T_1$  эти сигналы также покинут пределы участка и может быть начата передача следующего разряда номера и т. д.

На участке не может одновременно находиться более  $n = 3pL/5l$  объектов. Измерение их координат, следуя соотношениям (1), потребует  $T_3$  секунд, где

$$T_3 = nT_2 = n(2a + 3)T_1 = 3p(2a + 3)L^2/5lc. \quad (2)$$

При скорости  $v$  объект за время  $T_3$  сместится на  $\Delta S = vT_3$  метра. Для приведенных выше  $L = 50$  м,  $l = 2$  м,  $p = 10$ ,  $a = 26$ ,  $v = 50$  м/с имеем  $\Delta S = 7,125$  см. В результате расположение объектов на картах не изменится, объекты сместятся менее чем на 3% длины слота.

Аналогично, при входе нового объекта на участок трассы со скоростью  $v$  до занятия новым объектом одного из слотов участка измерения для всех объектов будут завершены.

Полученный результат приемлем для измерения координат, но его можно улучшить, исключив зависимость от числа  $a$  путем изменения способа нумерации объектов. Этот вопрос будет рассмотрен в § 3.

## 2.2. Правила при движении объектов на участке трассы и при входе на новый участок

Вернемся к карте, определенной в п. 1.1. Стандартное перемещение объекта от слота к слоту происходит в пределах занимаемой им полосы



движения. Перед объектом должен быть свободный участок полосы длиной не менее  $l + d$  метров. Стандартное перемещение не требует согласования с другими объектами. Переход на другую полосу движения требует согласования с объектом, находящимся на этой полосе. Детали их взаимодействия – вопрос конкретной реализации, но изложенные выше действия дают объекту возможность передать свой запрос и многократно обмениваться деталями перемещения.

Два следующих одно за другим измерения (или два одновременных измерения, выполненных из разных мест на корпусе объекта) позволяют объекту определить текущую ориентацию своего корпуса и его положение на полосе. Эти данные объект сообщает другим объектам.

Таким образом, в рамках § 2 объекты своевременно информируют соседей на участке трассы о своем положении на трассе, но процесс управления перемещением объектов не рассматривается.

Так как объект имеет карту следующего участка, на который он переходит, то для него переход сведется к смене частот сигналов и использованию карты нового участка.

### 3. УСКОРЕНИЕ ПРОЦЕССА $SP_0$

В этом разделе точность измерения координат объекта повышена путем исключения зависимости показателя степени  $a$  от количества номеров автомобилей, что уменьшает интервал времени между очередными измерениями расстояния до корректора движения.

Теперь порядок измерений диктует карта, точнее разделенный на указанные ранее  $n$  пронумерованных слотов текущий участок трассы. Начинается процесс измерений, как и ранее, но после завершения сигнала  $S$  право выполнить измерение получают поочередно все *слоты* участка. Если объект занимает несколько слотов, он подтверждает занятие каждого слота. При отсутствии на слоте объекта интервал времени, выделенный слоту, остается незанятым. Так как карты у всех объектов одинаковы, то при необходимости процесс измерения ускоряется учетом только слотов, занятых объектами. Объект на карте отмечен также индивидуальным номером автомобиля.

В результате получаем  $T_1 = L/c$ ;  $T_2 = 3T_1$ ;  $n = 3pL/5l$ ;  $T_3 = 3nL/c$ . Теперь за время  $T_3$  объект сместится на  $\Delta S = 3vnL/c$  метра. Для примера из п. 2.1 получим  $\Delta S = 0,375$  см. Состояние внешней среды может влиять на точность измерений (см. § 6).

Слоты позволяют использовать на участке трассы не один, а несколько корректоров. Для сло-

та или группы слотов будет выделен свой корректор, дающий наиболее четкий сигнал. Разные корректоры смогут реагировать на разные наборы полос частот  $A, B, C$ . На карте объектов будет указано, каким объектом для конкретного слота следует пользоваться.

**Об упорядочении доступа новых объектов к участку трассы.** Выше рассмотрен последовательный процесс определения положения объектов, находящихся на участке трассы. Теперь рассмотрим упорядочение доступа объектов на новый участок.

Назовем зоной доступа участок трассы, находящийся в конце участка трассы непосредственно перед корректором движения. Длина зоны доступа  $L^*$  – это длина слота, т. е.  $1,67 l$  метров, на ней может находиться не более  $n^* = p$  объектов, по одному объекту на каждой из полос. Объекты, находящиеся в зоне, удалены от ближайшего корректора на расстояние  $L^*$ . Небольшие значения  $L^*$  существенно ускоряют определение координат входящих на следующий участок объектов.

Отнесем зону одновременно к текущему и следующему участкам трассы. Перед входом в зону объект проводит измерения, используя ближайший корректор текущего участка. Находящийся в зоне объект получает право входа на первый слот следующего участка и входит в него подобно действиям всех объектов этого участка для перехода на следующий слот. То есть количество слотов участка увеличено на количество слотов зоны.

Объекты могут использовать для входа в зону порядковые номера автомобилей или номера слотов на картах объектов и применяют процессы 1 и 2. В результате они получают входные номера на следующем участке, начинающиеся с единицы (см. п. 2.1). Далее их перемещение будет отслеживаться изложенными выше способами § 2 или 3 статьи.

Необходимость упорядочения действий объектов возникает также при входе на трассу извне. Этим разделом завершается рассмотрение определения координат объектов с использованием номеров автомобилей или находящихся у объектов карт местности.

### 4. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА $SP$

В процессе  $SP$  ускорение синхронизации достигается путем исключения в периоде  $T_3$  зависимости от количества объектов  $n$ . В результате за время, требуемое в процессе  $SP_0$  для измерения времени переноса сигнала до ретранслятора для одного объекта, будут определены времена для всех объектов. За это время все объекты сместятся на

меньшее расстояние. Точность синхронизации ускорит работу объектов в режиме мобильного компьютерного кластера. Будет выполнено еще одно необходимое для этого режима условие. В распределенной системе требуется синхронизовать посылку сообщений группы объектов-источников так, чтобы они в заданном порядке (например, одновременно) поступали в группу приемников. Способ сделать это состоит в замене группы источников одним источником, который перешлет без задержки сообщения группы источников приемникам. В качестве такого источника здесь используется общий ретранслятор и обработчик сигналов [4]. Тогда источники, находящиеся на разных расстояниях от ретранслятора, учтут эту разницу, задерживая передачу сообщений в ретранслятор. Далее последний, получая синхронизованные с помощью задержек сообщения объектов, посылает их одновременно без задержки всем объектам. Синхронизация достигнута. Ретранслятор может быть более одного, что позволит общую задачу управления движением разделить на взаимодействующие, но асинхронно выполняемые задачи. Перейдем к деталям процесса  $SP$ .

Будем считать устройством, способным работать как ретранслятор, стационарный активный корректор движения, содержащий собственные приемники и источники сигналов. Такой активный корректор движения далее обозначим как  $CR$ . Будем также считать, что процесс  $SP_0$  выполнен, объекты определили расстояние до корректора и для действий процесса  $SP$  выделен отдельный канал связи, отличный от канала, занятого процессом  $SP_0$ .

Учтем также, что у каждого объекта на его электронной карте отмечена текущая удаленность от корректора для всех объектов. Считаем, что процесс  $SP_0$  выполнен и времена передачи сигналов от объектов до корректора  $CR$  известны.

Введем понятие логической шкалы – последовательности  $LS$  двоичных разрядов, каждый из которых выделен отдельному слоту карты.

В синхронизации  $SP$  в посылке шкалы  $LS$  участвуют все объекты на участке, например, следующим способом. Объекты посылают в корректор  $CR$  рассмотренный выше сигнал  $S$ , который корректор  $CR$  возвращает объектам на другой частоте в виде нового сигнала  $Scr$ . Объект, обнаруживший  $Scr^*$  – момент завершения сигнала  $Scr$ , посылает с задержкой импульсный сигнал  $s$  так, чтобы он поступил в корректор  $CR$  в середину своего разряда логической шкалы. С обеих сторон сигнала  $s$  в разряде оставлено свободное место.

Объект посылает сигнал в корректор  $CR$  с задержкой  $D = T_1 - T_i$ . Здесь  $T_1$  – время переноса сиг-

нала в пределах участка трассы,  $T_i$  – время переноса сигнала между объектом с номером  $i$  и корректором  $CR$ . При такой задержке одноименные разряды шкал всех объектов поступят в корректор  $CR$  в заданные моменты времени, образуя общую шкалу.

$CR$  ретранслирует всем объектам шкалу  $LS$  в виде аналогичной шкалы  $LS^*$ , вместо сигналов  $s$  содержащей сигналы  $s^*$  другой частоты. Из-за движения объектов положение сигнала  $s^*$  в разряде сместится и объект проведет соответствующую коррекцию расстояния до корректора  $CR$ .

Оценим влияние движения объектов на точность измерений времени объектами. Интервал времени  $\Delta t$ , занимаемый разрядом шкалы, определяется скоростью движения объектов. Движение объектов не должно приводить к переносу сигнала  $s^*$  из разряда, принадлежащего конкретному объекту, в соседний разряд, принадлежащий другому объекту. За интервал времени между отправкой объектом сигнала в корректор  $CR$  и получением ответного сигнала  $s^*$  объект может сместиться на  $\Delta s = 2vL/c$  метра. Из-за изменения расстояния сигнал  $s^*$  в шкале сместится на интервал времени  $\Delta t = \pm 2vL/c^2$  секунд, и длительность разряда шкалы не должна быть меньше этой величины. Для приведенных выше в примерах значений  $L$  и  $c$  значение  $\Delta t = 0,056$  пс. Таким образом, передача шкалы может выполняться на очень высоких скоростях. Все  $n$  разрядов шкалы будут переданы за 8,4 пс, и за время обмена объекта с корректором  $CR$  единственной парой сигналов  $s/s^*$  можно передать шкалу 396 раз. Зависимость времени измерения расстояния от количества объектов  $n$  сохранилась, но уменьшилась во много раз, что делает ее для процесса  $SP$  несущественной.

До настоящего момента в процессе  $SP$  использовался активный стационарный корректор движения  $CR$ . Покажем вариант сочетания пассивного стационарного корректора и мобильного  $CR$  ( $mCR$ ). Пусть до начала выполнения процесса  $SP$  один из объектов выделен для действия как  $mCR$ . Объект  $mCR$  определяет свои текущие координаты, измеряя расстояние до корректора  $CR$ . Координаты  $mCR$  становятся известны всем объектам, которые далее выполняют действия  $SP$ , обмениваясь сигналами с ним, а не со стационарным координатором.

Настоящий раздел завершает изложение способов синхронизации взаимодействия объектов на трассе. В следующих разделах будет рассмотрено применение процесса  $SP$  и влияние внешних помех на работу процессов  $SP_0$  и  $SP$ .

Завершая описание процессов синхронизации, обратим внимание на два известных направления исследований и разработок технических средств,





полезных при реализации рассмотренных в § 1–4 процессов:

- Может выполняться более сложный вариант синхронизации, чем оценка смещения отдельного сигнала, путем послыки специальных синхронизирующих сообщений. Так, очень точные стационарные измерения реализованы в проекте White Rabbit для физических экспериментов в ЦЕРН [8–10]. Здесь применен нониусный способ измерения дальности, заменивший послыку отдельного сигнала более сложным сообщением. Для оптоволоконных линий связи обеспечивается точность синхронизации передачи сообщений по линии лучше 100 пс на расстоянии свыше 16 км при изменении температуры в диапазоне 12,5–85,0 °С. В аппаратуру сети встроены специальные устройства, корректирующие синхронизацию.

- Механизированные средства обнаружения объектов начинают заменяться активными оптическими фазированными решетками с высокой скоростью перемещения луча [11]. В нашем случае это позволит объекту быстро определять положение корректора, более эффективно использовать энергию сигналов объекта и уменьшать помехи, вызванные отражением сигнала объекта от внешних предметов.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА *SP*

Изложенные в данном разделе решения важны для управления поведением рассматриваемых движущихся объектов, которые снабжаются все более производительными компьютерами. В результате объект может решать все более сложные задачи управления, учитывающие текущее поведение всех объектов. Но объекты связывает очень загруженный ресурс – общий канал связи. Требуются способы выполнения объектами распределенных вычислительных и управляющих операций с низкой нагрузкой на канал, позволяющей ускорить такие операции. Такие способы приведены в настоящем разделе.

В рамках данного раздела не будем различать корректоры *CR* и *mCR* и введем для них обобщающую аббревиатуру *aCR* (*active CR*).

### 5.1. Управление синхронной передачей сообщений объектов

Пусть один из объектов посылает через корректор *aCR* всем объектам команду – разрешение на синхронную передачу своих сообщений. Получив команду, объекты, желающие передать сообщение,

в ответ посылают в корректор *aCR* логическую шкалу, поместив в свой разряд шкалы единицу (сигнал  $f_1$ ). Чтобы шкалы всех объектов пришли в корректор *aCR* с совмещением одноименных двоичных разрядов, объект  $O_i$  посылает свою шкалу с задержкой  $D_i = L_{\max} - L_i$ , где  $L_i$  – расстояние от объекта  $O_i$  до корректора *aCR*,  $L_{\max}$  – длина участка трассы. Созданная так шкала поступает в корректор *aCR*, и он без задержки отправляет ее всем объектам, заменяя сигналы  $f_1$  на сигналы  $f_1^*$ . Получив от корректора *aCR* все разряды шкалы, объекты  $O_i$  посылают с задержкой  $D_i$  свои сообщения в корректор *aCR*, и последний с помощью радиосигналов рассылает полученное общее сообщение всем объектам. Объектам может потребоваться передать сообщения одно за другим, для чего достаточно передать их с учетом выполнения передачи сообщений предыдущими объектами. Получается выигрыш во времени, так как сообщения объектов передаются в виде одного сообщения со скоростью, зависящей только от выбранной частоты передачи, а не от расстояния между объектами и корректором *aCR*.

Для выполнения показанных ниже распределенных вычислений потребуется передача сообщений объектов с совмещением прихода в корректор *aCR* одноименных разрядов сообщений.

### 5.2. Устранение конфликтов доступа объектов к корректору *aCR*

В п. 5.1 синхронизацию объектов инициировала команда одного из объектов, но необходима также самосинхронизация источников сообщений. Предположим, что объекты определили расстояние до корректора *aCR*. Предположим также, что в текущий момент отсутствуют какие-либо сигналы и объекты могут начать передачу сообщений без специальной команды. Тогда объекты начинают передачу сообщений в корректор *aCR* и получают от него результат передачи. Если есть конфликт, то обязательно хотя бы в одном бите сообщения появятся одновременно сигналы  $f_1^*$  и  $f_0^*$ , созданные в корректоре *aCR* из посланных объектами сигналов  $f_1$  (двоичная единица сообщения) и  $f_0$  (двоичный ноль). Их появление воспринимается как команда начала синхронизации и выполняется процесс синхронизации, описанный в п. 5.1. Конфликт доступа устранен.

### 5.3. Одновременное получение данных о состоянии всех объектов

В статье [4] приведены только вычислительные распределенные процессы, в которых вычисления

проводятся непосредственно в процессе передачи сообщений, не требуя их задержки для вычисления. Целесообразность их применения в задачах о слежении за движением на трассе требует более подробного изучения потребностей в конкретных ситуациях. Поэтому ограничимся только общими характерными примерами.

**Оценка состояния всех параметров для всех объектов (операции «поразрядное логическое И и ИЛИ»).** Пусть состояние каждого объекта оценивается одинаковой для всех объектов совокупностью количественных параметров. Это может быть группа параметров, оценивающих состояние двигателя, тормозов, устойчивости автомобиля и т. п. Все параметры объекты передают в виде логической шкалы – двоичной последовательности, в которой каждому параметру выделен отдельный бит. Если значение параметра соответствует заданным требованиям, в бит объект заносит единицу путем передачи сигнала частоты  $f_1$ . Иначе передается ноль с помощью сигнала  $f_0$ . Объекты передают шкалы при поступлении к ним соответствующей команды через корректор по способу *SP*. В результате все шкалы объектов поступают в корректор с совмещением одноименных разрядов. Совмещенную шкалу получают все объекты. Если команда требовала выполнить над шкалами поразрядное логическое И, то наличие в разряде объединенной шкалы одновременно сигналов  $f_1$  и  $f_0$  или наличие только сигнала  $f_0$  считается нулем, иначе единицей. Если требовалось выполнить поразрядное логическое ИЛИ, то наличие в разряде объединенной шкалы одновременно сигналов  $f_1$  и  $f_0$  или наличие только сигнала  $f_1$  считается единицей, иначе нулем. Таким образом, простая синхронная ретрансляция шкал выполнила без задержки указанные вычисления за время, не зависящее от количества участвующих в ней объектов.

**Нахождение максимума (минимума).** Каждый объект имеет измеренные значения для всей совокупности указанных выше параметров. Для всей совокупности объектов для каждого параметра требуется найти его максимальное (минимальное) значение.

Для этого объекты посылают одновременно последовательность групп сообщений. Первая группа сообщений поступает в корректор *aCR* в виде единого сообщения с совмещением в нем одноименных разрядов сообщений. Такое сообщение передает старшую цифру значения первого по порядку параметра. Эту цифру представим в виде двоичной шкалы с количеством разрядов, равным основанию системы счисления, выбранной для задания значе-

ний параметров. Только один разряд шкалы, соответствующий значению цифры, равен единице, остальные – нули. Например, для десятичной цифры 6 шкала имеет вид 00010000. Теперь для поиска максимума (минимума) в каждом параметре выполняются следующие действия.

Для поиска максимума объекты получают от корректора *aCR* цифру и проверяют, послали они наибольшее значение старшей цифры или нет. Объекты, не пославшие наибольшее значение, далее в проверке для данного параметра не участвуют. Остальные передают аналогичную группу сообщений, но для следующей цифры значения параметра. Процесс продолжается до завершения проверки всех цифр всех параметров. В результате для каждого параметра будут выделены объекты, имеющие его максимальное значение. Аналогично выполняется поиск минимума.

Заметим, что логика определения максимума (минимума) не отличается от логики определения минимального значения порядкового номера в процессе 1 из п. 2.1. Но специальное представление цифр, уменьшившее количество операций обмена данными, и использование процесса *SP* существенно ускорили операцию.

**Аналого-цифровое суммирование.** Для оценки состояния всей системы объектов желательно непосредственно в корректоре *aCR* выполнять операцию суммирования группы посылаемых объектами чисел. Такие операции изложены в статье [4]. Их организация следующая. В корректор *aCR* добавляется аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Цифры суммируемых чисел представлены шкалами, как в операции определения максимума (минимума).

Покажем выполнение операции на примере суммирования десятичных цифр, одновременно посылаемых в корректор *aCR* группой объектов. Пусть в результате наложения нескольких цифр (шкал) формируется шкала 001(4)01(6)0001(7). В скобках указан уровень энергии поступающего на АЦП сигнала соответственно для цифр 7, 5, 1. Тогда корректор *aCR* раздаст всем объектам результат: передано 4 семерки, 6 пятерок, 7 единиц. Каждый объект независимо собирает сумму  $4 \times 7 + 6 \times 5 + 7 = 65$ . Для многоразрядных чисел аналогично обрабатываются цифры всех разрядов и формируется общая сумма. Для проведения вычитания формируются две суммы и проводится вычитание.

На основе таких операций создаются гистограммы, оценивающие состояние большого количества параметров системы. Для АЦП-операций нужны стабильные источники оптических сигнала-



лов. Такие источники существуют. В работе [12] приведен простой светодиодный источник с изменением выходной мощности ниже  $50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Указанные операции также выполняются за время, не зависящее от количества участников.

Приведенные операции – это примеры ассоциативной операции, в которой одновременно участвуют все объекты. Результаты операции одновременно поступают ко всем объектам и позволяют им выполнять дальнейшие действия с учетом полученных данных о состоянии всей системы.

Примеры настоящего раздела показывают, что объекты работают как единый мобильный компьютерный кластер. Он может быть разделен на асинхронно функционирующие взаимодействующие между собой малые кластеры путем применения решений статьи [13], модифицированных с учетом особенностей мобильных систем.

## 6. О ВЛИЯНИИ СОСТОЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ $SP_0$ И $SP$

Изменение состояния внешней среды, например, временное ухудшение качества передаваемых сигналов или появление помех, влияют на выполнение процессов  $SP_0$  и  $SP$ . Рассмотренные в статье решения опираются на результаты, экспериментально исследованные и применяемые на практике в ряде областей. Поэтому для оценки реализуемости предложений статьи обратимся к соответствующим опубликованным данным.

**О реализуемости пассивного корректора.** На автодорогах используются дорожные знаки, которые отражают сигнал автомобиля и в темноте четко выделяются среди отражений от других предметов. Объяснение этому – знаки содержат большое количество ретрорефлекторов. Это применение ретрорефлекторов тщательно изучено, определяется ТУ, стандартами. Так как от пассивного корректора требуется только четко отличать его отражение от отражений-помех, то его применение не отличается от приведенного, и он также может быть реализуем.

**О реализуемости активного корректора.** Эта задача проще. Приходящий в корректор и возвращаемый им сигналы качественно различны. Помехи от них проходят большой путь, отстают от полезного сигнала и не мешают измерению удаленности объекта от корректора.

**О передаче сообщений активным корректором, использующим процесс  $SP$ .** В работах [14, 15] показана следующая схема взаимодействия оп-

тических источника и приемника сообщений. Приемник посылает непрерывный оптический сигнал, который поступает в ретрорефлектор источника сообщений и возвращается им приемнику. На пути возвращаемого сигнала расположен модулятор сигналов, который возвращаемый непрерывный сигнал переводит в сообщение. Проверена работоспособность системы в тяжелых условиях – расстояние между источником и приемником 7 км, морская среда, туман, волнение. Скорость передачи данных 40 Мбит/с. Здесь структура передачи сообщения похожа на передачу сообщения активным корректором. Но последний находится в лучших условиях, используя собственный источник сигналов. Пример показывает осуществимость передачи сообщений в пределах участка трассы.

Другой пример. В статье [16] для источника оптических ненаправленных цифровых сигналов на небольших расстояниях порядка нескольких метров получена скорость передачи 400 Гб/с. Структура связи следующая. В помещении находится ненаправленный светодиодный источник, модулируемый электрическими сигналами с частотой 400 Гб/с. Сообщение, посылаемое источником, получает группа приемников, к которым подключены получатели сообщений – компьютеры. Наличие запаздывающих отражений от посторонних предметов не нарушает работу системы. Работа такого источника также близка к работе активного корректора.

Выше даны только примеры оптической связи, которые могут быть полезны при создании оптических активных корректоров. Применение радиосредств более широко распространено и здесь не приводится.

**О помехах от сигналов, создаваемых на соседних участках трассы.** Обычно такие помехи устраняют, распределяя частоты передаваемых сигналов так, чтобы соседи использовали отличающиеся частоты. Применительно к трассе это реализуется так. Соседние  $k$  участков трассы используют различающиеся частоты оптических и радиосигналов. Затем порядок повторяется и каждый участок будет отделен от помехи  $k - 1$  участком трассы. О выборе частот объект узнает из имеющейся у него электронной карты или путем опроса пассивных корректоров. В этом случае пассивный ретрорефлектор корректора должен иметь дополнительные светофильтры. Например, комбинация из трех открытых в разных сочетаниях светофильтров позволит иметь  $k = 7$ .

**Индивидуальная коррекция уровня сигнала объекта.** Подобно тому, как выполняется измере-

ние удаленности объекта от корректора, можно контролировать изменение уровня поступающего в корректор сигнала объекта. При пассивном корректоре измерение проводит объект, оценивая уровень возвращаемого в объект сигнала. Считаем условия для прохода прямого и обратного сигнала одинаковыми. Активный корректор либо посылает свой сигнал, измеряемый объектом, либо корректор содержит АЦП, который оценит уровень входящего в корректор сигнала. Так корректируется влияние внешней среды на работу системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемых способах автономной коллективной корректировки движения автотранспорта на трассе отметим их основные новые возможности.

Способы дополняют три наиболее часто применяемые виды способов: с использованием, установленных на автомобиле (объекте) радаров и лидаров, средств технического зрения и спутниковых средств навигации. Первые два способа – способы близкодействия. Они могут оценивать взаимное расположение объектов, расположенных только в пределах прямой видимости, но измеряют расстояние с высокой точностью. Третий тип определяет расположение автомобилей на большом участке трассы, ему не требуется прямая видимость, но он менее точен, чем предыдущие типы и не является автономным, зависит от внешних средств навигации. Предлагаемые в статье решения с точностью, характерной для первых двух способов, с помощью автономных средств определяют расположение объектов, находящихся на трассе вне прямой видимости.

От трех видов приведенных выше направлений предлагаемые способы отличает еще одна возможность. Простые, не имеющие компьютеров средства связи позволяют компьютерам объектов выполнять ряд важных для оценки состояния объектов *распределенных* вычислений непосредственно в сети. Эти операции выполняются во время обмена данными между объектами, не вносят дополнительные задержки, их длительность не зависит от количества участвующих в операции объектов. Точная синхронизация совместных действий позволяет совмещать одноименные разряды сообщений группы объектов, заменяя группу сообщений одним сообщением, не увеличивая количество его разрядов.

Авторы надеются, что предложенные решения будут полезны при создании все расширяющегося

рынка полностью автономных автомобильных средств, дополняя уже полученные результаты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Yurtsever, E., Lambert, J., Carballo, A., Takeda, K.* A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 58443–58469. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.
2. *Badue, C., Guidolini, R., Carneiro, R. V., et al.* Self-Driving Cars: A Survey. – 2019. – <https://arxiv.org/pdf/1901.04407.pdf>.
3. *Стецюра Г.Г.* Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов // *Проблемы управления*. – 2020. – № 6. – С.47–56. DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2020.6.5>. [*Stetsyura, G.G.* Decentralized Autonomic Synchronization of Interaction Processes of Mobile Objects// *Control Sciences*. – 2020. – No. 6. – P. 47–56. (In Russian)]
4. *Стецюра Г.Г.* Сетевая информационно-вычислительная поддержка взаимодействия подвижных роботов // *Проблемы управления*. – 2018. – № 5. – С. 56–65. DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2018.5.6>. [*Stetsyura, G.G.* Network Information-Computing Support of Automatic Mobile Objects Interaction. – *Automation and Remote Control*. – 2019. – Vol. 80. – No. 6. – P. 1134–1147. DOI: 10.1134/S0005117919060110].
5. *ГОСТ Р 60.3.3.2–2020 (ISO/TR 13309:1995)* Роботы и робототехнические устройства. Роботы промышленные манипуляционные. Методы и средства оценки рабочих характеристик роботов. [*GOST R 60.3.3.2–2020 (ISO/TR 13309:1995)* Roboty i robototekhnicheskie ustroistva. Roboty promyshlennye manipulyatsionnye. Metody i sredstva otsenki rabochikh kharakteristik robotov. (In Russian)]
6. *Катюжанский Г.А., Нисневич Л.Б., Стецюра Г.Г.* Децентрализованное приоритетное управление в одноканальной системе обмена данными // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1970. – № 6. – С. 115–119. [*Katyuzhanskii, G.A., Nisnevich, L.B., Stetsyura, G.G.* Detsentralizovannoe prioritetnoe upravlenie v odnokanal'noi sisteme obmena dannymi // *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*. – 1970. – No. 6. – S. 115–119. (In Russian)]
7. *Прангишвили И.В., Подлазов В.С., Стецюра Г.Г.* Локальные микропроцессорные вычислительные сети. – М.: Наука, 1984. – 176 с. [*Prangishvili, I.V., Podlazarov, V.S., Stetsyura, G.G.* Lokal'nye mikroprotsessornye vychislitel'nye seti. – М.: Nauka, 1984. – 176 s. (In Russian)]
8. *Moreira P., Darwazeh I.* Digital femtosecond time difference circuit for CERN's timing system / *London Communications Symposium*, 2011. <http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2011/LCS1136.pdf>.
9. *Yu, Q., Liangfu, P., Yongqing, H.* An Ultrahigh Precision Network Time Synchronization Technology // *Frontiers in Signal Processing*. – 2019. – Vol. 3, no. 4. – P. 82–92. <https://dx.doi.org/10.22606/fsp.2019.34004>.
10. *Tancock, S., Arabul, E., Dahnoun, N.* A Review of New Time-to-Digital Conversion Techniques // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2019. – Vol. 68, no. 10. – P. 3406–3417. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2936717>.
11. *Sun, J., Timurdogan, E., Yaacobi, A., et al.* Large-Scale Nanophotonic Phased Array // *Nature*. – 2013. – Vol. 493. – P. 195–199. DOI:10.1038/nature11727.



12. *Bosiljevac, M., Babić, D., Sipus, Z.* Temperature-Stable LED-Based Light Source without Temperature Control // Proceedings of SPIE OPTO. – San Francisco, CA, USA, 2016. – Vol. 9754. – P. 1–6. DOI: 10.1117/12.2211576.
13. *Стецюра Г.Г.* Компьютерные кластеры с быстрым аппаратным выполнением синхронизации сообщений и распределенных вычислений сетевыми средствами // Проблемы управления. – 2020. – № 4. – С. 61–69. DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2020.4.7>. [*Stetsyura, G.G.* The Computer Clusters with Fast Synchronization of Messages and with Fast Distributed Computing by the Network Hardware. – Control Sciences. – 2020. – No. 4. – P. 61–69. (In Russian)]
14. *Rabinovich, W.S., Goetz, P.G., Mahon, R., et al.* 45 Mbps Cat's Eye Modulating Retroreflectors // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, no. 10. – 104001. <https://doi.org/10.1117/1.2789634>.
15. *Rabinovich, W.* Optical Modulating Retro-Reflectors // Part 4.13 in *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. – Cambridge University Press, 2012. – P. 328–350.
16. *Gomez, A., Shi, K., Quintana, C., et al.* Design and Demonstration of a 400 Gb/s Indoor Optical Wireless Communications

Link // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol. 34, iss. 22. – P. 5332–5339.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.*

*Поступила в редакцию 8.02.2021,  
после доработки 12.10.2021.  
Принята к публикации 18.10.2021.*

**Стецюра Геннадий Георгиевич** – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
✉ [gstetsura@mail.ru](mailto:gstetsura@mail.ru),

**Мосин Олег Викторович** – гл. эксперт Департамента безопасности АО «Рособоронэкспорт»,  
✉ [mosin.oleg@gmail.com](mailto:mosin.oleg@gmail.com).

## AUTONOMOUS COLLECTIVE ADJUSTMENT OF VEHICLES MOTION ON A HIGHWAY

G.G. Stetsyura<sup>1</sup> and O.V. Mosin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Rosoboronexport, Moscow, Russia

<sup>1</sup>✉ [gstetsura@mail.ru](mailto:gstetsura@mail.ru), <sup>2</sup>✉ [mosin.oleg@gmail.com](mailto:mosin.oleg@gmail.com)

**Abstract.** This paper describes a fully autonomous decentralized method for synchronizing the interaction of vehicles moving on a highway. The method synchronizes the vehicles using simultaneous signal transmission from a group of transmitters to a group of receivers. With this feature, data exchange speed is increased, and the computing abilities of vehicles are connected into a moving computing cluster. The autonomous system operates without external controllers. Due to decentralization, the group of vehicles implements the synchronization process without any system control center. The group members interconnect via wireless optical and radio communication channels. There are two interacting stages of the synchronization process. The first stage is intended to perform decentralized coordination and information exchange within the group and determine the location, speed, and motion direction of the group members. The first stage passes initial information to the second stage. The second stage provides much more accurate vehicle tracking data and simultaneous information exchange between the groups of transmitters and receivers. Message transmission is synchronized very precisely (up to a single bit). In particular, necessary information about  $n$  vehicles is quickly acquired and transmitted to all receivers using one common message containing no more than  $n$  digits. Thus, the provided solution allows collecting the necessary information for vehicle coordination on highway sections, combining every vehicle's computing capability into one mobile computing cluster.

**Keywords:** autonomous vehicles, vehicle synchronization, decentralized object control, group interaction of mobile objects, fast in-network computing.

## **АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТИ СЛОЖНЫХ СЕТЕВЫХ ИНФРАСТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

Г.Г. Гребенюк, С.М. Никишов, Л.А. Серeda

**Аннотация.** Предлагается метод анализа уязвимости сетевых инфраструктур, использующий генетический алгоритм поиска сечений, блокирующих пути доставки ресурсов от их источников к потребителям. Рассмотрены известные подходы к решению сетевых задач, основанные на комбинаторном и эволюционном подходах. Особенностью предложенного метода является выбор функции приспособленности в виде алгоритма вычисления количества путей в графе при изоляции от графа вершин, составляющих особь. Для оптимизации функции приспособленности и вычисления количеств путей используются матрица достижимости графа и простые математические операции. Показана эффективность генетического алгоритма по сравнению с комбинаторными методами, поскольку время получения решения при поиске множественных отказов существенно меньше по сравнению с алгоритмами полного перебора.

**Ключевые слова:** безопасность, инженерные сети, уязвимость, надежность, комбинаторные алгоритмы, модели для анализа повреждений, важнейшие элементы инженерной сети, генетические алгоритмы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В качестве объекта исследования в статье рассматривается сетевая инфраструктура – сложная техническая система (электрическая, газовая и др.) [1].

Под уязвимостью понимается внутреннее свойство объекта, создающее восприимчивость к воздействию источника риска, которое может привести к какому-либо последствию [2]. Наличие уязвимости способствует реализации угрозы. Угрозами для рассматриваемых технических систем являются деструктивные воздействия в виде природных катаклизмов, атак террористов, отказов технической природы элементов системы и др. К (негативным) последствиям реализации угроз относится прежде всего потеря работоспособности крупных потребителей (предприятий, научных центров и др.), вызванная прерыванием поставок любых видов ресурсов. Такое понимание уязвимости технической системы соответствует определению надежности системы снабжения, прямо связанной с непрерывностью обеспечения ресурсами потребителей.

В качестве внутреннего свойства объекта в статье рассматривается его структура, в которой существуют наборы узлов (вершин, элементов), да-

лее именуемых ключевыми, деструктивные воздействия на которые нарушают непрерывность обеспечения потребителей ресурсами.

Для поиска ключевых узлов применяются различные методы и модели, одним из которых является математическое моделирование физических процессов в сетях электро-, газо-, тепло-, водоснабжения и др. К недостаткам такого подхода относятся необходимость использования информации о параметрах и режимах функционирования системы, которые должны быть введены в модель, случайный характер возникновения аварийных ситуаций, а также низкая скорость расчета системы алгебраических и дифференциальных уравнений высокого порядка для сложных объектов.

Более предпочтительным является применение методов топологического анализа систем, представленных в виде графа [3–6]. Такой подход является удобным по той причине, что для его реализации используется только описание структуры графа в виде вершин и связей между ними. Недостатки топологической модели проявляются в получении избыточных решений из-за неучета данных о режимах и параметрах системы. Частично эти недостатки устраняются при переходе к взвешенным графам, ребрам и вершинам которых присвоены такие характеристики сети, как пропускная способность, мощность и др.



Применение топологических методов дает приемлемые результаты для сетей небольшой размерности (десятки вершин), но с увеличением масштаба сети существенно возрастает время вычисления. Например, при поиске множественных отказов с помощью метода полного перебора количество исследуемых вариантов определяется числом сочетаний из  $n$  (число элементов в системе) по  $k$  (число повреждаемых элементов), в результате чего время вычисления растет экспоненциально. Известные методы построения минимальных сечений, такие как метод Петрика или метод непересекающихся множеств [7, 8], не устраняют указанный недостаток.

Генетический алгоритм уменьшает вычислительные проблемы при поиске ключевых элементов. С помощью такого алгоритма находится минимум (или максимум) некоторой функции (функции приспособленности), характеризующей состояние исследуемой инфраструктуры. К его основным достоинствам относятся:

- функция приспособленности может быть выполнена в виде алгоритма,
- простота реализации,
- отсутствие влияния разрывов функции приспособленности на поиск решения.

Основной недостаток генетических алгоритмов связан с неопределенностью нахождения глобального оптимума. Однако при поиске ключевых элементов с помощью предложенной ниже методики этот недостаток может быть преодолен.

Эволюционный подход имеет различное применение в сетевом анализе. Например, в работах [9, 10] с помощью генетического алгоритма выполняется оценка уязвимости энергосистемы при отключении ее элементов и реакции на них системного оператора.

В докладе [11] с помощью генетического алгоритма проводится анализ уязвимости электрических сетей для двух уровней оптимизации. При оптимизации верхнего уровня находится максимальный ущерб, нанесенный энергосистеме, который измеряется по величине сброса нагрузки. При оптимизации нижнего уровня этот ущерб сводится к минимуму посредством выбора оптимального режима работы энергосистемы. Особенность модели, представленной в работе [11], заключается в том, что среди различных доступных корректирующих действий у системного оператора есть возможность изменять топологию сети.

В статье [12] рассматривается поиск оптимальных вариантов технического обслуживания объектов инфраструктуры. Оптимальными являются те решения, которые минимизируют стоимость жизненного цикла сети при одновременном выполне-

нии требований к надежности и функциональности. Для прогнозирования эффективности функционирования объектов инфраструктуры используется модель на основе цепи Маркова.

В докладе [13] представлен подход к поиску оптимальных способов защиты инфраструктурных активов (добавление или изменение инфраструктуры в ответ на чрезвычайную ситуацию и т. д.) для сложных национальных и международных сетевых структур, таких как транспорт, телекоммуникации, финансы, энергетика и др., и исследуются их взаимосвязи.

Генетический алгоритм, предложенный в статье [14], применяется для решения задачи совместной работы системного оператора и энергосистемы. Алгоритм рассчитывает управляющие корректирующие действия для минимизации сброса нагрузки энергосистемы. В результате решения выявляются элементы сети, приводящие к наиболее тяжелым последствиям при отказах.

Потенциальные уязвимости в энергосистеме, рассмотренные в работе [15], могут быть выявлены путем определения тех линий передач, отказы которых вызывают максимальные нарушения в сети. В этом исследовании в модели сетевой инфраструктуры использовались уравнения мощности переменного тока. Отказы активизировались повышением сопротивления линий электропередач. Результатом анализа является выявление тех линий электропередачи, для которых незначительные возмущения проводимости приводят к серьезным нарушениям в сети, падению напряжения и отключению потребителей.

В статье [16] генетический алгоритм применяется для поиска уязвимых участков линий электропередач. Оценка уязвимости линий позволяет путем моделирования определить проблемные места такой инфраструктуры и оценить возможность появления каскадных сбоев.

Для улучшения стабильности напряжения системы в различных условиях эксплуатации в статье [17] предложены два подхода, основанные на генетических алгоритмах. В первом подходе при управлении в нештатном состоянии используется корректирующее воздействие, оптимизирующее индекс стабильности по напряжению. Второй подход включает в себя поиск оптимального размещения компенсаторов, а также управление генератором для минимизации индекса стабильности по напряжению.

В статье [18] рассматривается задача выбора оптимального местоположения систем накопления энергии, решение которой позволяет уменьшить уязвимость энергосистемы. В этом исследовании анализируются воздействия на шины и произво-

дится поиск наиболее уязвимых из них. Выбор оптимального местоположения осуществляется с помощью генетического алгоритма.

Применение генетических алгоритмов для оптимизации решений по защите и восстановлению инфраструктуры при авариях или катастрофах и нахождении активов, необходимых для поддержания сети в рабочем состоянии, рассмотрено в работе [19].

Довольно часто генетические алгоритмы применяются для настройки нейронных сетей [20–22].

Указанные выше работы отличаются между собой не только областью исследования, конкретными решаемыми задачами, но и выбором функции приспособленности. Ниже рассматривается задача поиска ключевых элементов в инженерных сетях на основе специально сконструированной для этого функции приспособленности.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемые технические системы имеют сетевую организацию, которую можно представить в виде неориентированного или частично ориентированного графа  $G = \{V, R\}$ , где  $V$  – множество вершин графа,  $R$  – множество ребер графа [23].

Множество вершин  $V$  описывается тройкой  $\{S, C, U\}$ , где  $S$  – множество источников энергии,  $C$  – множество потребителей и  $U$  – множество вершин сети, в которых осуществляется преобразование энергии (трансформаторные подстанции), распределение энергии (распределительные устройства, отпайки), передача энергии (электрические линии):

$$V = S \cup C \cup U.$$

Обозначим  $C_z$  заданное подмножество наиболее важных вершин-потребителей,  $V_\alpha$  – искомое подмножество ключевых вершин.

Тогда постановку задачи можно сформулировать следующим образом. Для графа  $G = \{V, R\}$  необходимо определить минимальное подмножество ключевых вершин  $V_\alpha$ , при исключении которых из графа  $G$  нарушается достижимость вершин  $C_z$  из вершин  $S$ , где  $V_\alpha \in U$ .

С применением генетических алгоритмов связаны такие понятия, как особи, популяции, хромосомы и функции приспособленности. Для рассматриваемой задачи эти понятия определяются ниже.

Под особью  $\theta_d = \{V_\alpha\}$  понимается набор из ключевых вершин  $V_\alpha$ , отказ которых приведет к отключению важных потребителей (где  $d$  – номер особи в популяции и  $\alpha$  – число вершин графа, составляющих особь). Количество вершин графа, содержащихся в одной особи  $\alpha$ , целесообразно вы-

бирать по числу одновременно происходящих отказов (одиночные отказы, двойные, тройные и т. д.), влияние которых на систему требуется оценить:  $V_\alpha \in U$ .

Популяция  $P = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ , где  $k$  – размер набора из множества особей, среди которых производится выбор наилучших. Величина  $k$  фиксирована и связана с размерностью графа  $n$ . Обычно число  $k$  выбирается в процентах от общего числа вершин  $n$  в диапазоне от 5% до 15% ( $k/n = 0,05 \div 0,15$ ). При большой размерности задачи диапазон значений  $k$  может быть меньше, например,  $k/n = 0,03 \div 0,10$ .

Хромосома – это числовой вектор (или строка) представляющий конкретную особь в виде бинарной строки, каждый разряд которой называется геном. Например, хромосома особи  $\theta_5 = (v_3, v_2, v_{15}, v_{50})$ , содержащей четыре вершины (четырёхкратный отказ) может иметь вид, представленный на рис. 1.

$\theta_5$			
000011	000010	001111	110010
$v_3$	$v_2$	$v_{15}$	$v_{50}$

Рис. 1. Представление особи в виде хромосомы

Функция приспособленности  $F(\theta_d)$  позволяет найти особь, которая в наибольшей степени влияет на общее число маршрутов по доставке ресурсов потребителям. Оценку этой величины будем производить алгоритмически [24], подсчитывая число путей ограниченной длины (3–5 шагов), оставшихся между вершинами графа после изоляции элементов, составляющих особь. Расчет количества путей будем производить с помощью возведения матрицы смежности в степень. Известно, что если при возведении матрицы смежности в степень  $m$  использовать не правила булевой алгебры, а обычные арифметические действия, то элемент  $e_{i,j}$  матрицы смежности  $E$  будет равен числу ориентированных маршрутов длины  $m$  из вершины  $i$  в вершину  $j$  [25].

Выбор небольшого числа шагов  $m$  и, соответственно, небольшого показателя степени вызван необходимостью уменьшить время работы алгоритма при возведении матрицы в степень. Предполагается, что если изоляция вершин, составляющих особь, уменьшает общее количество путей в графе при небольших показателях степени  $m$ , то это также приведет к уменьшению числа путей доставки ресурсов от источников до потребителей. Проверка наличия путей доставки ресурсов производится в три этапа.



1. С помощью генетического алгоритма находится особь, изоляция вершин которой в наибольшей степени уменьшает общее количество путей в графе длины  $m$ .

2. Производится проверка наличия путей доставки ресурсов от источников до потребителей.

3. Если маршруты от источников до потребителей отсутствуют, вершины являются ключевыми и расчет заканчивается, в противном случае – расчет повторяется.

Блок-схема генетического алгоритма представлена на рис. 2.

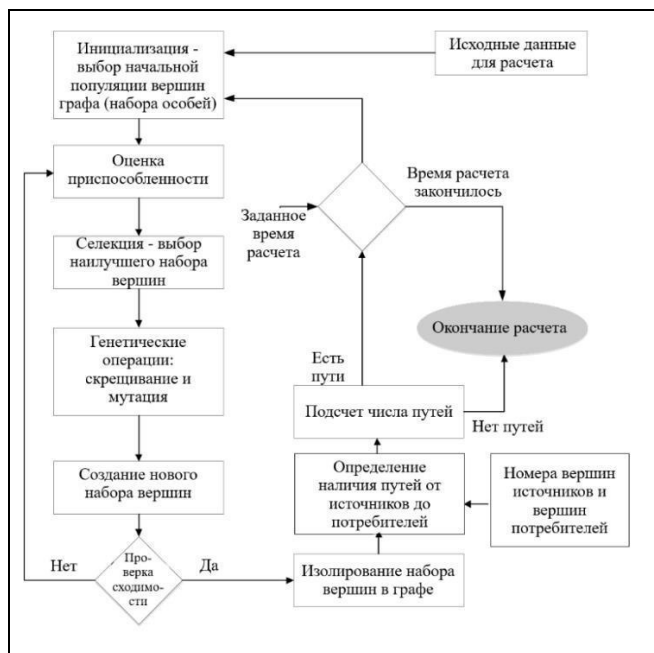


Рис. 2. Блок-схема генетического алгоритма для нахождения ключевых вершин сети

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

### 2.1. Подготовка исходных данных для расчета

Исходная информация по графам обычно задается в виде таблиц парных связей или списков смежности. Для того чтобы упорядочить исходную информацию, всем вершинам сети присваиваются значения номеров от 1 до  $n$ ,  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ , и в соответствии с этими номерами создается матрица смежности графа  $E$ :

$$E = (e_{i,j}),$$

$$e_{i,j} = 1, \text{ если } (v_i, v_j) \in V,$$

$$e_{i,j} = 0, \text{ если } (v_i, v_j) \in \emptyset,$$

где  $i, j$  – соответственно строка и столбец матрицы смежности.

### 2.2. Инициализация и выбор начальной популяции

Популяции имеют следующие основные особенности:

- начальная популяция формируется в виде набора особей, для каждой из которых вершины, составляющие особь, выбираются случайным образом;

- размер особи  $\theta$  фиксируется (количество вершин графа  $\alpha$  в особи постоянно);

- размер популяции  $P$  не изменяется в течение работы всего алгоритма (количество особей, составляющих популяцию  $P = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$  постоянно);

- каждая особь  $\theta_d = \{V_{\alpha}\}$  инициализируется значениями номеров вершин, которые выбираются случайным образом с помощью равномерного распределения из всего множества узлов  $V$ .

### 2.3. Оценка приспособленности

Поскольку сеть предназначена для доставки ресурсов потребителям, при выборе особи и оценке ее влияния на инфраструктуру целесообразно выполнять расчет количества путей в графе при изоляции тех или иных особей.

Общее количество путей между вершинами  $(v_i, v_j) \in V$  длиной не более  $m$  вычисляется из матрицы достижимости  $E^* = (e^*_{i,j})$ , которая представляет собой сумму возведенных в степень матриц смежности  $E$ :

$$E^* = E + E^2 + E^3 + \dots + E^m.$$

Обозначим общее количество путей в графе длиной не более  $m$  через  $S$ :

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e^*(i, j),$$

где  $n$  – общее количество вершин графа.

Для проверки восприимчивости инфраструктуры к воздействию той или иной особи  $\theta_d$  необходимо изолировать в графе соответствующие этой особи вершины. Для этого в матрице смежности значения элементов, соответствующих этим вершинам, принимаются равными нулю. Затем производится новый расчет матрицы достижимости и вычисляется новое количество путей:

$$\tilde{S} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e^*(i, j),$$

где  $\tilde{S}$  – количество путей в графе при изоляции вершин, входящих в особь  $\theta_d$ .

Разделив количество всех путей в графе на число всех вершин, получим  $S_{cp}$  – среднее количество путей, приходящееся на одну вершину:

$$S_{cp} = \frac{\tilde{S}}{n}.$$

Тогда выражение для функции приспособленности будет иметь вид:

$$F(\theta_d) = \min(S_{cp}).$$

Следовательно, с помощью функции приспособленности определяется такая особь  $\theta_d$ , при изоляции вершин которой достигается минимальное среднее число путей  $S_{cp}$ .

Для демонстрации работы алгоритма рассмотрим граф  $G$  сети из десяти вершин по поставке ресурсов от поставщиков  $(v_1 v_2) \in G$  до потребителя  $v_{10}$  на (рис. 3). Для проверки влияния особи на количество путей изолируем от сети входящие в ее состав вершины  $(v_5 v_8) \in G$ . Для этого обнулим соответствующие строки и столбцы матрицы смежности (табл. 1) и вычислим количество путей в матрице достижимости.

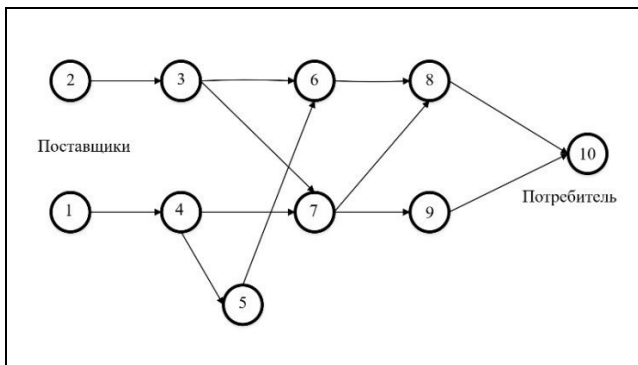


Рис. 3. Граф  $G$  сети поставки ресурсов от источников потребителям

Результаты расчета для графа  $G$  общего количества путей длиной не более трех –  $S$  и  $S_{cp}$ , без удаления вершин и при удалении различных пар вершин соответственно, – представлены в табл. 2.

Видно, что минимальное среднее число путей, приходящееся на одну вершину, получается при изоляции вершин  $v_6$  и  $v_7$ . В этом случае прерываются все пути между поставщиками и потребителями.

#### 2.4. Операции селекции, скрещивания и мутации

В данном алгоритме используется ранговая селекция. При таком способе после вычисления значений приспособленности для скрещивания выбиралось  $(l \times k)$  лучших особей, где  $l$  – относительное

Таблица 1

Матрица смежности графа при изоляции вершин

		$v_5$ и $v_8$									
		$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$	$v_8$	$v_9$	$v_{10}$
$v_1$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
$v_2$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
$v_3$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
$v_4$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
$v_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$v_6$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
$v_7$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
$v_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$v_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
$v_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблица 2

Результаты расчета для графа  $G$

Номера удаляемых вершин	$S$	$S_{cp}$	Количество путей от источников до потребителя	Пути от источников до потребителя
–	45	4,5	6	1,4,7,9,10 1,4,7,8,10 1,4,5,6,8,10 2,3,6,8,10 2,3,7,8,10 2,3,7,9,10
5, 8	23	2,3	2	2,3,7,9,10 1,4,7,9,10
6, 7	11	1,1	0	–
3, 9	26	2,6	2	1,4,7,8,10 1,4,5,6,8,10

число лучших особей в популяции,  $k$  – размер популяции. От числа  $l$  зависит влияние селекции на выживание особей в популяции. В данной работе было выбрано значение  $l$  в интервале от 0,3 до 0,5.

Отобранные в результате селекции особи с заданной вероятностью подвергаются одноточечному скрещиванию (перетасовке бинарных строк), в результате чего потомки получают по половине случайным образом определенных признаков от

каждого из родителей. Созданные таким образом потомки образуют новую популяцию заданного размера  $k$ .

Мутация необходима для предотвращения возможного попадания в локальный экстремум. Поскольку особи представляют собой бинарные строки, мутация заключается в инвертировании (0 заменяется на 1 и наоборот) случайно выбранного гена для одной случайно выбранной особи. В данной работе частота мутаций задается в начале расчета и в дальнейшем не изменяется.

Критерием окончания поиска решения для одного поколения эволюции является отсутствие изменений величины функции приспособленности после селекции и мутации. После этого найденная особь должна быть проверена на изоляцию важных вершин-потребителей от источников. Для этого вычисляются пути от источников до потребителей с помощью алгоритма Флойда – Уоршелла. В случае если проверка показала наличие таких путей, необходимо снова запустить генетический алго-

ритм и начать процесс поиска нового решения для нового поколения эволюции.

## 2.5. Пример применения генетического алгоритма

Проверка алгоритма проводилась на графе фрагмента реальной сети, представленном на рис. 4.

Для графа электросети, состоящего из 47 элементов и включающего 15 источников и 5 потребителей, исследовались случаи шестикратных отказов элементов.

В табл. 3 представлены сечения (наборы отключаемых вершин) и количество отключенных потребителей. Видно, что глобальный оптимум (отключение всех потребителей от сети) достигнут только в одном случае из шести. Время, необходимое для получения одного решения, примерно равно трем секундам. Источники и потребители при анализе не рассматриваются (отключены в программной реализации), поскольку такой вариант считается тривиальным и виден просто из рисунка графа.

Данный подход может быть распространен на сети большей размерности после их представления в виде графа.

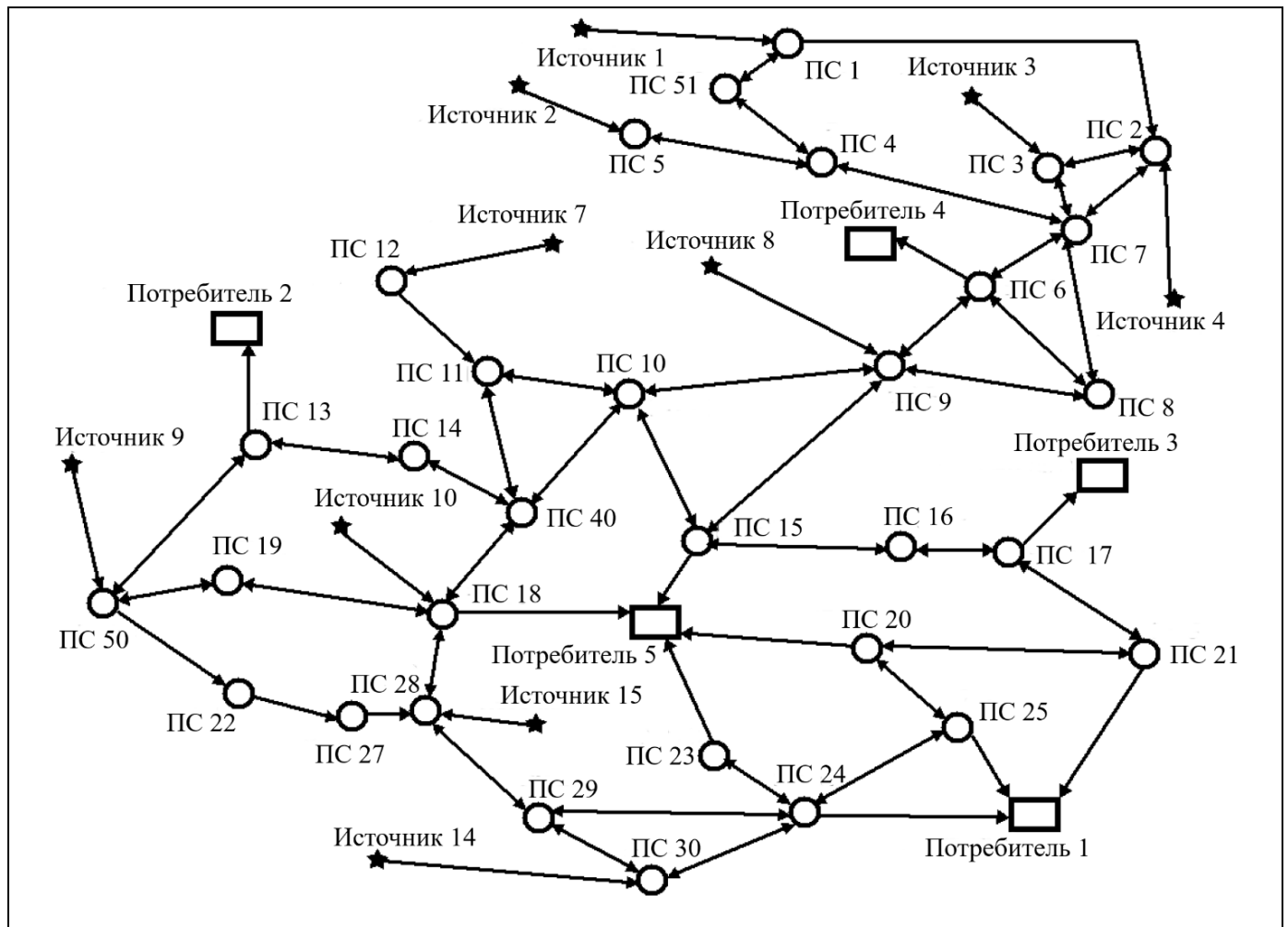


Рис. 4. Граф фрагмента электросети

## Результаты расчета поиска сечений в графе фрагмента электросети

Отключаемые вершины	ПС 7, ПС 10, ПС 24, ПС 18, ПС 13, ПС 9	ПС 7, ПС 15, ПС 10, ПС 13, ПС 24, ПС 18	ПС 51, ПС 22, ПС 18, ПС 10, ПС 9, ПС 24	ПС 40, ПС 15, ПС 9, ПС 7, ПС 24, ПС 13	ПС 7, ПС 9, ПС 10, ПС 18, ПС 17, ПС 24	ПС 29, ПС 9, ПС 10, ПС 18, ПС 7, ПС 24
Количество отключенных потребителей	5	4	4	4	4	4

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование публикаций, посвященных генетическим алгоритмам, показало, что, несмотря на их широкое применение, для блокирования поставки ресурсов важным потребителям такие алгоритмы не применяются. В то же время недостатки, присущие традиционным методам, делают актуальным исследование применения генетических алгоритмов для решения подобных задач.

В рассмотренном генетическом алгоритме для вычисления функции приспособленности предложено использовать оценку среднего количества путей, приходящихся на одну вершину графа при изоляции особей. Сама реализация генетического алгоритма для решения задачи поиска сечений в инфраструктурах не представляет большой сложности.

При поиске множественных отказов в сетях большой размерности с помощью предложенного генетического алгоритма время вычисления существенно меньше по сравнению с методом полного перебора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Bhamidipati, S., Van Der Lei, T.E., Herder, P.M.* A Layered Approach To Model Interconnected Infrastructure And Its Significance For Asset Management // *European Journal Of Transport And Infrastructure Research*. – 2016. – Vol. 16, no. 1. – P. 254–272. doi:10.18757/Ejtir.2016.16.1.3130/
2. *ГОСТ Р 53114-2008.* Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. – М: Стандартинформ, 2018. – 16 с. [*ГОСТ R 53114-2008. Zashchita informacii. Obespechenie informacionnoy bezopasnosti v organizacii. Osnovnye terminy i opredeleniya*. – М:Standartinform, 2018. – 16 s. (In Russian)]
3. *Cagno, E., Grande, O., Trucco, P.* Towards an integrated vulnerability and resilience analysis for underground infrastructures // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2011. – Vol. 96, iss. 1. – P. 139–148.
4. *Valencia, V.V., Maj, P.E.* Network Interdependency Modeling for Risk Assessment on Built Infrastructure Systems. – 2013. – [https://pdfs.semanticscholar.org/95ba/f36ae65157638a83f82084c39884b3f0fcb2.pdf?\\_ga=2.74081425.2003714931.1570034586-1895369083.1570034586](https://pdfs.semanticscholar.org/95ba/f36ae65157638a83f82084c39884b3f0fcb2.pdf?_ga=2.74081425.2003714931.1570034586-1895369083.1570034586).
5. *Dorri M.X., Roschin A.A., Sereda L.A.* Применение программного комплекса РДС для расчетов и визуализации последствий выхода из строя инженерных сооружений // *Автоматизация в промышленности*. – 2017. – № 11. – С. 11–14. [*Dorri. M.Kh., Roschin, A.A., Sereda, L.A.* Primenenie programmogo kompleksa RDS dlya raschetov I vizualizacii posledstvij vyhoda iz stroya inzhenernyh sooruzhenij // *Avtomatizaciya v promyshlennosti*. – 2017. – No. 11. – S. 11–14 (In Russian)].
6. *Grebenyuk, G.G., Nikishov, S.M.* Blocking of Energy and Resource Supply of Target Objects in Network Infrastructures // *Automation and Remote Control*. – 2018. – Vol. 79, iss. 3. – P. 535–544.
7. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 2007. – 276 с. [*Ryabinin, I.A.* Nadezhnost' I bezopasnost' strukturno-slozhnyh system. – SPB.:Izd-vo SPb. Gos.un-ta, 2007. – 276 s. (In Russian)].
8. *Haenni, R.* Generating Diagnoses from Conflict Sets // *Proceedings of the Eleventh International FLAIRS Conference*. – Sanibel Island, Florida, USA, 1998. – URL: [www.aaai.org/Papers/FLAIRS/1998/FLAIRS98-081.pdf](http://www.aaai.org/Papers/FLAIRS/1998/FLAIRS98-081.pdf).
9. *Arroyo, J.M., Fernández, F.J.* A Genetic Algorithm for Power System Vulnerability Analysis under Multiple Contingencies // *Metaheuristics for Bi-level Optimization. Studies in Computational Intelligence*. – 2013. – Vol. 482. – P. 41–68.
10. *Arroyo, J.M., Fernández, F.J.* Application of a genetic algorithm to n-K power system security assessment // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2013. – Vol. 49. – P. 114–121.
11. *Genesi C., Granelli G., Marannino P., et al.* A genetic continuation power flow approach to assess power system vulnerability // *43rd International Universities Power Engineering Conference*. – Padua, Italy, 2008. – P. 1–5. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/4651440>.
12. *Morcous, G., Lounis, Z.* Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms // *Automation in Construction*. – 2005. – Vol. 14, iss. 1. – P. 129–142.
13. *Permann, M.R.* Toward Developing Genetic Algorithms to Aid in Critical Infrastructure Modeling // *2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*. – Woburn, MA, USA, 2007. – P. 192–197.
14. *Agudelo, L., Munoz, N., López-Lezama, J.M.* Vulnerability assessment of power systems to intentional attacks using a specialized genetic algorithm // *DYNA*. – 2015. – Vol. 82, iss. 192. – P. 78–84.
15. *Kim, T., Wright, S.J., Bienstock, D., Harnett, S.* Vulnerability Analysis of Power Systems // *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 3, iss. 3. – P. 132–146.
16. *Karimi, E., Madani, S.M., Ebrahimi, A.* Power transmission system vulnerability assessment using genetic algorithm // *In-*



- telligent Systems in Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 3, no 3. – P. 1–10.
17. *Roselyna, J.P., Devarajb, D., Dash, S.S.* Multi-Objective Genetic Algorithm for voltage stability enhancement using rescheduling and FACTS devices // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 5, iss. 3. – P. 789–801.
  18. *Teng, J.-H., Chen, C.-Y., Martinez, I.C.* Utilising energy storage systems to mitigate power system vulnerability // *IET Generation, Transmission and Distribution*. – 2013. – Vol. 7, iss. 7. – P. 790–798.
  19. *Permann, M.R.* Genetic Algorithms for Agent-Based Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis // *Proceedings of the 2007 Spring Simulation Multiconference, Spring-Sim 2007*. – Norfolk, Virginia, USA, 2007. – Vol. 2. – P. 169–177.
  20. URL: <https://medium.com/swlh/genetic-algorithm-in-artificial-neural-network-5f5b9c9467d0>.
  21. URL: <https://towardsdatascience.com/using-genetic-algorithms-to-train-neural-networks-b5ffe0d51321>.
  22. *Anand, H., Darayi, M.* Power Network Component Vulnerability Analysis: A Machine Learning Approach // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Vol. 185. – P. 73–80.
  23. *Grebenuk, G.G., Dorri, M.Kh., Roshchin, A.A., Nikishov, S.M.* A study of influence of the structure of Heterogeneous Engineering Networks on the Reliable Operation of Large Consumers / *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017)*. – Moscow: IEEE, 2017. – Vol. 2. – P. 57–61.
  24. URL: <https://progr-system.ru/wp-content/uploads/Math/МАПКС-15-ГрафыАтак.pdf>.
  25. URL: <http://poivs.tspu.ru/ru/Math/DiscreteMath/GraphTheory/AccessibilityMatrix>.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Б. Ядыкиным.*
- Поступила в редакцию 17.05.2021,  
после доработки 1.09.2021.  
Принята к публикации 16.09.2021*
- Гребенюк Георгий Григорьевич** – д-р техн. наук,  
✉ [grebenuk@lab49.ru](mailto:grebenuk@lab49.ru),
- Никишов Сергей Максимович** – канд. техн. наук,  
✉ [nikishov@lab49.ru](mailto:nikishov@lab49.ru),
- Серда Леонид Анатольевич** – науч. сотрудник,  
✉ [sereda@lab49.ru](mailto:sereda@lab49.ru),
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
г. Москва.

## VULNERABILITY ANALYSIS OF COMPLEX NETWORK INFRASTRUCTURES USING A GENETIC ALGORITHM

G.G. Grebenyuk,<sup>1</sup> S.M. Nikishov,<sup>2</sup> and L.A. Sereda<sup>3</sup>

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup>✉ [grebenuk@lab49.ru](mailto:grebenuk@lab49.ru), <sup>2</sup>✉ [nikishov@lab49.ru](mailto:nikishov@lab49.ru), <sup>3</sup>✉ [sereda@lab49.ru](mailto:sereda@lab49.ru)

**Abstract.** This paper proposes a method for analyzing the vulnerability of network infrastructures. The method uses a genetic algorithm for finding cross-sections that block delivering resources from their sources to consumers. The well-known approaches to solving network problems based on combinatorial and evolutionary approaches are considered. A feature of the proposed method is the fitness function chosen as an algorithm for calculating the number of paths in the graph when isolating the graph vertices that make up the individual. The graph reachability matrix and simple mathematical operations are adopted to optimize the fitness function and calculate the number of paths. The efficiency of the genetic algorithm compared to combinatorial methods is shown: multiple failures are found significantly faster than using exhaustive search algorithms.

**Keywords:** safety, engineering networks, vulnerability, reliability, combinatorial algorithms, models for damage analysis, crucial elements of an engineering network, genetic algorithms.

# ДВАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ, КУЛЬТУРЕ И МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ (TECIS'2021)

## ВВЕДЕНИЕ

С 14 по 17 сентября 2021 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) в виртуальном формате прошла XX международная конференция «Технологии, культура и международная стабильность» (*Conference on Technology, Culture and International Stability – 2021, TECIS'2021*). Конференции TECIS традиционно проводятся под эгидой Международной федерации по автоматическому управлению (ИФАК, англ. IFAC). Организатором юбилейной XX конференции выступил ИПУ РАН, совместно с Национальным комитетом по автоматическому управлению и техническим комитетом – technical committee (ТС) ИФАК ТС 9.5 «Технологии, культура и международная стабильность» (*“Technology, Culture and International Stability”*) и при поддержке ТС 5.4 «Крупномасштабные сложные системы» и ТС 9.1 «Экономические, деловые и финансовые системы».

Во вступительном слове директор ИПУ РАН Д.А. Новиков приветствовал участников TECIS'2021. Он напомнил, что ИФАК является научным сообществом в сфере управления с 1957 г. В 1960 г. в Москве, в том числе на базе Института, состоялся первый конгресс ИФАК. Сегодня ИФАК – это всемирная федерация, объединяющая ученых и специалистов в сфере теории и практики управления из полусотни стран со всех континентов<sup>1</sup>. Ежегодно ИФАК проводит десятки научных конференций и симпозиумов. Научные организации России возобновили проведение конференций под эгидой ИФАК в 2009 г. В целом в СССР и России было проведено всего пять научных мероприятий ИФАК, при этом Институт являлся организатором четырех из них.

<sup>1</sup> <https://www.ifac-control.org/about/overview-of-ifac>

## 1. ТРАДИЦИИ И ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЙ ПРИНЦИП КОНФЕРЕНЦИЙ TECIS

Комитет ТС 9.5 – один из важнейших в ИФАК, традиционно имеющий дело с глобальными технологическими вызовами человечеству, последствия которых проявляются в технической, социальной и политической областях. Предтечей ТС9.5 был комитет ИФАК «Вспомогательные способы повышения международной стабильности» (*“Supplementary Ways for Improving International Stability”*, SWIIS), основанный в 1983 г. Г. Чеснатом и П. Копачеком<sup>2</sup>. Его основным направлением стало исследование и разработка возможностей применения инструментария теории управления для повышения международной стабильности в конце XX в. В начале XXI в. это позволило разработать и внедрить международные механизмы управления технологиями двойного назначения<sup>3</sup>.

В условиях ускоряющихся изменений возникают новые технологические вызовы, оказывающие влияние на техническую, социальную и политическую сферы. Соответственно, меняется и работа специалистов по управлению. Кто будет проводить исследования и разработки в этих областях? Всемирный экономический форум в Давосе в 2019 г. констатировал, что инженеры активно идут в политику. Как было сказано в программной статье в газете «Гардиан» (*“The Guardian”*), «инженеры идут в сердце политики... Это ли не способ приспособиться к быстрым изменениям?»

Традиционно основополагающий принцип работы SWIIS и ТС9.5 – *“engineering outside the*

<sup>2</sup> <https://tc.ifac-control.org/9/5>

<sup>3</sup> Технологии двойного назначения можно использовать как в мирных целях, так и для создания оружия массового поражения.



box” (что в переводе на русский язык означает «незашоренность»). Руководствуясь этим принципом, уже четверть века проводятся конференции TECIS, на которых обсуждаются глобальные аспекты развития технологий, а также их влияние на технические, социальные и политические тенденции.

## 2. ДОКЛАДЫ, СЕКЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ

Первоначально предполагалось провести заседания конференции в рамках 17 традиционных секций TECIS. Кроме того, группы ученых из разных стран подали заявки на проведение семи приглашенных секций. Международный программный комитет (МПК) и Национальный организационный комитет (НОК) поддержали проведение в рамках TECIS'2021 шести приглашенных секций.

Всего на конференцию было подано 177 докладов. Их распределение иллюстрирует рис. 1. По результатам рецензирования было принято 138 докладов (78 %). В работе конференции приняли участие 262 ученых из 25 стран – России, Австрии, Болгарии, Ирландии, Колумбии, Норвегии, Словении, США и др. Участники представляли все континенты планеты (рис. 2). Доклады конференции TECIS'2021 были опубликованы в 13-м выпуске 54-го тома журнала “IFAC-PapersOnLine”<sup>4</sup>, издаваемого “Elsevier”.

Программа TECIS'2021 включала в себя четыре пленарных заседания, панельную дискуссию, заседания 17-ти традиционных секций, а также заседания шести приглашенных секций, организованных по инициативе самих докладчиков (см. § 4 и 5).

Основные ключевые слова и фразы, к которым сами участники относили свои доклады – «интеллектуальные системы и приложения», «моделирование и имитация», «управление и автоматизация для улучшения стабильности», «искусственный интеллект» и др. (рис. 3).

<sup>4</sup> <https://www.sciencedirect.com/journal/ifac-papersonline/vol/54/issue/13>

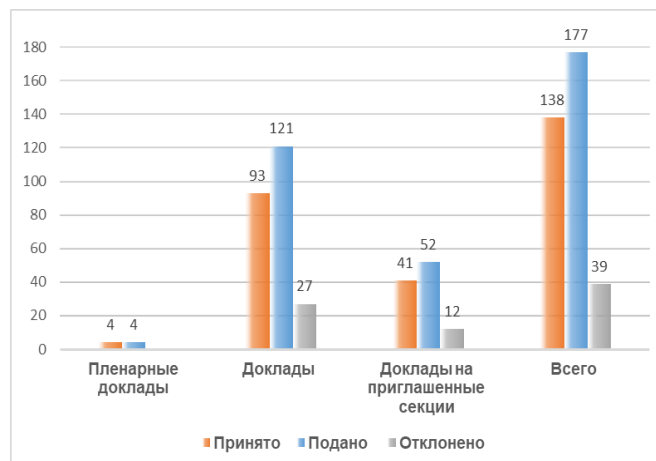


Рис. 1. Распределение представленных и принятых докладов по видам



Рис. 2. Распределение участников TECIS'2021 по континентам

## 3. ПРОГРАММА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ TECIS'2021

На основе этих количественных данных (см. рис. 3), а также содержательного анализа докладов можно выделить три базовых направления TECIS'2021:

- управление и автоматизация для улучшения стабильности;
- технологии интеллектуализации и их приложения в производстве, робототехнике, мехатронике, промышленных, медицинских и других системах;
- социальные аспекты автоматизации.

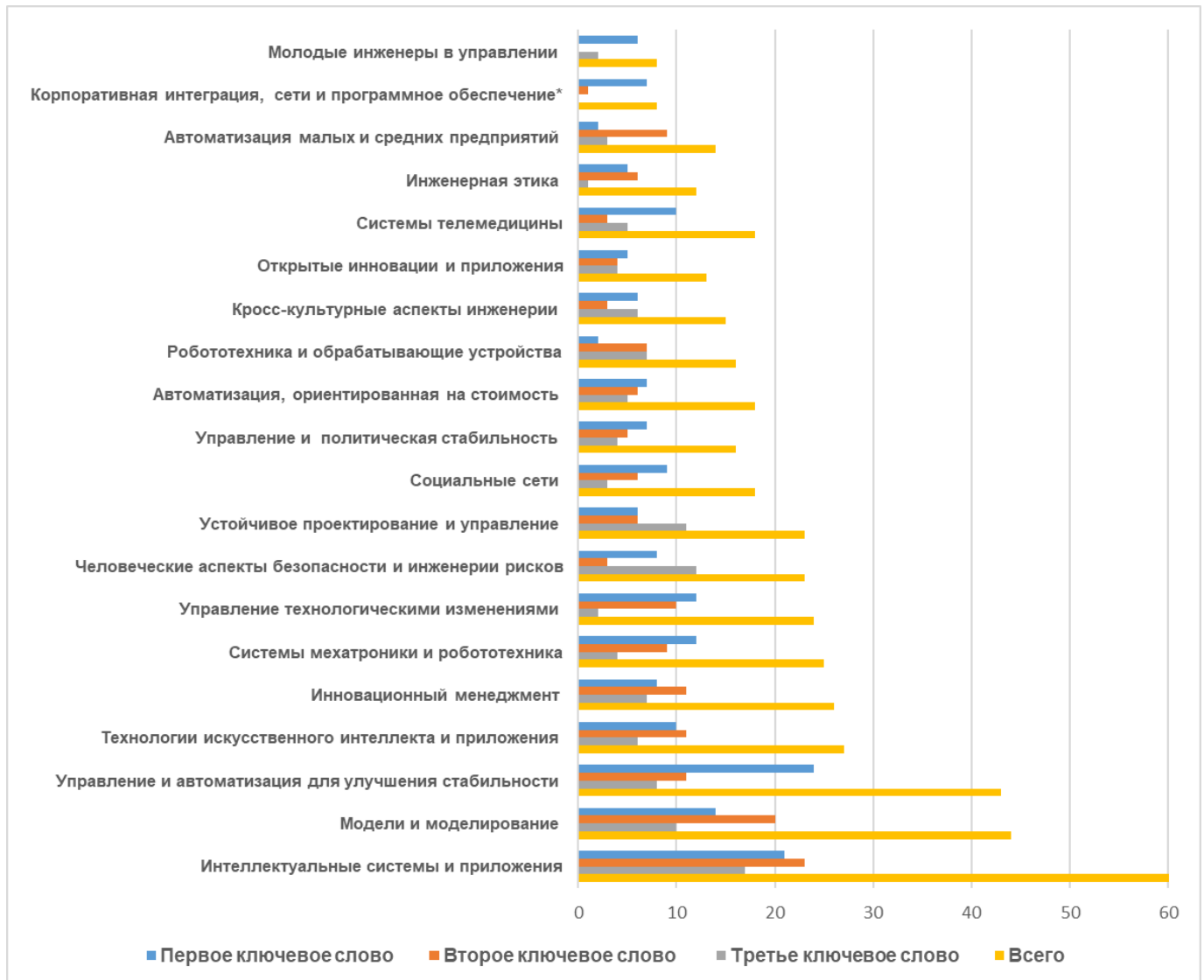


Рис. 3. Число ключевых слов и фраз, использованных в докладах TECIS'2021

#### 4. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ И ПАНЕЛЬНАЯ ДИСКУССИЯ

Заседания конференции открывал пленарный доклад *П. Копачека* (Технический университет Вены) и *М. Дойл-Кент* (Технологический институт Уотерфорда, Ирландия) на тему «Избранные тенденции развития TECIS». Авторы доклада отметили, что технологии автоматизации и связанные с ними информационные системы – важные составляющие всех видов объектов, систем и социальных отношений развитых стран. Развивающимся же странам нужен в основном доступ к этим технологиям и системам для повышения уровня жизни их населения. Отвечая этим запросам времени, ИФАК движется в сторону совершенствования управления взаимодействием человека и машины для

укрепления социальной и международной стабильности.

Авторы основываются на социально-техническом подходе к созданию технологий Индустрии 4.0. Суть его в том, что новые технологии должны создавать благоприятные условия для повышения уровня и качества жизни работников. В рамках экономически ориентированной автоматизации авторы выделили тенденции развития экологичных технологий, мехатронные системы и робототехнику, умные фабрики и продукты. Рассмотрены также основные аспекты автоматизации с использованием систем роботов. Способность роботов к обучению позволит учитывать характеристики окружающей среды, а также живых существ, которые ее населяют. Кроме того, роботы должны оценивать свое поведение в процессе





рефлексии и учиться на собственном опыте, воспроизводя естественные процессы эволюции разума живых существ. Решающее значение для создания такого рода технологий имеет разработка законодательства, стандартов и норм, адекватно отвечающих требованиям автоматизации и робототехники. В условиях возросшей технической сложности и давления со стороны конкурентов новое поколение управленцев сталкивается с проблемами управления сложными объектами междисциплинарной природы. Чтобы эффективно управлять в динамичной и часто неструктурированной среде, менеджеры должны понимать технические, организационные и поведенческие аспекты этих проблем.

*П. Грумпос* (Университет Патраса, Греция) выступил с докладом «Критический исторический и научный обзор промышленных революций». Он показал, что конференции TECIS ориентированы на то, чтобы теории и технологии управления и автоматизации способствовали тому, чтобы мир стал более стабильным местом для всех жителей Земли. Традиционное видение сообщества ученых, объединившихся вокруг конференций TECIS, – это цивилизация, в которой технологии, системы и процессы служат всему человечеству.

*Н. Джесси* (QuinScare GmbH, Германия) представил доклад «Стратегии данных и доверие к данным – движущие силы развития бизнеса». Недостаточная компетентность в работе с данными – одна из причин, по которым компании терпят поражение в нарастающем процессе созидательного разрушения при изменениях. Автор рассмотрел три необходимые компетенции: архитектура данных, подготовка данных и обмен данными. Обладание ими является предпосылкой успешного принятия решений в компаниях.

Пандемия COVID-19 создала тяжелую ситуацию для всей планеты. Этой теме был посвящен доклад *Ф. Алескерова* (ИПУ РАН) «COVID-19 – распространение заболеваемости, карантинные меры, их эффективность». В последовавшей панельной дискуссии на тему «COVID 19, технологии и этика» приняли участие также *М. Хери* (Университет Глазго), *Д. Брандт* (Университет Аахена, ФРГ), *М. Дойл-Кент* (Технологический институт Уотерфорда, Ирландия), *И. Була* (Университет бизнеса и технологий, Приштина) и другие ученые. Участники дискуссии обсудили вопросы прогнозирования пандемии, а также использование технологий автоматизации и робототехники для борьбы с

распространением заболеваний. Дискуссия показала, что пандемия поставила ряд этических вопросов как перед отдельными гражданами, так и перед обществом в целом. Поскольку пандемия помешала принять в Москве участников TECIS'2021 со всех континентов, для создания среды их виртуального общения широко использовалось веб-приложение IFAC Conference App, предоставленное секретариатом ИФАК.

## 5. СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

На секционных заседаниях TECIS'2021 рассматривался широчайший круг актуальных научных и прикладных вопросов, частоту упоминания которых иллюстрирует рис. 3. Смело и безрассудно было бы пытаться описать все представленные на TECIS'2021 научные и прикладные результаты. Единственное, что остается, – это охарактеризовать доклады, вызвавшие наибольший интерес участников, судя по оценкам экспертов и активности пользователей в веб-приложении IFAC Conference App. Эти секционные доклады сгруппированы далее в 3-х подразделах, соответствующих базовым направлениям TECIS'2021 (см. § 3). Названия соответствующих секций выделены курсивом.

### 5.1. Управление и автоматизация для улучшения стабильности

*Управление и автоматизация для улучшения стабильности* – традиционная секция конференций TECIS, восходящая к комитету SWISS. Представленные на нее доклады *Д. Новикова* и *А. Еналеева* (ИПУ РАН) «Устойчивое управление активными системами: децентрализация и совместимость со стимулами» и «Механизмы стимулирования внедрения автоматизации управления для повышения устойчивости» вносят значительный вклад в теорию управления организационно-техническими системами. В этих работах предложены и исследованы механизмы управления, включающие в себя оптимальные процедуры планирования и стимулирования агентов. Это обеспечивает децентрализацию и неманипулируемость управления в системах с сетевой структурой связей агентов и тем самым – их устойчивое функционирование. Авторы предложили подход к организации и стимулированию повышения эффективности автоматизации в человеко-машинных комплексах при асимметричной неопределенности в контуре «человек – автоматизированная система». Разработаны совместимые со стимулами и

устойчивые к стратегиям агентов механизмы, позволяющие решать задачи «Центр – агент» при побочных платежах. Эти механизмы декомпозируют взаимодействие агентов и позволяют Центру решать задачи стимулирования и планирования независимо, сводя их к общим задачам оптимизации. Предлагаемые механизмы гарантируют, что агенты передают надежные данные и выполняют планы.

В докладах *В. Цыганова* (ИПУ РАН) «Механизм оценки политики гражданами с помощью машинного самообучения» и «Машинное обучение граждан с учителем и политическая стабильность» рассматривалась проблема стабильности социальной системы, зависящей от поставок жизненно важного товара (такого, как вакцина от COVID-19). Предполагается, что политическая стабильность достигается, если общество одобряет действия властей по увеличению предложения этого товара. Однако возможности этого предложения зависят от случайных факторов, неизвестных гражданам. Следовательно, они должны научиться распознавать и адекватно оценивать действия властей в условиях неопределенности. Данная проблема рассматривается на модели общества, состоящего из граждан, которые либо самообучаются, либо обучаются с помощью учителя (СМИ, социальных сетей и др.). Социальная стабильность гарантирована, если каждый гражданин регулярно положительно оценивает работу политика. Разработаны механизмы количественной оценки политика гражданами с помощью таких процедур искусственного интеллекта, как машинное самообучение и обучение с учителем. Найдены достаточные условия для синтеза прогрессивных механизмов, при которых политик заинтересован использовать все имеющиеся в его распоряжении возможности в интересах граждан. Функционирование этих механизмов иллюстрируется на примере машинного обучения и оценки политик вакцинации от COVID-19 в Северной Ирландии и в Великобритании в целом. Разработанные механизмы могут быть использованы любым гражданином для постоянной оценки политиков с помощью процедур машинного обучения. Для этого достаточно установить программу с такими механизмами в виде приложения на смартфоне. Так применение искусственного интеллекта будет способствовать укреплению социальной и политической стабильности.

Практические аспекты управления международной стабильностью рассмотрел *Р. Бертельсен* (Арктический университет Норвегии) в докладе «Космическая наука и технологии в Арктике: перспективы сотрудничества и разви-

тия в условиях новых вызовов безопасности». В Арктике находится ключевая инфраструктура для обеспечения ядерной стратегической стабильности, систем вооружения, раннего предупреждения и противоракетной обороны. Высокие широты Арктики дают значительные преимущества технологиям двойного назначения, которые могут подорвать международную стабильность. Во время холодной войны был создан эффективный процесс принятия решений, опосредованный теорией игр и моделированием. Однако новые технологии, гораздо более сложная многопользовательская, многонациональная среда и новые космические технологии снижают эффективность традиционных подходов. Автор предлагает преодолеть нынешний интеллектуальный вакуум путем формального описания параметров, игроков, технологий и их взаимодействия в Арктике. Задача – разработать теорию стратегического управления Арктикой в долгосрочной перспективе. Эта теория в сочетании с моделированием и эмпирическими методами обеспечит интеллектуальную основу сбалансированного управления Арктикой и обеспечения стратегической стабильности в новую эпоху.

*Н. Кереселидзе* (Государственный университет Сухуми, Грузия) представил доклад «Модели управления эпидемиологической безопасностью при распространении вируса COVID-19». Автор построил математическую модель распространения этого вируса без вакцинации и с вакцинацией на основе системы дифференциальных уравнений. Применив решения задачи Коши, он верифицировал эту модель на основе протокола эпидемиологического контроля, принятого в Грузии. Автор поставил также задачу управления национальной эпидемиологической безопасностью как задачу максимизации целевой функции, учитывающей финансовые последствия введения карантина в стране и стоимость лечения инфицированных. Вычислительный эксперимент подтвердил работоспособность компьютерной реализации модели для прогноза распространения вируса COVID-19 и показал, что аналитическое решение задачи управления национальной эпидемиологической безопасностью применимо для обоснования соответствующих решений.

В докладе *Ю. Затуливетера* и *Е. Фищенко* (ИПУ РАН) «На пути к стратегическому реинжинирингу глобальной компьютерной среды (ГКС) для управления устойчивым развитием социальных систем» рассмотрены тенденции формирования ГКС как инструмента глобаль-



ной цифровизации и влияния ГКС на социальные системы. Выявлены и проанализированы причины внутрисистемных дисбалансов в развитии ГКС и их деструктивное влияние на устойчивость социальных систем. Предложены способы устранения комбинаторных барьеров сложности интеграции сетевых ресурсов путем устранения фундаментальных причин неоднородности ГКС. Разработаны способы формирования в ГКС универсального алгоритмического пространства распределенных вычислений на базе компьютеров с не микропроцессорной архитектурой.

*Л. Стелтон* (Институт технологий Уотерфорта, Ирландия) и *Ф. Джанини* (Технический университет Вены) в своем докладе на тему «Цифровые валюты и расширение прав и возможностей сообщества в Австрии: концепция эффективного спроса Gesell как основы для местных цифровых валют» представили цифровую инфраструктуру национальных криптовалют и описали процесс их восприятия австрийским обществом. Оказалось, что местные криптовалюты имеют высокий потенциал и являются более экономически эффективными, чем глобальные криптовалюты. Эксперимент показал, что местные криптовалюты оказывают благоприятный эффект при обострении экономических кризисных ситуаций, вызванных локдаунами в процессе борьбы с пандемией.

*З. Авдеева, С. Коврига и Е. Гребенюк* (ИПУ РАН) представили доклад «Прогнозирование временных рядов на основе когнитивного моделирования для прогнозирования целевых показателей нестационарных процессов». Разработанный авторами подход позволяет повышать качество прогнозов путем построения и корректировки конкурирующих моделей на основе временных рядов с последующей активацией доминирующих моделей с помощью корректирующих сигналов. Эти сигналы формируются в режиме мониторинга и анализа качественной информации (суждений и мнений экспертов и лиц, принимающих решения). При этом используется нечеткая когнитивная карта ситуации, отражающая причинно-следственные связи и взаимозависимость системообразующих факторов нестационарных процессов.

**Устойчивость крупномасштабных систем.** *О. Дранко* (ИПУ РАН), *Ю. Рыков* (Институт прикладной математики РАН), *А. Карандеев* (Российский экономический университет) сделали доклад «Структурный анализ крупномасштабной социально-технической системы на основе концепции влияния». Авторы представили такую систему в

виде нечеткой когнитивной карты – орграфа влияния. В докладе *А. Пащенко* (ИПУ РАН) «Интеллектуальное управление для умных городов – синхронизированные решения» предложены система управления и схема интегрированного операционного центра, повышающие эффективность управления и функционирования города.

## 5.2. Технологии интеллектуализации и их приложения

Базовое направление TECIS'2021 – технологии интеллектуализации и их приложения в робототехнике, мехатронике, производственных, социальных, медицинских и других системах.

**Роботика.** *Ф. д'Аполито* и *К. Зульцбахнер* (Австрийский технологический институт) представили доклад «Управление полетом мультикоптера с использованием обучения с подкреплением». Машинное обучение (в частности, обучение с подкреплением) является глобальным трендом автоматизации и робототехники. Многие исследователи во всем мире разрабатывают интеллектуальные контроллеры, применяя методы обучения с подкреплением. Авторы представили пилотный контроллер полета с подкреплением для мультикоптера с проверкой правильности концепции. Агент был обучен в среде моделирования Airsim для достижения стабильных условий полета путем управления его креном, тангажем, рысканием и дроссельной заслонкой. После обучения агент был протестирован в той же среде для доказательства его способности поддерживать стабильные условия полета при следовании определенному маршруту.

В докладе «Стимулирующий механизм для краудсенсорных рынков беспилотных летательных аппаратов (БПЛА): переговорный подход» *Л. Хаймса, Дж. Кара* (Политехнический университет Флориды) и *Х. Кальдерона* (Университет Бетуна Кукмана, США) предлагается решение проблемы обнаружения покрытия нижних областей атмосферы, которые группа БПЛА пересекает в рамках повседневной деятельности. Благодаря датчикам БПЛА получают данные при следовании своим обычным траекториям. В этой модели участники используют переговоры, чтобы соревноваться и сотрудничать друг с другом, участвуя в сборе данных. Используя виртуальную робототехническую среду и обширное моделирование, авторы показали эффективность их алгоритма с точки зрения охвата зондирования и удержания участников при ограниченном бюджете.

В докладе *Э. Камачо* (университет Св. Томаса, Колумбия), *Н. Остина* (Национальный универси-

тет, Колумбия) и *Х. Кальдерона* (Университет Бетуна Кукмана, США) «COVID-бот: автономная платформа для обеззараживания» описан метод и реализация роботизированной платформы с открытым исходным кодом для дезинфекции закрытых территорий, таких как офисы, дома, квартиры. Предложенные решения учитывали доступность технологий для воспроизведения робота, который дезинфицирует поверхности с помощью ультрафиолетового излучения. Тестирование показало эффективность и безопасность предложенных решений.

*Н. Унанян, А. Белов* (ИПУ РАН) в своем докладе «Система управления антропоморфной рукой с дистанционным отслеживанием жестов» теоретически обосновали и разработали алгоритм автоматического управления, который был использован в представленной ими роботизированной руке с пятью захватами. Такую руку можно применять в реабилитационных системах, космонавтике, промышленности и агрессивных труднодоступных средах. Авторы представили конструкцию антропоморфного робота-манипулятора с встроенным решением для отслеживания жестов человека с помощью сенсорной перчатки с радиопередатчиком с экспериментально подтвержденной скоростью обратной связи, обеспечивающейся с помощью методов оптимизации.

*А. Степанов и М. Степанов* (Саратовский технический университет) представили доклад «Самоорганизующиеся системы управления автономными обучающими роботизированными комплексами». Чтобы адаптировать функционал робота с учетом изменения внешней среды, авторы предложили автоматически синтезировать закон управления, наиболее адекватный текущей ситуации. Для этого используются искусственные нейронные сети планирования (*artificial neural planning networks*, ANPN). Полученные результаты применяются в коррекционно-реабилитационном образовательном центре для школьников с ограниченными возможностями.

Доклад *Б. Пальяреса Оливареса, Т. Росо, Е. Камачо, Х. Гуарнисо* (Университет Св. Томаса, Колумбия) «Разработка и изготовление экономичного мобильного робота для оказания помощи по дому» был удостоен диплома за лучшую работу молодых ученых. Авторами рассмотрены конструкция, механика, электроника и программное обеспечение такого робота, а также тесты для обеспечения его правильной работы. Робот сконструирован так, чтобы его можно было использовать во многих домашних приложениях. Такой робот нетрудно оснастить нужными исполнитель-

ными механизмами, чтобы сделать его полезным для решения разных социальных задач, таких как наблюдение за пожилыми людьми, снабжение лекарствами, поддержка зависимых людей и др.

**Интеллектуальное управление для интегрированных предприятий.** Этот трек был организован *Р. Мещеряковым, Е. Жарко, А. Полетыкиным, А. Исхаковым* (ИПУ РАН) и был посвящен вопросам применения интеллектуальных методов анализа данных в задачах управления, обработки информации, а также применения перспективных методов обеспечения информационной безопасности в объектах различной природы. Компоненты современного мира, включая производства и предприятия, имеют тенденцию к большей взаимозависимости и образуют крупномасштабные сложные системы. Их системы управления опираются на вершину сложной и распределенной архитектуры, реализуя множество функций, и объединяют многочисленные цифровые компоненты. Более глубокая автоматизация крупномасштабных систем с элементами интеллектуальной поддержки и управления создает потенциал для роста производства, снижения затрат и повышения безопасности.

Коллектив авторов под руководством *Ф. Пащенко* (ИПУ РАН) представил серию докладов по результатам решения прикладных задач с применением современных методов анализа, моделирования, управления и принятия решений на основе машинного обучения, обработки больших данных и искусственного интеллекта. Так, доклад *Нгуен Ван Чонга* (Московский физико-технический институт (МФТИ)), *Ф. Пащенко* (ИПУ РАН), *Ле Дык Туна, Ву Чуен Конга* (МФТИ) «Сверточная нейронная сеть для свертки изображений аэрофотосъемки» посвящен использованию искусственного интеллекта и машинного обучения в авиационных и геоинформационных системах. Доклады *Э. Аракеляна, А. Андрюшина, С. Мезина* (МЭИ), *Ф. Пащенко* (ИПУ РАН), *А. Косого, Ю. Ягуновой* (МЭИ) были посвящены проблеме оптимального управления режимами работы ТЭЦ со сложным составом оборудования, включая традиционные тепловые агрегаты и парогазовые установки. Рассмотрена возможность применения математических методов многокритериальной оптимизации с множеством внутренних и внешних ограничений и условий в виде неравенств и балансовых уравнений. Рассмотрена также возможность интеграции алгоритмов оптимизации в прикладные программы программно-технических комплексов для повышения интеллектуальности систем автоматического управления тепловых электростанций.



В докладе *В. Акинфиева* и *А. Цвиркуна* (ИПУ РАН) «Системы поддержки принятия решений для стабильного развития малого и среднего сельскохозяйственного предпринимательства (МСП)» рассмотрены особенности моделирования бизнес-процессов МСП. Для повышения устойчивости и снижения рисков предложена система поддержки принятия финансовых решений МСП. Ее модули основаны на программном комплексе «ТЭО-ИНВЕСТ». Эта система учитывает специфику бизнес-процессов в сельском хозяйстве: продолжительность производственного цикла, учет сложности технологии переработки, использование финансового лизинга для приобретения сельскохозяйственной техники и др.

*Э. Вергини* и *П. Грумпус* (Университет Патраса, Греция) представили доклад «Нечеткие когнитивные карты расширенного состояния, примененные к модели здания с почти нулевым потреблением энергии». Экспериментальное применение указанных карт подтвердило возможность минимизации энергопотребления умного здания с учетом погодных условий.

Помимо отмеченных докладов в рамках трека возникли содержательные дискуссии в процессе обсуждения рисков кибербезопасности, порождаемых активным внедрением технологий машинного обучения в системы защиты. Был рассмотрен опыт участников в построении защищенных киберфизических систем, проектировании системы управления рисками для транспортной сети умного города, применении технологий идентификации и аутентификации субъектов с помощью fingerprinting-методов. Особый интерес вызвали доклады, связанные с проблематикой применения визуально-когнитивного подхода в системной инженерии.

**Социально-информационные аспекты управления сложными системами в условиях неопределенности и риска.** Коллектив авторов из ИПУ РАН под руководством *В. Кульбы* представил серию докладов по результатам решения прикладных задач стратегического планирования и управления на базе методологии сценарного анализа и моделирования. Эта методология предполагает исследование процессов развития сложных систем, изучение мультидисциплинарных и многоаспектных проблем, а также синтез и комплексный анализ сценариев рационального (в рамках заданных целей) развития таких систем, обеспечивая тем самым эффективную поддержку процессам подготовки, принятия и реализации управленческих решений различного уровня. Доклад

*В. Шульца, В. Кульбы, А. Шелкова, Л. Богатыревой* «Сценарный анализ проблем повышения эффективности управления расследованием киберпреступлений» посвящен трансформации правоохранительной системы для противодействия киберпреступлениям и их расследования. Сделан обзор состояния и трендов киберпреступности в мире. По результатам исследования мультиграфовой модели предложено создание национальных следственных органов по киберпреступности. В докладе *И. Чернова* «Сценарный анализ воздействия ракетно-космической деятельности (РКД) на состояние окружающей среды» представлена базовая графовая модель и проведено сценарное исследование влияния РКД на экологию и здоровье граждан. Разработаны альтернативные сценарии развития районов интенсивной эксплуатации РКД при разных стратегиях развития РКД. В докладе *В. Кульбы, А. Шелкова, З. Авдеевой* «Анализ эффективности управления противодействием коррупции на базе сценарного подхода (на примере строительной отрасли)» представлены результаты сценарного исследования соответствующих мультиграфовых моделей и показана возможность антикоррупционного анализа управленческих решений на стадиях их подготовки, принятия и контроля реализации. В докладе *Л. Богатыревой, О. Шенелевой, В. Грузмана* «Методы анализа социально-экономических систем с целью диагностирования проблем трансформации права в условиях цифровизации» предложено использовать сценарно-прогностическую экспертизу законопроектов для опережающей оценки их качества в условиях неопределенности.

Практическое применение предложенной в этих докладах методологии при решении широкого круга задач повышения эффективности организационного управления обеспечивает возможность: построения имитационных моделей, описывающих альтернативные направления развития исследуемых сложных систем и составляющих их элементов; исследования проблем с нечеткими факторами и взаимосвязями с учетом множества текущих и возможных изменений внешней среды; оценки текущей ситуации путем анализа взаимовлияний описывающих ее факторов; выявления как позитивных, так и негативных тенденций развития исследуемых ситуаций; прогнозирования возможных путей развития складывающихся ситуаций и их анализа с точки зрения ключевых целей; динамичной адаптации системы управления к возникающим изменениям и обеспечения возможности ее работы на опережение появляющихся

сложных проблем в рамках жестких временных ограничений на выработку стратегических, тактических и оперативных решений.

**Биомедицинские системы.** *А. Иванов, Н. Чиваров, К. Хрисафов* (Институт информационных и коммуникационных технологий Болгарской академии наук), *И. Будинска* (Институт информатики Словацкой академии наук) и *С. Чиваров* (Венский технологический университет) представили доклад «Телемедицинская система удаленного мониторинга пациентов с COVID-19 и другими инфекционными заболеваниями». Авторы показали, как с помощью комбинации бесплатных программных продуктов и продуктов с открытым исходным кодом в сочетании с доступным на рынке оборудованием можно создать эффективную платформу телемедицины.

**Автоматизация, ориентированная на стоимость.** В докладе *В. Бородина, А. Бородина, Д. Францева и М. Юдина* «Адаптивные автоматизированные системы управления выращиванием монокристаллов по методам Чохральского, Степанова и Киропулоса с использованием датчика веса» описаны модели и методы экономного выращивания кристаллов на ФГУП «Экспериментальный завод научного приборостроения» для нужд промышленности и науки.

### 5.3. Социальные аспекты автоматизации

С точки зрения теории, социальный аспект автоматизации – сложный объект междисциплинарных исследований, требующий согласованной формализации предметных областей на стыке гуманитарных, естественных и технических наук. В сфере такой формализации можно выделить доклады *В. Корепанова* (ИПУ РАН) «Заметки о проблеме управления аттитюдами», *В. Латынова и А. Ванина* (Институт психологии РАН) «Психологические предпосылки и возможности исправления негативных аттитюдов к мерам профилактики COVID-19», *В. Сергеева и Н. Коргина* (ИПУ РАН) «Выявление комплексных рейтинговых механизмов как подход к анализу дискретных данных».

Коллектив авторов из политехнического университета Флориды и университета Бетуна Кукмана (США), а также из Национального университета и университета Св. Томаса (Колумбия) под руководством *Х. Кальдерона* подготовили серию докладов по интеллектуальным системам и их

приложениям в социальной сфере. Например, в докладе «Автоматизированные системы на основе обработки естественного языка для поддержки общедоступных клиник» представлен алгоритм классификации запросов в клинику на естественном языке и выявления проблем для автоматической бесплатной консультации. В результате эффективность выявления этих проблем достигла 95 %.

**Технологии интегрированной помощи для оказания медицинских и социальных услуг в «стареющих» регионах.** Тематика докладов, представленных на данной секции, связана с развитием и внедрением инновационных технологий в социальной сфере «стареющих» регионов, где наблюдаются быстрые изменения возрастной структуры населения в пользу лиц старших возрастов (в том числе со снижающимися функциональными возможностями). Эти изменения формируют структуру спроса на адаптированную социальную инфраструктуру, а также на услуги здравоохранения и ухода. Требуется расширить номенклатуру и повысить качество услуг для пожилых людей. Для этого разрабатываются и внедряются новые услуги, технологии и системы, такие как «окружающая среда с обслуживанием» (*Ambient Assisted Living*) и «окружающий интеллект» (*Ambient Intelligence*). Модели и методы, применяемые в такого рода системах, ориентированы на пожилых людей и интегрированы в среду их обитания, чтобы обеспечить поддержку их независимой и автономной жизни.

*В. Рогелья* (Институт исследований систем, подверженных риску, Словения), *Д. Богатай* (Институт исследований систем, подверженных риску, и университет Любляны, Словения) и *С. Телемьятов* (Норвежский университет науки и технологий) представили доклад «Цифровая трансформация общественного здравоохранения и социальных услуг для пожилых людей». Авторы рассмотрели проблемы и возможности развития и финансирования социальной инфраструктуры применительно к ситуации в Словении. Они показали, как технологические инновации (такие, как домашняя автоматизация и роботизация, Интернет вещей, оптимизация сетей поставок) и организационные инновации (самоуправляемые сообщества) создают новые услуги, а также бизнесы и предприятия для поставки товаров и услуг пожилым людям, предоставляя новые возможности трудоустройства для молодых людей.



Ю. Петерлин, В. Димовски (университет Любляны, Словения) и М. Богатай (Институт исследований систем, подверженных риску, Словения) представили доклад «Социальные инновации, основанные на инженерных технологиях, учитывающие снижение функциональных возможностей пожилых людей». Показано, что развитие цифровых технологий (таких, как киберфизические системы, большие данные, машинное обучение, блокчейн, искусственный интеллект и Интернет вещей) открывает новые возможности для инноваций в социальной сфере. Описаны направления разработки продуктов и услуг для пожилых людей с использованием этих технологий. Рассмотрены социальные инновации, поддерживающие интеллектуальную активность пожилых людей, и примеры передовой практики в этой области с целью их систематизации и формирования перспективных направлений исследований. Особое внимание уделяется кибербезопасности и этическому аспекту технически обоснованных социальных инноваций.

С. Колнар (университет Любляны), В. Димовски, Д. Богатай (университет Любляны, Словения) представили доклад «Обзор телемедицины в умных городах, ориентированных на пожилых людей», в котором рассмотрели цифровую трансформацию социальной инфраструктуры как направление развития умных городов для поддержки автономии пожилого населения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На заключительном заседании были отмечены секции и доклады, вызвавшие наибольший интерес у участников. Их оценки основывались на активности пользователей в веб-приложении IFAC Conference App. В процессе вручения дипломов молодым ученым и в заключительных выступлениях председатель МПК П. Копачек и его заместитель Л. Стелтон отметили высокий научный и практический уровень прошедшей конференции. Член МПК и НОК З. Авдеева поблагодарила за помощь в организации TECIS'2021 членов НОК, П. Копачека и Л. Стелтона, а также сотрудников секретариата ИФАК.

З.К. Авдеева, член МПК и НОК  
С.В. Коврига, член НОК  
В.В. Цыганов, член МПК и НОК

Авдеева Зинаида Константиновна – канд. техн. наук,  
✉ avdeeva@ipu.ru,

Коврига Светлана Вадимовна – науч. сотрудник,  
✉ kovriga@ipu.ru,

Цыганов Владимир Викторович – д-р техн. наук,  
✉ bbc@ipu.ru,

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

## 20TH IFAC CONFERENCE ON TECHNOLOGY, CULTURE AND INTERNATIONAL STABILITY (TECIS'2021)

Z.K. Avdeeva<sup>1</sup>, S.V. Kovriga<sup>2</sup>, and V.V. Tsyganov<sup>3</sup>

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup>✉ avdeeva@ipu.ru <sup>2</sup>✉ kovriga@ipu.ru <sup>3</sup>✉ bbc@ipu.ru

**Abstract.** The 20th anniversary IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS'2021) was virtually held on September 14–17, 2021, at Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences. The main scientific results described by the conference participants are outlined. At TECIS'2021, 262 researchers from all continents presented 141 papers. They can be grouped into three main directions: control and automation to improve stability; intelligent technologies and their applications to manufacturing, robotics, mechatronics, industrial, medical, and other systems; social aspects of automation.

**Keywords:** conference, technology, control, stability, automation, intellectualization, industry, social aspects, medicine, robotics, mechatronics.



## 24-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛЕНИЕ, СВЯЗЬ» DCCN-2021



С 20 по 24 сентября 2021 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН состоялась очередная ежегодная 24-я международная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (*Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications*, DCCN-2021), посвященная обсуждению актуальных проблем и инновационных задач информационно-телекоммуникационной отрасли.

В 2021 г., как и в 2020-м, конференция проходила в online-формате в силу непростой пандемической ситуации в мире.

Традиционными организаторами конференции стали Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), Российский университет дружбы народов (РУДН), Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ) и Институт информационных и коммуникационных технологий Болгарской академии наук. Организация конференции совместно с РУДН и ТГУ в этом году, как и на протяжении предыдущих пяти лет, в значительной мере позволила расширить географию российских участников конференции и усилить интеграцию академических институтов и научных школ учреждений высшего образования. В качестве председателя программного комитета выступил д-р техн. наук, профессор *В.М. Вишневецкий* (ИПУ РАН), в качестве заместителя председателя – д-р техн. наук, профессор *К.Е. Самуйлов* (РУДН).

По традиции конференция проводилась при поддержке IEEE (отделение Russia Section). Информационную поддержку DCCN-2021 оказывали издательства “Springer International Publishing” и MDPI.

Мероприятие объединило исследователей из университетов и исследовательских центров в области теории и практики построения компьютерных и телекоммуникационных сетей, математиче-

ского моделирования, методов управления и оптимизации распределенных систем и продолжило серию конференций, которые проходили в России, Болгарии и Израиле в течение последних 25 лет.

Конференция DCCN-2021 проводилась в формате пленарного и секционных заседаний, на которых был рассмотрен широкий круг проблем, охватывающий наиболее актуальные направления научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий:

- Алгоритмы и протоколы телекоммуникационных сетей.
- Управление в инфокоммуникационных сетях.
- Анализ производительности, оценка QoS / QoE и эффективность сетей.
- Аналитическое и имитационное моделирование коммуникационных сетей нового поколения.
- Эволюция беспроводных сетей в направлении 5G/6G.
- Технологии сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн.
- RFID-технологии и их приложения.
- Интернет вещей и туманные вычисления.
- Системы облачного вычисления, распределенные и параллельные системы.
- Анализ больших данных.
- Вероятностные и статистические модели в информационных системах.
- Теория массового обслуживания, теория надежности и их приложения.
- Беспроводные сети на базе высотных беспилотных платформ.

Несмотря на ограничения из-за пандемии, в этом году на конференцию поступило 150 докладов от 240 участников из 26 стран мира. Широта географии конференции, в частности, подчеркивается составом пленарных докладчиков, в число которых вошли ведущие специалисты в области теории и практики телекоммуникационных сетей из США, Израиля, Венгрии, Португалии, Италии, Индии и России.





В рамках DCCN-2021 состоялись следующие мероприятия.

• Открытие конференции (20 сентября 2021 г.), включая вступительное слово и информационное сообщение о проводимом мероприятии председателя программного комитета *В.М. Вишневого*; с приветствиями участникам конференции выступили директор ИПУ РАН чл.-корр. РАН *Д.А. Новиков* и заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей РУДН *К.Е. Самуилов*.

• Пленарное заседание (20–21 сентября 2021 г.), в рамках которого были заслушаны доклады по актуальным проблемам тематики конференции от ведущих российских и зарубежных ученых:

– *Д. Селвамутху* (Индия) “Performance Analysis of DRX Mechanism in LTE-A Networks using Markov Modeling”. Рассмотрена проблема продления жизненного цикла батареи смартфона. Отмечено, что в современных устройствах для энергосбережения используется механизм прерывистого приема (англ. *Discontinuous Reception, DRX*). Разработаны рекомендации, позволяющие с помощью указанного механизма достичь минимального энергопотребления устройства.

– *Е. Левнер* (Израиль) и *В. Вишневикий* (РФ) “Recent Advances in Scheduling Theory and Applications in Robotics and Communications”. Основное внимание в обзорном докладе уделено новейшим достижениям в области теории расписаний, а также широкому кругу новых сфер ее практического применения – от облачных вычислений до роботов и сетей связи. Представлен авторский взгляд на современные тренды, а также острые проблемы и ограничения, свойственные этой перспективной области исследований.

– *Л. Коррейя* (Португалия) “Bridging 5G to 6G Networks: Problems and Challenges”. В работе обсуждаются проблемы мобильных и беспроводных сетей, не решенные при внедрении сетей 5G, которые должны быть приняты во внимание при проектировании сетей 6G. Отмечена необходимость дальнейшей виртуализации сетей и продолжения исследований в области облачных вычислений. Рассмотрены существующие физические ограничения (пропускная способность сетей) для решения указанных проблем, а также ограничения со стороны обслуживаемых устройств (задержка).

– *Я. Штрик* (Венгрия) “Recent Results in Performance Modelling of Finite-Source Retrial Queues with Collisions and Their Applications”. Представлен обзор новейших результатов в области моделирования систем массового обслуживания с конечным источником требований, повторными заявками и

конфликтами. С помощью примеров проиллюстрирована точность и область применения асимптотического метода для анализа распределения вероятностей повторных заявок.

– *К. Триведи* (США) “Software Fault Tolerance via Environmental Diversity”. В докладе обсуждается проблема отказоустойчивости программных систем в свете обеспечения их высокой надежности. Представлены классификация ошибок программного обеспечения, методы, позволяющие снизить ущерб от них, а также примеры существующих систем, в которых применяются указанные методы.

– *Дж. Аранитти* (Италия) “Towards 6G Non-Terrestrial Networks”. Представлена концепция построения неназемных сетей (англ. *non-terrestrial networks, NTN*); рассмотрены свойства неназемных сетей, которые позволят будущим поколениям телекоммуникационных сетей больше соответствовать ожиданиям пользователей. Приведены сведения о новейших разработках и проводимых в настоящее время исследованиях в данной области, описаны нерешенные проблемы. Подчеркнута важность использования неназемных сетей при построении беспроводных коммуникационных сетей следующего поколения.

• Секционные заседания (21–23 сентября 2021 г.), на которых было заслушано и обсуждено более 150 докладов, среди них – доклады представителей российских и зарубежных университетов, академических и отраслевых НИИ, а также научно-исследовательских центров. Секционные заседания были сгруппированы по трем основным тематическим направлениям (трекам):

Трек А. Современные компьютерные и коммуникационные сети: состояние, перспективы развития, архитектура, сетевые протоколы и управление в сетях.

Трек В. Моделирование распределенных систем. Теория сетей и систем массового обслуживания, надежность компьютерных сетей, имитационное моделирование.

Трек С. Приложения распределенных систем: Интернет вещей, анализ больших данных, высотные беспилотные телекоммуникационные платформы, программно-конфигурируемые сети, виртуализация.

На сайте конференции <https://2021.dccn.ru/> можно более подробно ознакомиться с составом участников и аннотациями докладов.

• Закрытие конференции (24 сентября 2021 г.). В заключительной речи председатель конференции *В.М. Вишневикий* подвел итоги мероприятия, отметил высокий уровень и разносторонность работ участников, оригинальность подходов к решению

поставленных проблем. Организационным комитетом были приняты решения:

– Отметить высокий уровень организации и проведения конференции.

– Считать тематику конференции важной и применимой для решения широкого круга проблем, охватывающего наиболее актуальные направления научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий, а также развития науки в целом.

– Отметить, что доклады представлены на высоком уровне и носят разносторонний характер, в своих работах авторы провели глубокий анализ современного состояния затрагиваемых ими направлений в области теории и практики построения компьютерных и телекоммуникационных сетей, математического моделирования, информационно-телекоммуникационных технологий, методов управления и оптимизации распределенных систем, а также прогноз их развития на ближайшие годы.

– Оргкомитету конференции – способствовать дальнейшему расширению научных контактов с представителями университетов, академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, научно-исследовательских центров России, ближнего и дальнего зарубежья, направленному на совместные исследования в области информационно-телекоммуникационных технологий, обмен информацией, разработку новых методов исследований и т. д.

– Выразить благодарность организаторам конференции – Российскому университету дружбы народов, Национальному исследовательскому

Томскому государственному университету и Институту информационных и коммуникационных технологий Болгарской академии наук.

– Провести следующую ежегодную 25-ю международную конференцию «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» в сентябре 2022 г.

Работы участников DCCN 2021 опубликованы в сборнике трудов конференции<sup>1</sup>. По итогам работы секций 65 докладов на английском языке были рекомендованы председателями секций и отобраны программным комитетом для публикации в отдельных томах избранных трудов международного издательства “Springer” в сериях “Communications in Computer and Information Science” (CCIS) и “Lecture Notes in Computer Science” (LNCS). Кроме того, издательством MDPI было предложено организовать два специальных выпуска – в журнале “Mathematics” и в журнале “Sensors”, для публикации в которых программным комитетом по итогам конференции рекомендованы избранные расширенные доклады.

*В.М. Вишневецкий, председатель Оргкомитета  
Д.В. Козырев, секретарь Оргкомитета*

**Вишневецкий Владимир Миронович** – д-р техн. наук,  
✉ vishn@inbox.ru,

**Козырев Дмитрий Владимирович** – канд. физ.-мат. наук,  
✉ kozyrevdv@gmail.com,

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

<sup>1</sup> [https://dccn.ru/downloads/DCCN-2021\\_Proceedings.pdf](https://dccn.ru/downloads/DCCN-2021_Proceedings.pdf)



## 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTRIBUTED COMPUTER AND COMMUNICATION NETWORKS: CONTROL, COMPUTATION, COMMUNICATIONS (DCCN-2021)

V.M. Vishnevsky and D.V. Kozyrev

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ vishn@inbox.ru ✉ kozyrevdv@gmail.com

**Abstract.** The scientific results of the DCCN-2021 conference held by Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences (ICS RAS), and RUDN University on September 20-24, 2021, were presented. An important line of research of ICS RAS is the development of theoretical foundations for building advanced telecommunication networks and practical implementation of large-scale projects of broadband wireless network designs. In this regard, for many years, ICS RAS has organized international conferences on Distributed Computer and Communications Networks: Control, Computation, Communications. DCCN-2021 brought together researchers and developers from academia and industry across different countries, working in the area of theory and applications of distributed computer and telecommunication networks, mathematical modeling, control and optimization methods of distributed systems, by offering them a unique opportunity to share their views as well as discuss the perspective developments and pursue collaboration in this area. The popularity of the conference is constantly increasing. Despite pandemic restrictions in 2021, more than 240 participants from 26 countries presented 151 papers. The global reach of the conference is particularly emphasized by the list of plenary speakers with leading experts in the theory and practice of telecommunication networks from the USA, Israel, Hungary, Portugal, Italy, India, and Russia.

**Keywords:** international conference, distributed computer networks, communication networks.



## ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ» MLSD'2021

В период с 27 по 29 сентября 2021 г. состоялась Четырнадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2021). Это ежегодная конференция, организованная Институтом проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) при поддержке IEEE Russia Section. Конференция призвана способствовать международному научно-исследовательскому сотрудничеству в области, охватывающей разнообразные аспекты управления развитием крупномасштабных систем отраслевого и регионального, национального и транснационального уровня.

В связи с продолжающимися ограничениями, введенными из-за пандемии COVID-19, две последние конференции, MLSD'2020 и MLSD'2021, прошли в режиме онлайн.

Участие в работе конференции MLSD'2021 приняли ведущие ученые академического уровня, научно-исследовательских институтов, вузов, государственных и коммерческих структур, профессионально занимающиеся проблемами теории и практики управления в современную эпоху формирования информационного общества.

В программу конференции были включены оригинальные результаты исследований по 16-ти тематическим направлениям:

1. Проблемы управления развитием крупномасштабных систем, включая ТНК, Госхолдинги и Госкорпорации.

2. Методы и инструментальные средства управления инвестиционными проектами и программами.

3. Управление развитием цифровой экономики, проектные офисы и ситуационные и прогнозано-аналитические центры, институты развития крупномасштабных систем.

4. Имитация и оптимизация в задачах управления развитием крупномасштабных систем.

5. Нелинейные процессы и вычислительные методы в задачах управления крупномасштабными системами.

6. Управление развитием банковских и финансовых систем.

7. Управление топливно-энергетическими, инфраструктурными и другими системами.

8. Управление транспортными системами.

9. Управление развитием авиационно-космических и других крупномасштабных организационно-технических комплексов.

10. Управление развитием региональных, городских и муниципальных систем.

11. Управление объектами атомной энергетики и другими объектами повышенной опасности.

12. Информационное и программное обеспечение систем управления крупномасштабными производствами.

13. Методология, методы и программно-алгоритмическое обеспечение обработки и интеллектуального анализа больших массивов информации.

14. Мониторинг в управлении развитием крупномасштабных систем.

15. Управление развитием крупномасштабных систем здравоохранения, медико-биологических систем и технологий.

16. Управление развитием социальных систем.

Согласно регламенту, конференция проводилась в течение трех дней. В первый день состоялось пленарное заседание, в следующие два дня – заседания секций соответственно перечисленным выше тематическим направлениям.

Всего на конференции было представлено 255 докладов, подготовленные на их основе 153 статьи на английском языке опубликованы в электронной библиотеке IEEE Xplore<sup>1</sup>, а также выделен ряд статей, рекомендованных для публикации в журналах «Автоматика и телемеханика», «Проблемы управления» и др.

Главной темой программы MLSD'2021 стала разработка модельно-ориентированного подхода к системному анализу крупномасштабных систем,

<sup>1</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9600061/proceeding>



опирающаяся на метамодель «развивающейся системы развивающихся систем» (РСРС). Метамодель РСРС обобщает классическое понятие «системы систем», выводя на первый план управление жизненным циклом каждой системы (разработка, применение, модернизация, утилизация). Новый взгляд на системный анализ формирует требования к привлекаемым информационным источникам, расширяет ключевые показатели и индикаторы развития, инициирует разработку программной инженерии сетевого ситуационного моделирования, прогнозирования и целеполагания. Роль и масштаб моделирования и метамоделирования класса РСРС существенно возрастают на фоне тотальной цифровизации и междисциплинарной глобализации управления. Идеи этого круга пронизывают доклады, представленные на пленарном заседании, и получили дальнейшее развитие в разных направлениях детализации на секционных заседаниях.

**На пленарных заседаниях** в присутствии всех участников конференции обычно выступают приглашенные докладчики, которые затрагивают наиболее актуальные проблемы и представляют новые решения по управлению развитием крупномасштабных систем. В этом году пленарное заседание прошло насыщенно и с большим накалом. Программа пленарного заседания MLSD'2021 практически полностью была посвящена продвижению модельно-ориентированного стиля стратегического планирования в эпоху «цифровой революции» и «цифровой трансформации экономики». Среди наиболее ярких пленарных докладов, вызвавших большой интерес и активные дискуссии, можно выделить две группы. Составившие первую группу пять пленарных докладов были посвящены общезначимым проблемам цифрового стратегического планирования, в семи докладах второй группы эти проблемы рассмотрены в отраслевом разрезе.

В первую группу входят доклады:

«Управление развитием крупномасштабных систем в новых условиях» д-ра техн. наук, проф. *Цвиркуна А.Д.* (ИПУ РАН). Доклад посвящен проблеме цифровой трансформации крупномасштабных систем, которая входит в перечень стратегических направлений деятельности Правительства Российской Федерации. В докладе представлена целостная и взаимоувязанная методология стратегического планирования развития крупномасштабных систем, основанная на системных модельно-ориентированных исследованиях. Методология базируется на ставших классическими определениях и понятиях, необходимых для оцифровки алгоритмов, технологий и методов прогнозирования

развития систем, характеризующихся комплексным (межотраслевым, межрегиональным) взаимодействием элементов, распределенных на значительной территории, требующих существенных затрат ресурсов и времени. Методология учитывает ряд отличительных свойств таких систем: динамичность (поступление сырьевых ресурсов, непрерывные технологические операции, транспортные потоки, формирование и использование фондов материальных и финансовых средств, амортизация и т. д.); наличие неопределенных и неконтролируемых факторов, необходимость управления рисками (страховыми, потери конкурентоспособности, снижения финансово-экономического потенциала и др.); сложность формирования и контроля сбалансированного многоуровневого и многокритериального целеполагания и стратегии соответствующего целедостижения; использование отраслевых, межотраслевых, региональных, национальных и транснациональных классификаторов и стандартов и др. Описывается программный комплекс «ТЭО-ИНВЕСТ», предназначенный для технико-экономического обоснования инвестиционных стратегий, построенных на перспективных принципах проектно-программного и агрегативно-декомпозиционного подхода. Тема работы подробно раскрывается в докладах секций 1 и 2, посвященных ключевым направлениям развития и их решению с помощью инвестиционных проектов и программ.

«Крупномасштабные проекты в системе стратегического планирования Российской Федерации» д-ра экон. наук, проф. *Варнавского В.Г.* (ИПУ РАН). Доклад посвящен основополагающим проблемам согласования стимулирующих ресурсных, технологических и институциональных механизмов стратегического развития. Сделан подробный анализ плюсов и минусов современной нормативной базы стратегического планирования в Российской Федерации. Особое внимание уделено транспортной отрасли. Выделены приоритетные крупномасштабные инвестиционные проекты в сфере транспорта на период до 2030 г. Предложена система управления стратегическим планированием с включением в нее государственно-частного партнерства.

«Рынок нефти: проблемы моделирования» д-ра техн. наук *Акинфиева В.К.* (ИПУ РАН). Доклад представляет собой важное дополнение к методологии стратегического планирования развития крупномасштабных систем на основе модельно-ориентированного подхода. Рассмотрена проблема моделирования рынка нефти, в том числе сделан обзор математических моделей прогнозирования рынка нефти. Приведены результаты использова-

ния модели конкуренции между производителями традиционной и сланцевой нефти для оценки последствий соглашения ОПЕК+. Рассмотрены перспективы развития рынка нефти после 2020 г. с учетом возможных сценариев реализации политики «Энергетического перехода».

«Проблемы управления в крупномасштабных проектах многоукладной экономики» д-ра техн. наук, проф. *Ерешко Ф.И.* (ВЦ им. А.А. Дородницына РАН, ФИЦ «Информатика и управление» РАН), и его соавторов – *Мушкова А.Ю.* (ФГУП «ВНИИ «Центр»), *Турко Н.И.* (Госкорпорация «Ростех», Академия военных наук), д-ра техн. наук, проф. *Цвиркуна А.Д.* (ИПУ РАН). В работе представлены исследования авторов по управлению крупными промышленно-инфраструктурными системами в соответствии с мировым трендом цифровизации экономики. Приводится описание исходных фундаментальных оснований проводимых разработок и обзор отечественного опыта использования в управлении систем математических моделей, информационно-коммуникационных технологий и больших объемов информации. Рассматриваются вопросы централизации и децентрализации управления в сложных системах. Приводятся теоретические конструкции принятия решений для анализа перспектив развития партнерства государства и бизнеса в рамках заданных правовых норм. Приведен блок концептуальных моделей, соответствующих уровню планирования крупномасштабных организационных систем, рассматриваются вопросы подготовки данных и разработки алгоритмического обеспечения, сочетания макро- и микроописания экономических систем.

«Инструментарий прорывного развития и возможности его применения в первой очереди реализации единого плана развития страны» д-ра техн. наук, проф. *Ирикова В.А.* (МФТИ) и его соавтора канд. физ.-мат. наук *Бирюкова Н.С.* В докладе отмечается особая роль инструментария прорывного развития как нестандартного механизма исполнения национальных проектов и достижения амбициозных целей, например, кратного увеличения темпов роста. Предлагается схема выделения узких мест и их устранения с минимальными затратами (с использованием траекторной модели и алгоритмов системной оптимизации). Проведен анализ мероприятий, нацеленных на устранение узких мест, мешающих требуемому росту и ранжируемых следующим образом: (1) разработка программы и годового поквартального комплексного плана работ по прорывному развитию; (2) разработка единой и направленной на достижение конечных целей многоуровневой автоматизированной систе-

мы подготовки, принятия и исполнения решений; (3) устранение несвоевременности получения и неполноты информации по управленческой обратной связи о реализации программ развития на местах и о фактических результатах; (4) управление политикой подготовки квалифицированных кадров и команд, способных разрабатывать и реализовывать результативные и эффективные инструменты целевого управления прорывным инновационным развитием; (5) управление бездефицитными федеральными и региональными бюджетами развития и др.

К числу пленарных докладов второй группы относятся работы:

«Трансформация электроэнергетических систем: направления и проблемы» чл.-корр. РАН *Воропая Н.И.* (Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН). В докладе представлена методология обоснования развития электроэнергетики, электроэнергетических систем и компаний. Излагаются методические основы подхода. Приводятся модели и методы формирования и исследования условий развития электроэнергетики, а также модели и методы обоснования развития электроэнергетических систем. Рассматриваются особенности учета управления электропотреблением, модели и методы исследования влияния факторов либерализации отношений на развитие электроэнергетики. Приводится описание основного информационного и программного обеспечения решаемых задач.

«Концепция построения структуры моделирующего комплекса для управления функционированием и развитием водородной энергетики» чл.-корр. РАН *Резчикова А.Ф.* (ИПУ РАН) и его соавторов – д-ров техн. наук, проф. *Цвиркуна А.Д.*, *Дранко О.И.* (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, проф. *Кушникова В.А.* (ИПТМУ РАН, Саратов), д-ра техн. наук *Богомолова А.С.* (Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского), канд. техн. наук *Степановской И.А.* (ИПУ РАН). В докладе освещена актуальная проблема информационно-аналитического сопровождения развития новой цифровой отрасли водородной энергетики и экономики, внимание к которой привлекает научную общественность всего мира. Сделан обзор национальных водородных программ, нацеленных на декарбонизацию отраслей промышленности к 2050 г. На этой основе предложена концепция инструментальных средств системного модельно-ориентированного анализа национальных дорожных карт, интегрированных в едином контексте жизненного цикла формирования и поддержки безопасности водородной энергии (производство,



хранение, транспортировка, торговля, потребление). Предлагаемый подход к стратегическому прогнозированию, планированию и контролю основан на использовании перспективных принципов нейронной картографии GIScience. Данная тематика получила отражение в секционных докладах, представляющих научную школу «управленческой системной динамики», развиваемую ИПУ РАН совместно с ИПТМУ РАН, Саратовским государственным университетом им. Н.Г. Чернышевского и Белорусским государственным университетом. Рассматриваемый круг докладов описывает вычислительные методы решения следующих крупномасштабных задач стратегического анализа и управления: минимизации потерь от вредных воздействий загрязнителей атмосферы промышленности и автотранспорта; структурного синтеза сетевого управления транспортировкой водородного топлива; сетевого управления обеспечением транспорта водородным топливом; контроля отклонения основных экономических показателей государства под влиянием развития водородной энергетики и др.

«Комплекс моделей стратегического управления крупномасштабной транспортной инфраструктурой» д-ра техн. наук, проф. *Цыганова В.В.* (ИПУ РАН). Доклад посвящен актуальной задаче глобализации управления транспортной инфраструктурой, нацеленной на повышение эффективности реального сектора экономики, социально-экономическое и пространственное развитие России. Автором выдвинут тезис о том, что стратегическое развитие макрорегионов невозможно без опережающего развития транспортной инфраструктуры в условиях изменения внешней среды. Он позволяет охарактеризовать теоретические и методологические основы, методы, технологии и составляющие комплекса моделей стратегического управления развитием крупномасштабной транспортной инфраструктуры. В рамках предлагаемого моделирующего комплекса разработаны пять функциональных комплексов моделей, позволяющих моделировать и поддерживать практические процессы сопровождения развития транспортной инфраструктуры: управление стратегическим развитием; отбор и экспертиза крупномасштабных проектов развития; обучение и адаптация; формирование транспортных коридоров; обеспечение безопасности. Применение комплекса иллюстрируется на примере стратегического управления развитием транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики.

«Стратегическое управление низкоуглеродным развитием электроэнергетики России: проблемы и возможности» канд. экон. наук *Веселова Ф.В.* (Ин-

ститут энергетических исследований РАН). В докладе раскрывается тема разноаспектного моделирования в контуре стратегического энергетического планирования, охватывающего модели систем энергетики и энергетических рынков, модели перспективного развития электроэнергетики и энергетического комплекса, модели рыночных механизмов управления развитием в энергетике. Автором выделен ряд проблем развития электроэнергетики, решаемых на основе моделей: долгосрочное прогнозирование развития электроэнергетики; обеспечение технико-экономической конкурентоспособности различных энерготехнологий и моделирование изменений в технологической структуре электроэнергетики; оценка инвестиционных стратегий, финансово-экономический анализ и прогноз условий для устойчивого инвестирования и развития энергетических отраслей и компаний; моделирование и оценка эффектов либерализации и реструктуризации в электроэнергетике, разработка механизмов управления развитием в конкурентной среде; анализ эффектов интеграции электроэнергетических рынков, оптимизации условий функционирования и развития электроэнергетики в рамках единого рынка; моделирование сценариев эмиссии парниковых газов в энергетике, анализ технологических возможностей, механизмов и последствий экономического регулирования эмиссии парниковых газов; исследование перспектив, направлений и эффективности развития интеллектуальной энергетики, активных потребителей, распределенной генерации в ЭЭС России.

«Исследования по формированию беспилотного авиатранспортного комплекса как крупномасштабной системы» акад. РАН *Кутахова В.П.* (руководителя проектного комплекса «Роботизированные автоматические ЛА2030», ФБГУ Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского») и его соавторов – д-ра техн. наук, проф. *Мещерякова Р.В.* (ИПУ РАН), *Смолина А.Л.* Автор отмечает, что беспилотный авиационный транспорт, ввиду его высокой наукоемкости и расширения спектра применений, имеет перспективы непрерывного совершенствования и модернизации. Это определяет актуальность разработки цифровой модельно-ориентированной платформы стратегического проектирования. Предлагаемый подход базируется на выборе канонической онтологической модели беспилотного авиатранспортного комплекса, реализующей концепцию распределенной «гибридной рабочей среды» с беспроводной связью между стационарными и мобильными сетевыми агентами. Преимущество такой модели состоит в ее ориентации на программную инженерию цифровых испытаний системных про-

ривных решений, охватывающих материалы, силовые установки, бортовое оборудование, системы связи и информационного обмена в сложно структурированных коллаборативных структурах. Поднятая автором тема обрела достаточно широкое развитие в секционных докладах, включая обмен опытом участия в соревнованиях «Аэробот-2020», концепции мониторинга и предложения по управлению конфигурацией беспилотных авиационных систем и др.

«Учет региональных особенностей стратегического управления агропромышленными интегрированными формированиями в едином пространстве цифрового взаимодействия» д-ра техн. наук, проф. *Кульбы В.В.* (ИПУ РАН), д-ра техн. наук *Меденникова В.И.* (Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, ФИЦ «Информатика и управление» РАН). В докладе рассматривается математическая модель стратегического планирования агропромышленных интегрированных формирований в условиях цифровой трансформации предприятий, исходя из требований теории комплементарности (долговременного партнерства). Показано, что стратегии планирования формирований на единой цифровой платформе приводят к системе гибкого управления взаимоотношениями между хозяйствами-производителями, перерабатывающими, обслуживающими, сбытовыми, торговыми предприятиями, когда каждый «видит» всех участников цепочки, вплоть до конечного потребителя. Рост агропромышленных интегрированных формирований, в том числе агрохолдингов, ставит проблемы эффективной интеграции материальных, трудовых, финансовых и информационных ресурсов. Примерами могут служить либо полное поглощение предприятий, либо сохранение производственной и социальной целостности с возможностью самостоятельных действий в хозяйственном, экономическом и правовом пространстве. Предлагаемая цифровая платформа позволяет учесть в модели существенные региональные факторы: инвестиции в производство, в человеческий капитал, в систему управления с учетом территориальной логистической составляющей; региональные стратегии конкурентоспособности. Показано, что мировые тенденции цифровизации сельского хозяйства смещаются в сторону концепции единой цифровой платформы интегрированных формирований, которая при определенных условиях превратится в единую платформу всего агропромышленного комплекса.

«Об управлении динамикой многомерных мнений в социальных сетях» канд. техн. наук *Губанова Д.А.*, д-ра физ.-мат. наук *Чхартушвили А.Г.* (ИПУ

РАН). Доклад связан с разработкой одной из стратегических технологий цифрового общества, представленной концепцией управления в социальных сетях, направленного, например, на разработку новых стратегий, при условии максимально широкой поддержки населения. В докладе рассматривается ситуация, когда некий управляющий орган (центр) оказывает информационное влияние на агентов. Стратегией центра является выбор момента начала и окончания информационного воздействия, а целью (выигрышем) – минимизация расстояния между усредненным мнением агентов и собственной позицией. Представлена модель динамики мнений в социальных сетях, в которой реализуются два взаимосвязанных информационных процесса: распространение возбуждения и формирование мнений. Для этой модели сформулирована и решена задача выбора управляющим субъектом стратегии воздействий, которая позволяет в итоге получить наибольшую поддержку в социальной сети. Перспективным направлением дальнейших исследований является анализ оптимальных управляющих воздействий при различных значениях параметров структуры и динамики, а также рассмотрение задачи информационного противоборства. Дальнейшему развитию этого нового направления крупномасштабного управления посвящены доклады секции 16, в которых представлены особенности распространения информации о коронавирусе, о повышении эффективности рекламной деятельности, об исследованиях уличных протестов и др.

**Секционные заседания** конференции традиционно служат площадкой для обсуждения проблем управления развитием крупномасштабных систем в отраслевом и инструментально-методологическом разрезе. Секционная программа MLSD'2021 стала продолжением исследований модельно-ориентированного подхода к стратегическому проектированию крупномасштабных систем в части разработки цифровых двойников предприятий, изделий, технологических процессов, производства и др. Концептуально цифровой двойник рассматривается как многосвязное множество сквозных технологий, поддерживающих формальное описание объектов реального мира, допускающее прогнозирование его свойств, функций и поведения, реакций на возмущающие воздействия и взаимодействие с другими цифровыми двойниками. Анализируя доклады, представленные по этой теме, можно разделить их на проекты, модели и методы.

Разработке цифровых двойников на уровне проектов посвящены доклады:

«Технология распределенной разработки ПО для АСУ ТП АЭС с использованием виртуализа-





ции и цифровых двойников» д-ра техн. наук *Полетыкина А.Г.*, канд. физ.-мат. наук *Промыслова В.Г.*, канд. физ.-мат. наук *Семенкова К.В.*, *Менгазетдинова Н.Э.*, кандидатов техн. наук *Бывайкова М.Е.*, *Степанова В.Н.* (ИПУ РАН);

«Исследование цифрового двойника предприятия» *Сытова А.Н.*, *Вахранева А.В.*, д-ра техн. наук, проф. *Ерешко Ф.И.*;

«Модели и методы управления технологической инфраструктурой на базе цифровых двойников» д-ра техн. наук *Гребенюка Г.Г.*, д-ра техн. наук, проф. *Калянова Г.Н.*, д-ра физ.-мат. наук *Ковалева С.П.*, канд. техн. наук *Крыгина А.А.*, д-ра техн. наук *Лукиновой О.В.*, канд. техн. наук *Никушова С.М.*;

«Модуль расчетно-аналитических методов минимизации стоимости ремонтных работ на трубопроводных сетях при формировании цифрового двойника инфраструктуры» канд. техн. наук *Крыгина А.А.*;

«Некоторые особенности разработки и применения адаптивных цифровых двойников для решения задач управления крупномасштабными высокотехнологичными производствами» *Зеньковича М.В.*, д-ра техн. наук, проф. *Древса Ю.Г.*, *Иноземцевой В.С.*

Большое место в разработке цифровых двойников отводится классическим методам анализа, таким как имитационные и корреляционные модели, подробно рассматриваемым на секции 4.

К сервисам сопровождения цифровых двойников в контуре стратегического планирования можно отнести учет нематериальных активов. Интересные новые подходы в этой области развиваются в докладах секции 3, в том числе идея об онтологизации научных открытий, о специальной цифровой платформе представления нематериальных активов, о рейтингах как цифровом инструменте сравнительной оценки и др.

Перспективы имеет также применение к цифровым двойникам методов бизнес-аналитики. Под-

ходящим инструментом могут служить методы банковских и финансовых систем, представленные в докладах секции 6, обеспечивающие моделирование инфляции, оптимизацию микрофинансирования, кредитования и др.

Значительную роль для эффективного использования цифровых двойников играют также модели нелинейного поведения физических сред и мехатронных конструкций под воздействием внешних факторов. Этими чрезвычайно важными вопросами занимается секция 5, открывая возможности создания более адекватных методов симуляции и оптимизации.

К управлению потоками больших данных, на которые рассчитан цифровой двойник, применим аппарат интеллектуального анализа данных и мониторинга, исследуемый в докладах секций 13 и 14.

В заключение отметим, что работы, представленные на конференции MLSD'2021, свидетельствуют о наличии научного задела по единообразной схеме стратегического планирования развития крупномасштабных систем разной прикладной ориентации. Такой подход способствует активизации комплексных инновационных процессов, предусматриваемых государственной научно-технической политикой. В этой связи представляется целесообразным проведение дальнейших исследований в области стандартизации и композирования перспективных образцов цифровых моделей и двойников.

*А.Д. Цвиркун, председатель Оргкомитета*  
*И.А. Степановская, секретарь Оргкомитета*

**Цвиркун Анатолий Данилович** – д-р техн. наук,  
✉ [tsvirkun@ipu.ru](mailto:tsvirkun@ipu.ru),

**Степановская Ираида Александровна** – канд. техн. наук,  
✉ [irstepan@ipu.ru](mailto:irstepan@ipu.ru),

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

## 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF LARGE-SCALE SYSTEM DEVELOPMENT (MLSD'2021)

A.D. Tsvirkun<sup>1</sup> and I.A. Stepanovskaya<sup>2</sup>

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup> ✉ tsvirkun@ipu.ru <sup>2</sup> ✉ irstepan@ipu.ru

**Abstract.** The central theme of MLSD'2021 was developing a model-oriented approach to the system analysis of large-scale systems based on the meta-model of the “developing system of developing systems.” The plenary session of MLSD'2021 was almost entirely devoted to promoting a model-oriented strategic planning style in the era of the digital revolution and digital transformation of the economy. The sectional program of MLSD'2021 further described the model-oriented approach to the strategic design of large-scale systems towards developing digital twins of enterprises, products, technological processes, production, etc.

**Keywords:** conference, large-scale systems, digital transformation.