

ISSN 2712-8687

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3/2024

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

С. Н. Васильев, академик РАН,
И. А. Каляев, академик РАН,
Н. В. Кузнецов, чл.-корр. 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. Вишневский, д-р техн. наук,
А. О. Калашников, д-р техн. наук,
В. В. Клочков, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
В. В. Кульба, д-р техн. наук,
А. 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, академик РАН
(гл. редактор),
Б. В. Павлов, д-р техн. наук,
Ф. Ф. Пашенко, 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,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. 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. Угольников, д-р техн. наук,
Самара – М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
Саратов – В. А. Кушников, д-р техн. наук,
Тамбов – М. Н. Краснянский, д-р техн. наук,
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук,
Челябинск – О. В. Логиновский, д-р техн. наук

ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, RAS¹ Academician,
I. A. Kalyaev, RAS Academician,
N. V. Kuznetsov, RAS Corr. Member,
V. A. Levin, RAS Academician,
N. A. Makhutov, RAS Corr. Member,
A. F. Rezchikov, RAS Corr. Member,
S. N. Vassilyev, RAS Academician

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.),
A. O. Kalashnikov, Dr. Sci. (Tech.),
V. V. Klochkov, Dr. Sci. (Econ.),
M. V. Khlebnikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. A. Krasnova, Dr. Sci. (Tech.),
V. V. Kulba, D. Sc. (Tech.),
O. P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Tech.),
A. A. Lazarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, Dr. Sci. (Tech.),
V. E. Lepskiy, D. Sc. (Phych.),
A. S. Mandel, Dr. Sci. (Tech.),
N. E. Maximova, Cand. Sci. (Tech),
Executive Editor-in-Chief,
R. V. Meshcheryakov, Dr. Sci. (Tech.),
A. I. Michalski, Dr. Sci. (Biol.),
D. A. Novikov, RAS Academician,
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.),
A. D. Tsvirkun, Dr. Sci. (Tech.),
V. M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Tech.),
I. B. Yadykin, Dr. Sci. (Tech)

LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Chelyabinsk – O. V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Tech.),
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. Kushnikov, Dr. Sci. (Tech.),
Tambov – M. N. Krasnyanskiy, 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.)

¹Russian 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
академик 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: 19 июня 2024 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) доступны
полные тексты статей.

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

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.2024

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Кулида Е. Л., Лебедев В. Г. Современные подходы
к диагностике и прогнозированию технического состояния
электрохимического привода летательного аппарата 3

Управление в социально-экономических системах

Бекетов С. М., Поспелов К. Н., Редько С. Г. Имитационная
модель человеческого капитала в инновационных проектах 20

Гусев В. Б. Модель реструктуризации системы
воспроизводства с комбинированным управлением 32

Информационные технологии в управлении

Губанов Д. А., Кузнецов О. П., Курако Е. А. и др.
Информационная система анализа научной деятельности
(ИСАНД) в области теории управления 42

Управление подвижными объектами и навигация

Макаров М. И. Алгоритм локального планирования пути
для объезда препятствий в путевых координатах 66



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, RAS Academician

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: June 19, 2024

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) full texts of

articles are available

© V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences

of Russian Academy of Sciences

CONTROL SCIENCES

3.2024

CONTENTS

Surveys

Kulida, E. L. and Lebedev, V. G. Modern Approaches

to Prognostics and Health Management of an Aircraft

Electromechanical Actuator 3

Control in Social and Economic Systems

Beketov, S. M., Pospelov, K. N. and Redko, S. G. A Human

Capital Simulation Model in Innovation Projects 20

Gusev, V. B. A Combined Management Model for Restructuring

a Reproduction System 32

Information Technology in Control

Gubanov, D. A., Kuznetsov, O. P., Kurako, E. A., et al.

ISAND: An Information System for Scientific Activity Analysis

(in the Field of Control Theory and Its Applications) 42

Control of Moving Objects and Navigation

Makarov, M. I. A Local Path Planning Algorithm for Avoiding

Obstacles in the Frenet Frame 66

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА[#]

Е. Л. Кулида*, В. Г. Лебедев**

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

*✉ elena-kulida@yandex.ru, **✉ lebedev-valentin@yandex.ru

Аннотация. В связи с реализацией концепции электрических самолетов отмечена необходимость обеспечения высокой надежности электромеханических приводов, являющихся важными компонентами авиационных систем. Рассмотрен структурный состав электромеханического привода и виды его неисправностей. Приведен обзор методов диагностики неисправностей электромеханического привода, основанных либо на моделировании электромеханического привода, либо на анализе сигналов, поступающих в процессе функционирования электромеханического привода, а также гибридных методов, сочетающих в себе оба этих подхода. Исследованы преимущества, недостатки и трудности в применении различных подходов. Особое внимание уделено методам диагностики электромеханических приводов на основе глубокого обучения, которые позволяют в автоматическом режиме обрабатывать сигналы и реализовать комплексную диагностику неисправностей. Представлена концепция технического обслуживания авиационной техники, в частности электромеханических приводов, на основе оценки технического состояния и прогнозирования оставшегося срока полезного использования с целью предупреждения неисправностей до их появления. Для решения проблемы технического обслуживания летательных аппаратов на основе прогнозирования выделен ряд гибридных подходов. Приведен обзор отечественных разработок в области авиационной диагностики с применением машинного обучения.

Ключевые слова: летательный аппарат, электромеханический привод, метод диагностики неисправностей, оценка технического состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция электрических самолетов, среди прочих улучшений, требует постепенной замены гидравлических приводов электромеханическими приводами летательных аппаратов (ЭПЛА), которые смогут обеспечить значительные преимущества по сравнению с гидравлическими приводами при управлении полетом [1, 2]. Считается, что такая замена приведет к значительному снижению веса, значительной экономии стоимости жизненного цикла, меньшему воздействию на окружающую

среду и повышению надежности летательного аппарата (ЛА). Использование ЭПЛА становится все более распространенным, но их широкое применение замедляется из-за ограниченного опыта с точки зрения безопасности и надежности и в настоящее время в основном ограничивается системами, некритичными для безопасности. Важно оценить последствия замены гидравлической подсистемы ее электрической альтернативой с точки зрения использования, реализации, мониторинга, а также надежности и безопасности оборудования. Возникают проблемы, которые менее важны для гидравлических приводов, такие как электромагнитная совместимость, механическое заклинивание и проблемы с перегревом из-за высоких токов [3]. Для поддержки использования ЭПЛА необхо-

[#] Исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00464).

димы надежные прогностические инструменты, обеспечивающие точную оценку их фактического состояния и оставшегося срока полезного использования. Общий обзор ЭПЛА, а также связанных с ними возможностей и проблем приводится в работах [4, 5].

Приводы являются важными с точки зрения безопасности компонентами авиационных систем, и необнаруженная неисправность привода может привести к серьезным последствиям, поэтому для повышения производительности ЭПЛА, надежности, безопасности и снижения затрат необходимо применение технологии технического обслуживания по состоянию.

Фундаментальным инструментом раннего выявления неисправностей ЭПЛА становятся инновационные методологии прогнозирования и диагностики, в основе которых лежит численное моделирование. Системы прогнозирования и управления работоспособностью (англ. *Prognostics and Health Management*, РНМ) – это относительно новая область исследований для диагностики текущего технического состояния и прогнозирования времени отказа и оставшегося срока полезного использования системы или компонента на основе поступающих от них сигналов [6]. Такие системы позволяют запланировать техническое обслуживание для обеспечения безотказного функционирования системы на основе набора численных моделей, которые должны быть правильно настроены для воспроизведения поведения ЭПЛА с точки зрения статической и динамической реакции (например, токов, напряжений, скорости, положения и т. д.) [7, 8]. С этой целью должно быть обеспечено моделирование работы ЭПЛА в нормальных условиях, а также при наличии зарождающихся неисправностей. Результаты, тенденции, значения и прогнозы модели в целом должны быть тщательно проверены на основе подробных и обширных наборов экспериментальных данных. Широко распространенным методом, применяемым в тех инженерных приложениях, которые включают разработку новых моделей для мониторинга и управления, является экспериментальная проверка моделей на испытательных стендах [9].

При диагностике неисправностей ЭПЛА применяются методы обработки сигналов и статистические инструменты с различными типами датчиков, быстрое преобразование Фурье, частотный анализ вибраций, частотно-временной анализ [10–13]. Однако применение этих методов может занять много времени, быть трудоемким и ненадежным. В последние годы развивается новый подход к автоматизации диагностики и прогнозированию

неисправностей на основе методов глубокого обучения для классификации различных состояний ЭПЛА с использованием различных видов нейронных сетей, таких как автоэнкодер с шумоподавлением, сеть глубокого доверия, сверточные нейронные сети. В отличие от традиционных методов, с помощью методов глубокого обучения можно извлекать эффективные признаки неисправностей прямо из сигналов мониторинга и одновременно выполнять классификацию неисправностей [14, 15].

Целью работы является исследование и анализ современных подходов к диагностике и прогнозированию технического состояния электромеханического привода летательного аппарата, их перспективности и трудностей, препятствующих в настоящее время их практическому применению.

1. СТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА И ВИДЫ ЕГО НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Большинство ЭПЛА состоит из серводвигателя, электрической цепи силового привода, механических компонентов, блока управления приводом и некоторых типов датчиков [16, 17]. Электрический силовой привод получает сигнал от блока управления приводом и выдает соответствующий силовой ток для привода серводвигателя. Серводвигатель преобразует электрическую энергию в механическую и приводит в действие исполнительные устройства, которые в зависимости от кинематики их движения подразделяют на механизмы поступательного, поворотного и вращательного движения. При реализации управления с обратной связью в ЭПЛА обычно устанавливаются датчики обратной связи, а для контроля состояния привода – датчики мониторинга.

В ЭПЛА выделяются следующие виды неисправностей: неисправность двигателя, неисправность электрического силового привода, неисправность механических компонентов [18].

Неисправности двигателя в основном включают неисправность подшипников, неисправность обмотки статора и неисправность ротора. К неисправностям подшипников относятся износ, точечная коррозия и разрушение сепаратора. Неисправности подшипников могут привести к дисбалансу трения и ненормальной вибрации, что снизит эффективность и производительность двигателя. Неисправности обмотки статора включают обрыв обмотки, короткое замыкание и т. д. Обрыв обмотки обычно вызван большими пусковыми токами двигателя и приводит к резкому снижению выходного момента ЭПЛА и к резкому увеличению то-



ков обмотки. Короткое замыкание в основном вызывается длительным тепловым старением и приводит к увеличению тока обмотки и к выделению двигателем большого количества тепла. Неисправности ротора двигателя включают эксцентриситет вала ротора и размагничивание ротора. Эксцентриситет вала нарушает электромагнитный баланс и вызывает ненормальную вибрацию во время работы. Размагничивание ротора обычно вызывается перегревом двигателя, что приводит к снижению КПД двигателя и увеличению тока статора и температуры двигателя.

Основные неисправности в электрическом силовом приводе: короткое замыкание и обрыв цепи электрического моста, а также электроудары конденсатора источника питания.

К распространенным механическим неисправностям относятся чрезмерный износ, выкрашивание (образование вмятин на металлических поверхностях в точках контакта с высоким напряжением), заклинивание обратного канала и плохая смазка. Чрезмерный износ в основном возникает на шарико-винтовой паре и подшипниках с неподвижным концом. Серьезный износ шарико-винтовой пары может привести к выходу из строя всей системы ЭПЛА. Выкрашивание в основном вызывается поверхностной усталостью и увеличивает вибрацию ЭПЛА. Заклинивание обратного канала происходит из-за деформации возвратной трубы или мусора, прилипшего к возвратной трубе, что может привести к ухудшению фрикционного состояния ЭПЛА, выделению большого количества тепла и резкому снижению теплодинамических характеристик. Недостаточная и загрязненная смазка увеличивает трение и износ ЭПЛА.

2. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭПЛА

2.1. Типы методов диагностики неисправностей ЭПЛА

Методы диагностики неисправностей ЭПЛА в основном делятся на методы, основанные на моделях, методы, управляемые данными (*Data-Driven*), в которых система рассматривается как черный ящик, и гибридные методы [18–20].

Принцип основанных на моделях методов диагностики неисправностей заключается в синхронном запуске моделей ЭПЛА и реальной системы ЭПЛА, затем оценивается разность между сигналами состояния математических моделей и реальными сигналами состояния ЭПЛА, которые измеряются различными датчиками и собираются системой сбора данных. Выходные невязки сигналов имитационных моделей и реальных систем ис-

пользуются для диагностики состояния работоспособности ЭПЛА.

Преимущества диагностики неисправностей на основе моделей заключаются в следующем [18].

- Создание точной модели существующей системы способствует пониманию физического механизма взаимодействий в ней. Моделирование неисправностей позволяет генерировать сигналы для обучения автоматизированных алгоритмов распознавания неисправностей, для тестирования и сравнения алгоритмов, диагностических и прогностических процедур и функций [21].

- Результаты, полученные методами диагностики отказов на основе модели, могут быть четко объяснены динамической моделью, а степень вырождения системы может быть получена путем сравнения значений отклонения параметров модели или невязок.

- Методы, основанные на модели, не требуют большого количества текущих данных, полученных в реальных условиях, для обучения алгоритмов диагностики неисправностей. Использование небольшого объема обучающих данных может дать хорошие результаты обучения и диагностики [22].

Однако основанные на моделях методы диагностики отказов для ЭПЛА имеют следующие недостатки.

- Для каждой из конкретных моделей диагностируемых систем необходимо разработать соответствующие математические модели, что является сложной задачей. Точные динамические модели часто требуют интенсивных вычислений, и это выдвигает высокие требования к вычислительной производительности.

- Механизм взаимодействия электромагнитной силы, термического напряжения и механического напряжения во время работы ЭПЛА сложен, и точную математическую модель создать трудно. В результате используются упрощенные модели, которые отражают характеристики физических систем приближенно. В этом случае основанные на модели методы диагностики неисправностей могут определить, произошла ли неисправность в ЭПЛА, но не могут точно определить неисправный компонент. Для более точной диагностики необходимо использовать подробные динамические модели каждого компонента.

Методы диагностики отказов, основанные на данных, не требуют создания сложных математических моделей ЭПЛА; они извлекают признаки для диагностики технического состояния ЭПЛА из сигналов, собранных с датчиков [23]. Важную роль в диагностике неисправностей ЭПЛА играют методы обработки сигналов. Качество исходных дан-

ных и корреляция между сигналами и неисправностями сильно влияют на эффективность алгоритмов диагностики. Условия работы ЭПЛА часто меняются даже во время нормальной работы, что делает сигналы состояния сильно нестационарными и непериодическими. Для устранения влияния различных условий эксплуатации применяется метод передискретизации, т. е. синхронизации сигналов с выбранными ключевыми сигналами. Например, в работе [24] в процессе извлечения признаков с помощью ряда методов обработки сигналов выявляются частоты неисправностей в сигнальных данных, синхронизированные с положением двигателя. При помощи методов извлечения и объединения признаков выбираются те из них, которые относятся к режиму отказа, а несвязанные признаки исключаются. При извлечении признаков для диагностики неисправностей ЭПЛА широко используется вейвлет-преобразование [25, 26].

Используя признаки, состояние работоспособности ЭПЛА можно определить при помощи классификатора для диагностики отказов. Если в классификатор подаются признаки, не связанные с ошибкой, это приведет к низкой скорости и плохому эффекту обучения. При помощи метода главных компонент можно выделить признаки классификации, связанные с неисправностью, и уменьшить размеры вектора признаков. Метод главных компонент позволяет характеризовать состояние процесса путем проецирования полученных данных в пространство меньшего размера. Этот метод уменьшения размерности сохраняет корреляцию между измерениями, оптимальным образом фиксируя изменчивость данных [27].

Однако методы диагностики ЭПЛА, основанные на данных, имеют следующие трудности в применении.

- Требуется большой объем данных при различных степенях и типах отказов для обучения алгоритмов диагностики. Эффективность диагностики сильно зависит от качества данных. Однако в большинстве случаев самолеты не могут летать с неисправными ЭПЛА, поэтому данные о неисправностях получить сложно. Отсутствие доступных экспериментальных данных является большой трудностью в исследованиях. Многие алгоритмы прошли только теоретическую проверку или были проверены только на данных, полученных на основе математического моделирования.

- При наличии серьезных шумовых помех или сложных систем обычно требуются усовершенствованные методы обработки сигналов и алгоритмы извлечения признаков. В результате методы диагностики на основе данных часто предъявляют

высокие требования к вычислительной мощности системы.

- Методы, управляемые данными, обычно требуют высокой частоты дискретизации сигналов состояния. Таким образом, блок управления приводом должен иметь мощную вычислительную и запоминающую способность.

Для диагностики неисправностей ЭПЛА применяются также гибридные методы диагностики неисправностей, которые сочетают в себе преимущества как методов, основанных на данных, так и методов, основанных на моделях. Например, для генерации необходимых данных применяются методы, основанные на модели, а затем – методы, основанные на данных, для обработки сгенерированных данных и реализации диагностики неисправностей [28].

2.2. Диагностика неисправностей ЭПЛА на основе глубокого обучения

Традиционные методы машинного обучения широко применяются для диагностики неисправностей ЭПЛА. Подробный обзор этих методов приводится в работе [18]. Однако извлечение признаков в этих традиционных подходах, основанных на данных, осуществляется вручную. Эти процессы в значительной степени зависят от предварительных знаний, диагностического опыта и сложных методов преобразования сигналов, которые являются трудоемкими и отнимают много времени, а эффективность диагностики во многом зависит от выбранных характеристик неисправности. При наличии достаточных обучающих данных модели глубокого обучения позволяют автоматически обрабатывать исходные сигналы и реализовывать комплексную интеллектуальную диагностику неисправностей. Но поскольку ЭПЛА обычно используются в высоконадежном и критически важном для безопасности оборудовании, получить сбалансированные данные о режимах отказа затруднительно [29].

В работе [30] для обнаружения и изоляции неисправностей ЭПЛА применяется модифицированная модель долгой краткосрочной памяти (англ. *Long Short-Term Memory*, LSTM); эффективность метода подтверждена открытыми данными NASA. Нейронная сеть долгой краткосрочной памяти представляет собой сеть глубокого обучения, предназначенную для изучения долгосрочных зависимостей, поскольку в ней может сохраняться информация в течение длительного времени. В работе [31] для точной диагностики неисправностей ЭПЛА объединили несколько автоэнкодеров



с шумоподавлением. Однако эти методы хорошо работают только при достаточном количестве данных и сбалансированных выборках, что трудно реализовать в большинстве сценариев диагностики неисправностей, связанных с ЭПЛА.

Для выделения признаков при несбалансированных данных используются сверточные нейронные сети. В работе [32] предложена двумерная сверточная нейронная сеть и оптимизированная модель на основе функции активации Softmax для диагностики шариковых винтов ЭПЛА с использованием сигналов тока двигателя, в результате улучшены извлечение и классификация признаков при различных рабочих нагрузках и в случаях с несбалансированными образцами. В работе [33] были использованы неконтролируемые параллельные данные и реализована диагностика ЭПЛА с помощью различных датчиков на основе сверточной нейронной сети. Однако эти методы не решают проблему диагностики в условиях малой выборки.

В работе [34] для диагностики неисправностей в условиях небольшого размера выборки на основе вибрационных сигналов предлагается использовать генеративно-состязательную сеть. Состязательные автоэнкодеры используются для преобразования автоэнкодеров в генеративно-состязательные сети. В статье [35] представлена генеративно-состязательная сеть на основе условно-вариационного автоэнкодера для решения проблемы несбалансированной выборки в различных условиях работы. В работе [29] для реализации надежной диагностики неисправностей для ЭПЛА с использованием только сигналов вибрации предлагается комплексный подход, основанный на данных, объединяющий возможности сверточной нейронной сети для извлечения признаков с возможностями полуконтролируемого обучения и генерации данных состязательного автоэнкодера при различных условиях работы и несбалансированных выборках. В статье [36] предложен метод обнаружения неисправности шарико-винтовой передачи, основанный на глубокой сети доверия. Использовались частотные спектры объединенного набора данных, собранных с нескольких датчиков.

Наличие избыточных данных увеличивает нагрузку на программное и аппаратное обеспечение. В работе [37] для обработки наблюдаемых данных и извлечения разреженных характеристик используется полуправляемый разреженный автоэнкодер, позволяющий повысить точность выделения неисправностей при одновременном сокращении наблюдаемых данных. Временные и пространственные взаимосвязи исследуются многоканальной LSTM-сетью для построения модели вре-

менных рядов, чтобы выполнять обнаружение неисправностей и их изоляцию на основе разницы между значениями параметров, которые измеряются датчиками, и значениями этих параметров, которые рассчитываются автоэнкодером. Результаты проверки подтверждают, что предлагаемый метод позволяет эффективно диагностировать неисправности ЭПЛА.

В работе [38] авторы объединили гибридную пространственную и временную синхронизированную рекуррентную единицу на основе внимания с процедурами декомпозиции сезонно-трендовых данных и продемонстрировали хорошие результаты как в диагностике неисправностей, так и в прогнозировании неисправностей в ЭПЛА.

В работе [39] описывается имитационная модель ЭПЛА и анализируются типичные неисправности ЭПЛА.

Моделирование ЭПЛА разделено на три отдельные части в соответствии с его составом: синхронный двигатель с постоянными магнитами, редуктор и шариковый винт.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами моделируется уравнениями

$$\begin{cases} u_d = R_a i_d + L \frac{di_d}{dt} - P_m \omega_m Li_q, \\ u_q = R_a i_q + L \frac{di_q}{dt} + P_m \omega_m Li_d + P_m \omega_m \psi_{f_m}, \\ T_L = T_e - J \frac{d\omega_m}{dt} - B\omega_m = 1,5 P_m \psi_{f_m} i_q - J \frac{d\omega_m}{dt} - B\omega_m, \end{cases}$$

где u_d , u_q , i_d , i_q – эквивалентное напряжение и эквивалентный ток соответственно (в системе главных компонент ротора с координатами d , q); R_a – эквивалентное сопротивление обмотки катушки; L – эквивалентная индуктивность; P_m – число пар полюсов двигателя; ω_m – механическая угловая скорость ротора; ψ_{f_m} – эквивалентная магнитная цепь; T_e – выходной электромагнитный момент двигателя, J – эквивалентная инерция вращения ротора двигателя; B – коэффициент демпфирования ротора; T_L – комбинированный момент сопротивления нагрузки.

При игнорировании трансмиссионного зазора, момента трения и других влияющих факторов математическая модель редуктора имеет вид

$$\theta_g = \theta_m / N_i,$$

где θ_g – выходное угловое смещение редуктора; θ_m – угловое смещение выходного вала двигателя; N_i – передаточное отношение редуктора.

Если пренебречь зазором винта, деформацией, трением и другими влияющими факторами, математическая модель шарикового винта имеет вид

$$x_g = \frac{\theta_g}{2\pi} P_h,$$

где x_g – выходное смещение шарико-винтовой передачи, а P_h – ход шарико-винтовой передачи.

На основе этой модели для диагностики неисправности применяется метод с использованием нейронной сети SAE-BiLSTM; его структура представлена на рис. 1. Обучение сетей выполняется в автономном режиме с известными нормальными данными и данными об отказах. Обученные сети загружаются в бортовую систему для обеспечения онлайн-диагностики и обнаружения неисправностей.

Метод диагностики неисправностей ЭПЛА заключается в следующем.

- Данные собираются и предварительно нормализуются в диапазоне [0, 1].
- Выполняется обучение: сеть извлечения признаков на основе разреженного автоэнкодера

(SAE) обучается выполнять адаптивное извлечение данных датчиков на уже собранном наборе данных, содержащем нормальные рабочие состояния и состояния неисправности, что обеспечивает снижение размерности и сжатие при сохранении важных признаков. После этого регрессор на основе сети BiLSTM (сеть BiLSTM состоит из нейронов LSTM и модели двунаправленной рекуррентной нейронной сети) обучается с использованием данных признаков нормального состояния, которые применяются для построения модели временных рядов и поиска разностей между расчетными и измеренными значениями нормальных и ошибочных данных. На основе полученных разностей и соответствующих типов ошибок классификатор на основе Softmax обучается для классификации ошибок.

- Для диагностики неисправностей применяются три сети, полученные в процессе обучения. Обработанные данные мониторинга сначала передаются через сеть SAE для уменьшения масштаба данных и извлечения признаков, затем при помощи сети BiLSTM вычисляются разности между

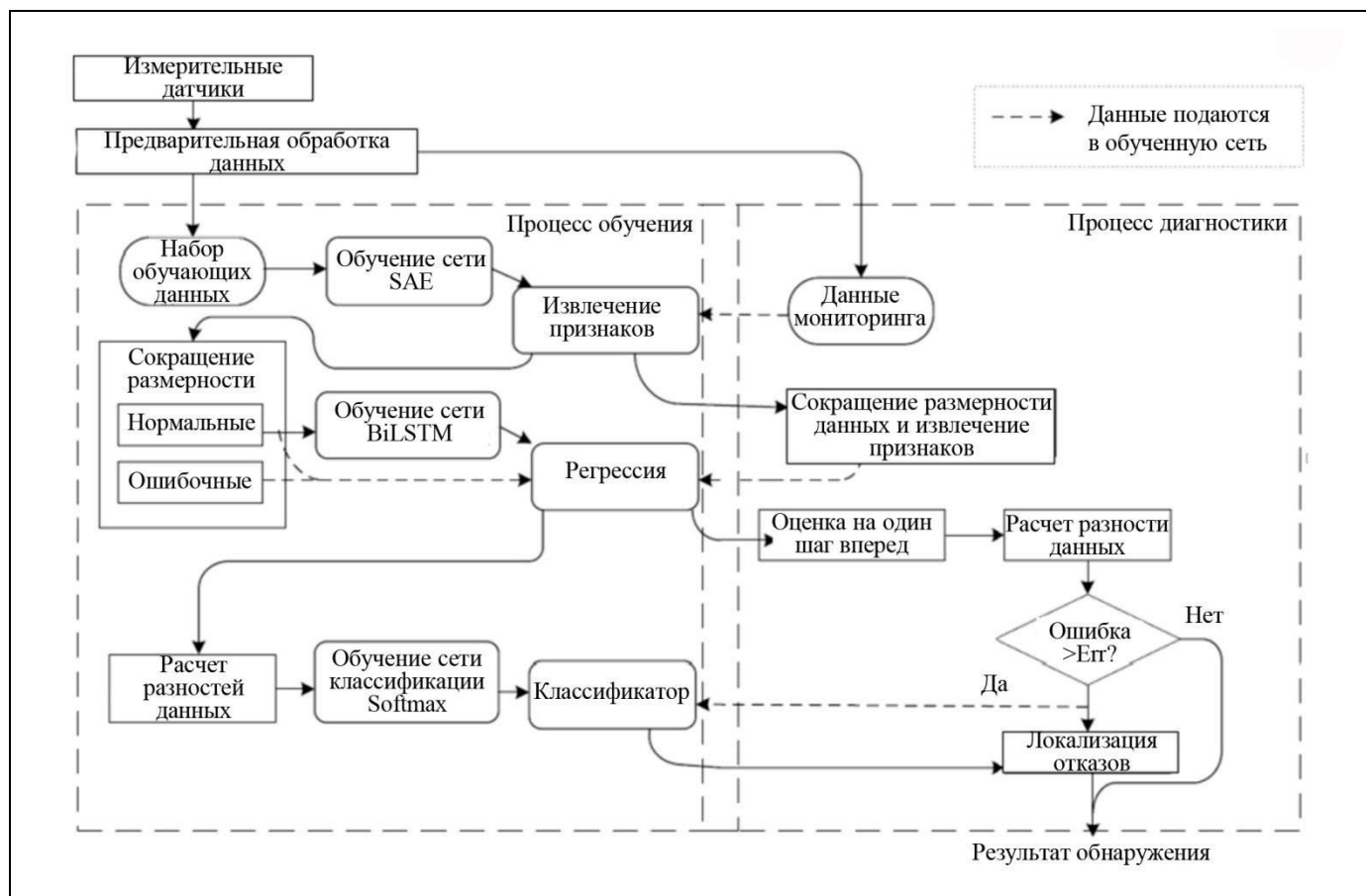


Рис. 1. Схема диагностики неисправностей ЭПЛА на основе глубокого обучения

одношаговой опережающей оценкой и измеренными данными, и если разности превышают пороговое значение, сообщается об ошибке, а данные о произошедшей ошибке передаются в сеть Softmax для классификации ошибки.

2.3. Диагностика неисправностей ЭПЛА на основе многомасштабной сверточной нейронной сети

В работе [14] для диагностики неисправностей ЭПЛА предлагается метод многомасштабной сверточной нейронной сети слияния признаков, который состоит из четырех последовательных этапов: многомасштабное преобразование, изучение признаков, объединение признаков и классификация неисправностей. Работа ЭПЛА осуществляется в сложных условиях, связанных с изменением скорости и нагрузки, при сильном шуме внешней среды. Внедрение многомасштабного преобразования в сверточную нейронную сеть позволяет улучшать разнообразие и взаимодополняемость характеристик, связанных с неисправностями.

Многомасштабное преобразование представляет собой выборку сигнала с разной степенью детализации. Для данного одномерного сигнала $\{x\}$ длины N несколько последовательных сигналов $\{y^{(k)}\}$ с разной степенью детализации создаются с помощью простого процесса понижения частоты дискретизации. На рис. 2 представлен сигнал в трех разных масштабах (Масштаб 1, Масштаб 2 и Масштаб 3).

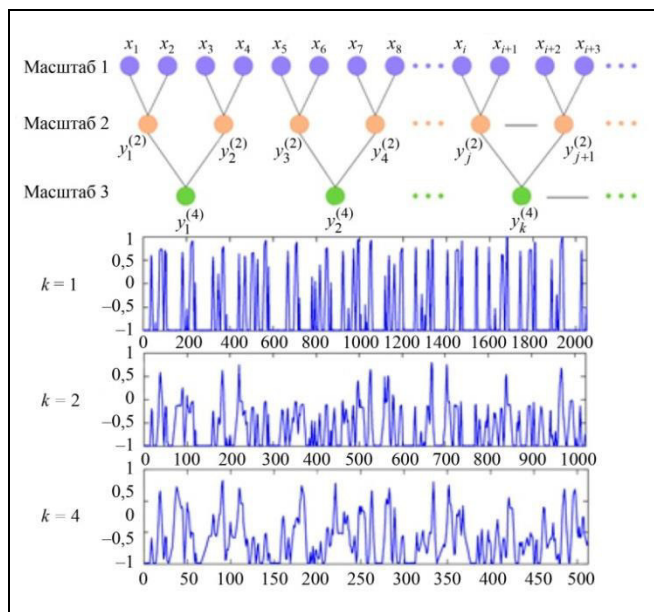


Рис. 2. Метод многомасштабной понижающей дискретизации сигнала

Можно получить несколько отфильтрованных сигналов с разными масштабами. Количество детализированных сигналов связано с деталями и тенденциями изучения признаков.

Математическое описание многомасштабной понижающей дискретизации выглядит следующим образом:

$$y_j^{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{i=(j-1)k+1}^{jk} x_i, \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{k},$$

где k – коэффициент масштабирования.

Для изучения признаков после получения сигналов $\{y^{(k)}\} (k=1, 2, 4)$ с разными масштабами дискретизации полученные сигналы параллельно проходят через пары сверточных слоев $(C1^{(k)}, C2^{(k)}, C3^{(k)})$ и слоев объединения $(P1^{(k)}, P2^{(k)}, P3^{(k)})$ для обучения в разных временных масштабах. В частности, для сигналов с разными масштабами дискретизации используются фильтры (ядра свертки) разных размеров, так что каждый параллельный сверточный слой на одном уровне может получать характеристики разных высоко- и низкочастотных признаков, тем самым улучшая диагностические характеристики модели.

Первые сверточные слои $(C1^{(1)}, C1^{(2)}, C1^{(4)})$ имеют длину сигнала $N, N/2, N/4$ соответственно. Для каждой первой свертки размер соответствующего ядра свертки уменьшается по мере увеличения значения k , что способствует лучшему извлечению полезных признаков.

Для каждого сигнала $\{y^{(k)}\} (k=1, 2, 4)$ после слоев $C1^{(k)}$ и $P1^{(k)}$ генерируется определенное количество новых карт признаков. Затем эти карты признаков используются в качестве входных данных для слоя $C2^{(k)}$, операции повторяются и генерируются новые карты признаков. Точно так же, если предположить, что в слое $C3^{(k)}$ используются K ядер свертки, выходом слоя объединения $P1^{(k)}$ является K новых карт признаков:

$$q^{(k)} = [p_1, p_2, \dots, p_K].$$

Окончательное представление признака q имеет три разных масштаба:

$$q = [q^{(1)}, q^{(2)}, q^{(4)}].$$

Следовательно, по сравнению с традиционным одномасштабным представлением, многомасштабное изучение признаков имеет больший диапазон охвата признаков, что способствует извлечению дополнительных признаков и обеспечивает лучший эффект для следующего шага классификации неисправностей.

В качестве эффективного механизма слияния признаков используется механизм внимания. Сеть может выборочно усиливать полезные функции для выявления ошибок и подавлять недействительные.

Для выполнения классификации используется комбинация полносвязного скрытого слоя и слоя Softmax. На вход полносвязного слоя подается вектор признаков q , полученный на предыдущем этапе. Скрытый слой использует ReLU в качестве функции активации, в выходном слое используется функция Softmax.

Пусть Y представляет собой метку категории состояния ЭПЛА. Предположим, что всего n категорий; т. е. для входной выборки x вероятность того, что она принадлежит к категории c , определяется следующим образом:

$$p(Y = c|x; \theta) = \text{softmax}(\theta_c^T x) = \frac{\exp(\theta_c^T x)}{\sum_{j=1}^n \exp(\theta_j^T x)},$$

где $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ – параметр, который необходимо изучить в модели; $1 / \sum_{j=1}^n \exp(\theta_j^T x)$ – нормиро-

ванная функция, $\sum_{j=1}^n P_j = 1$.

Для любой заданной входной выборки многомасштабная сверточная нейронная сеть будет предсказывать результат. Для того чтобы предсказанное значение модели максимально соответствовало истинному, необходимо минимизировать расстояние между предсказанным значением и истинным значением, т. е. функцию потерь

$$L(\theta) = -\frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K I\{y_i = k\} \log \frac{\exp(\theta_k^T x)}{\sum_j \exp(\theta_j^T x)} \right],$$

где m – количество проб или размер входной партии; $I\{\cdot\}$ – функция индекса:

$$I\{y_i = k\} = \begin{cases} 1, & \text{если } y_i = k, \\ 0, & \text{если } y_i \neq k. \end{cases}$$

Чтобы минимизировать значение функции потерь модели, необходимо оптимизировать и настроить вес нейронной сети, и оптимизатор использует для этого алгоритм обратного распространения:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} L(f(x; \theta), y),$$

где θ^* – оптимальный параметр модели; $L(\cdot)$ – функция потерь; $f(\cdot)$ и y – выходное значение и целевое значение модели соответственно.

Авторы работы [14] приводят двумерную визуализацию процесса классификации (рис. 3), которая показывает, что сначала выборки различных категорий исходного сигнала перемешаны и неразделимы (рис. 3, а), по мере прохождения слоев выборки разделяются (рис. 3, б–ж) и после слоя Softmax располагаются далеко друг от друга (рис. 3, з).

В работе [14] приводятся экспериментальные результаты, которые показывают, что в сценариях с сильным шумом и переменными нагрузками предлагаемый метод имеет лучшую производительность, чем такие современные методы диагностики неисправностей, как сверточные нейронные сети с широкими ядрами первого уровня [40] и многомасштабные сверточные нейронные сети [41].

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭПЛА

3.1. Техническое обслуживание на основе прогнозирования

На работы по техническому обслуживанию ЛА приходится около 10–20 % общих эксплуатационных расходов. Оптимизация затрат на техническое обслуживание самолетов благодаря внедрению обслуживания на основе прогнозирования упоминается в многочисленных исследованиях [42–47].

Предполагается, что обслуживание на основе прогнозирования будет проводиться при необходимости в зависимости от технического состояния компонента с целью предупреждения неисправностей до их появления, а не по времени независимо от текущего состояния. Для реализации обслуживания на основе прогнозирования необходима упреждающая оценка технического состояния и прогнозирование оставшегося срока полезного использования компонентов и подсистем в реальном времени на основе моделей, на основе данных или с помощью гибридных методов [48]. Основные

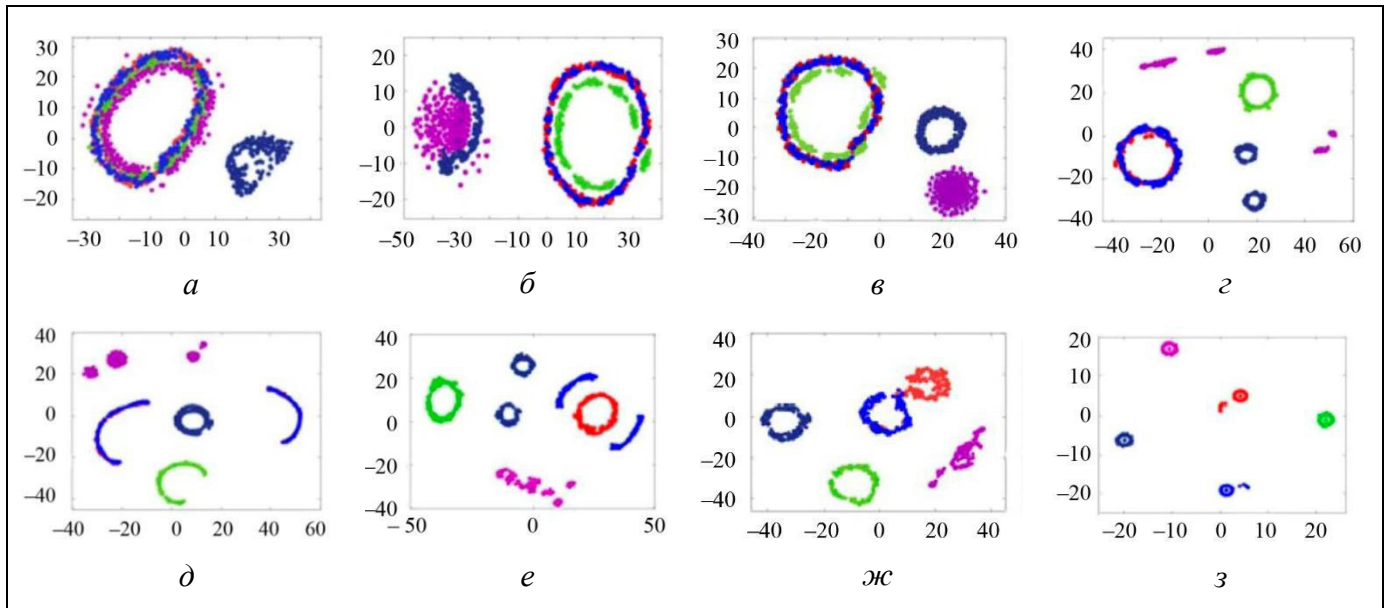


Рис. 3. Двумерная визуализация процесса классификации многомасштабной сверточной нейронной сети

преимущества и недостатки разных методов обсуждались в п. 2.1. В работе [49] предлагается метод раннего обнаружения и идентификации неисправностей ЭПЛА на основе модели. Предлагаемый метод прогнозирования способен идентифицировать аномальное поведение ЭПЛА при двух прогрессирующих отказах: частичном межвитковом замыкании фазы статора и статическом эксцентриситете ротора. Использование моделей для оценки технического состояния и прогнозирования оставшегося срока полезного использования на борту требует тщательной проверки этих моделей. В работе [9] описан испытательный стенд для экспериментальной проверки моделей ЭПЛА в номинальных условиях, а также при наличии зарождающихся механических неисправностей, таких как изменение трения и увеличение люфтов в редукторе.

Применение методов машинного обучения для прогнозирования технического состояния в авиации сопряжено с рядом проблем [50]. Эксплуатационные данные, генерируемые системой технического состояния ЛА, крайне несбалансированы, поскольку отказы компонентов ЛА происходят во время полетов чрезвычайно редко и данные смещены в сторону нормальной работы. В этом случае необходимы специальные методы анализа, способные противодействовать дисбалансу данных. Другая проблема заключается в отсутствии общедоступных наборов данных, что ограничивает исследования в этой области [46].

В работе [51] представлен метод обнаружения редких отказов для прогностического обслуживания самолетов с применением глубокого гибридного обучения на основе несбалансированного набора данных. Предлагаемая модель использует два этапа: автоэнкодер для обнаружения редких сбоев и сверточную нейронную сеть с двунаправленными управляемыми рекуррентными блоками (англ. *Bidirectional Gated Recurrent Unit*, BGRU) для прогнозирования следующего возникновения сбоя. Предлагаемый метод оценивается с использованием данных реальной системы технического обслуживания самолетов. Результаты оценки свидетельствуют, что метод эффективен для прогнозирования отказов компонентов в течение заранее определенного значимого периода времени.

В настоящее время в литературе рассматривается главным образом прогнозирование технического состояния и оставшегося срока полезного использования авиационных двигателей [52–55]. Для решения проблемы оценки оставшегося срока полезного использования был предложен ряд гибридных подходов, основанных на физических моделях и анализе данных. В зависимости от того, какой тип информации обрабатывается и как фрагменты информации объединяются, были предложены различные типы гибридных архитектур. На данный момент универсальной прогностической модели не существует и ее выбор зависит от конкретных характеристик отдельных рассматриваемых подсистем [56].

Для решения проблем в области прогнозирования технического состояния и оставшегося срока полезного использования ЭПЛА в настоящее время отсутствует достаточное количество реальных данных об отказах в условиях эксплуатации, поскольку использование ЭПЛА в ЛА в основном ограничивается системами, некритичными для безопасности, и отказы очень редки. Поэтому применяются главным образом методы на основе моделей.

3.2. Прогнозирование неисправностей ЭПЛА на основе метаэвристических алгоритмов

Авторы статьи [57] исследуют инструмент обнаружения и идентификации неисправностей ЭПЛА на основе модели с использованием генетического алгоритма. Предлагаемый подход тестировался для обнаружения нескольких наиболее распространенных отказов. Отмечается способность предлагаемой стратегии точно оценивать работоспособность системы при наличии нескольких режимов отказа, влияющих на одни и те же сигналы одновременно. Однако требуемое время вычислений делает стратегию пригодной для обнаружения и идентификации неисправностей ЭПЛА, выполняемых во время планового технического обслуживания, но не для оценки неисправностей в реальном времени.

В работах [3, 58, 59] авторы исследуют применение биоинспирированных метаэвристических алгоритмов для решения задачи обнаружения скрытых неисправностей, зарождающихся отказов и их прогрессирования в процессе эксплуатации с целью предотвращения потенциально опасных отказов типичного бортового ЭПЛА.

Из-за того, что отказы ЭПЛА редки и реальные данные получить сложно, авторы работы [3] использовали данные, полученные на основе моделирования: эталонной модели (англ. *reference model*, RM) с высокой точностью [60] и модели мониторинга (англ. *monitoring model*, MM), с низкой точностью, при помощи которой моделирование выполнялось почти в режиме реального времени [61]. Экспериментальная проверка моделей проводилась при помощи экспериментального испытательного стенда [9].

Моделировались наиболее критичные для ЭПЛА отказы: сухое трение, люфт, короткое замыкание, эксцентриситет ротора и дрейф пропорционального коэффициента усиления ПИД-регулятора. Отказы моделировались при помощи

параметров отказов, каждый из которых связан с определенным отказом и для характеристики различных масштабов отказа принимает значение от 0 до 1. Путем изменения параметров отказов моделировалось поведение исполнительного механизма в различных условиях. Во время прогностической процедуры запускалась ММ с некоторым набором параметров отказов. Нахождение вектора параметров отказов, при которых разница между прогнозируемыми и фактическими тенденциями достаточно мала, позволяет определить, происходит ли сбой, какого рода сбой и каков его масштаб. Цель алгоритма оптимизации – подобрать такой вектор параметров отказов, который минимизирует целевую функцию. Целевая функция имеет вид

$$e_{tls} = \sum_i \frac{(I_{MM,i} - I_{RM,i})^2}{\left(\frac{\Delta I_{RM,i}}{\Delta T}\right)^2 + 1} \cdot \Delta T,$$

где $I_{MM,i}$ и $I_{RM,i}$ – текущие выходы моделей ММ и RM соответственно в момент времени i . Оценивается квадратичная ошибка, характеризующая разницу между значениями выходов этих моделей, ΔT – шаг интегрирования.

Авторы сравнивают разные метаэвристические алгоритмы, основанные на биотехнологиях, а именно:

- дифференциальную эволюцию (англ. *Differential Evolution*, DE) – концепция этого алгоритма следует естественным эволюционным принципам [62, 63];

- оптимизацию роя частиц (англ. *Particle Swarm Optimization*, PSO) – наиболее часто используемый алгоритм роевого интеллекта, в котором рой способен определять оптимальные решения путем обмена информацией между частицами; в основу положено изучение движения птичьих стай или косяков рыб [64, 65];

- оптимизацию серого волка (англ. *Grey Wolf Optimization*, GWO) – алгоритм оптимизации, основанный на идее жесткой иерархии среди членов популяции. Особи с более высокими оценками приспособленности имеют большее влияние на процесс оптимизации [66, 67].

Результаты сравнения средней ошибки в процентах для каждого режима отказа для разных алгоритмов представлены на рис. 4. Для каждого вида отказа смоделированы два различных уровня величины в диапазоне от 0 до 1: высокий (0,75) и низкий (0,25).

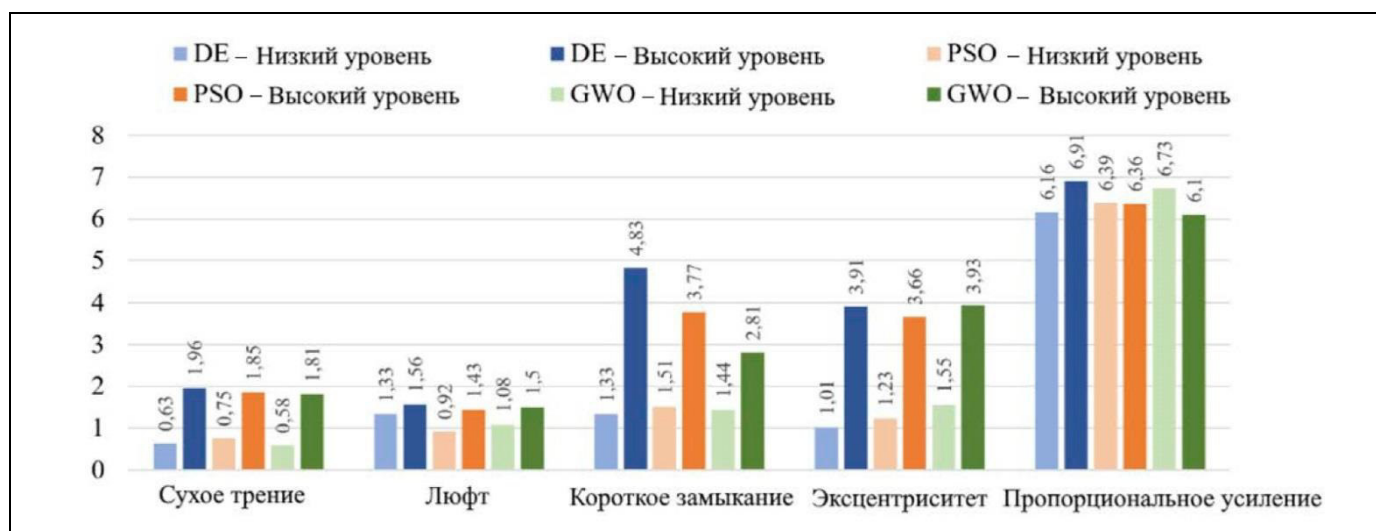


Рис. 4. Средняя ошибка в процентах для каждого режима отказа для разных алгоритмов

Алгоритм дифференциальной эволюции показывает немного меньшую ошибку, чем другие алгоритмы, для сигналов низкой интенсивности. Алгоритм оптимизации серого волка оказывается более точным для отказов высокого уровня (например, короткое замыкание и пропорциональное усиление). Алгоритм оптимизации роя частиц оказывается наиболее точным для ошибок люфта в целом, высокого статического эксцентриситета и низкого пропорционального усиления. Такие результаты свидетельствуют, что метаэвристические алгоритмы очень чувствительны к постановке задачи; ни один из исследуемых алгоритмов не способен превзойти другие в любой ситуации. Ведущим алгоритмом, обеспечивающим наилучшие результаты для случая множественных отказов, а также наиболее эффективным алгоритмом с точки зрения вычислительных затрат является алгоритм оптимизации роя частиц.

4. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ

Отечественные исследователи применяют подходы на основе нейронных сетей и машинного обучения для диагностики и прогнозирования технического состояния авиационных двигателей [68–70] и ЭПЛА [71–78].

Специалисты Пермского национального исследовательского политехнического университета в работе [71] приводят результаты комплексного анализа использования методов машинного обучения для диагностики асинхронных двигателей электропривода на лабораторном стенде. Задача определения исправности двигателя сводится к бинарной классификации для каждого типа неис-

правности, к поиску алгоритмов, обеспечивающих классификацию с большей точностью.

После проведенного анализа в качестве наиболее эффективного выбран подход к построению ансамбля классификаторов, включающий следующие методы:

- случайного леса, уменьшающий проблему переобучения;
- многослойный персептрон – класс искусственных нейронных сетей, продемонстрировавший способность находить приближенные решения для чрезвычайно сложных задач;
- градиентный бустинг, обрабатывающий категориальные признаки и нелинейности;
- усовершенствованную форму алгоритма градиентного бустинга, позволяющую повысить точность классификации.

Разработанная система классификации показала свою перспективность для промышленного внедрения благодаря низкой стоимости и высокой надежности.

Специалисты Московского авиационного института в работе [72] рассматривают нештатные ситуации, связанные с отказами приводов органов управления, и алгоритм обнаружения таких отказов, основанный на решении задачи идентификации модели движения ЛА и задачи классификации признаков отказной ситуации с применением нейросетевых методов. В работе анализируются три вида отказов приводов органов управления: потеря эффективности привода, «замораживание» привода в момент возникновения нештатной ситуации и сочетание этих двух типов отказов. При моделировании отказа привода управляющей поверхности производится модификация аэродинамических коэффициентов, содержащих значение

отклонения этой поверхности. Реализованы две схемы преобразования: когда переменная, содержащая отклонение управляющей поверхности, присутствует в аэродинамическом коэффициенте в явном и в неявном виде. Объектом модели диагностики является самолет-истребитель F-16. При моделировании полета в системе управления учитываются автопилоты угла атаки, тангажа и крена, отвечающие за выдерживание заданного углового положения ЛА. Модель движения представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Описывается реализация численного решения задачи Коши для этой системы уравнений методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Данными наблюдений являются значения угловых скоростей и командных сигналов от каналов системы управления. Рассматривается подход, при котором распознавание признаков отказной ситуации производится на основании наблюдений за функциями кросс-корреляции угловых скоростей. Взаимосвязь между парами угловых скоростей можно оценить количественно и представить в виде функции. При возникновении отказа привода органа управления эта взаимосвязь нарушается. Для классификации отказов приводов используются нейросетевые модели функций кросс- и автокорреляции угловых скоростей.

В Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) разработан подход к испытаниям авиационных исполнительных механизмов для проверки работоспособности испытуемого привода при динамических внешних нагрузках, соответствующих различным режимам полета [73], который, получив развитие, в настоящее время применяется как для отладки алгоритмов диагностики неисправностей традиционных сервоклапанных гидроприводов, так и для ЭПЛА с использованием нейронных сетей. Целью экспериментальных испытаний электроприводов является выявление недостатков конструкции привода или настройки системы его управления. Испытания исполнительных механизмов, проводимые в ЦАГИ, можно квалифицировать следующим образом:

- изолированные испытания исполнительных механизмов и их элементов, а также сигнальных путей систем управления полетом;
- отработка исполнительных систем поверхности ЛА для управления полетом;
- тестирование контура управления «объект управления – система управления – исполнительное устройство».

Результаты этих испытаний могут быть использованы как формальное основание для выдачи первого сертификата летной годности.

В Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) совместно с ЦАГИ ведутся работы по разработке и исследованию технологий, методов и алгоритмов построения системы ранней диагностики электро-механических систем с использованием машинного обучения. Целью этих работ являются синтез и верификация алгоритмов машинного обучения для поиска и формализации закономерностей во взаимосвязях между контролируемыми параметрами, оценкой и прогнозом технического состояния электро-механических систем.

В работе [74] описана разработка и верификация на основании статических и динамических характеристик натурного образца математической модели рулевого сервопривода (СП) для БПЛА среднего радиуса действия взлетным весом 400 кг. Модель предназначена для создания системы ранней диагностики неисправностей СП. Сформулирована задача оценки состояния СП в виде задачи классификации на основе алгоритмов интеллектуального анализа данных. Предложена обобщенная схема формирования и анализа данных для оценки технического состояния СП.

В работах [75, 76] предложенная схема используется для построения алгоритма раннего обнаружения отказов ЭПЛА, связанных с изменением диссипативных потерь в механическом редукторе. Данные о работе ЭПЛА при взлете формировались с помощью математической модели и включали 12 параметров. На основе предлагаемого алгоритма отбора информативных признаков были отобраны четыре параметра в качестве входов нейронной сети и проведено обучение 50-ти нейронных сетей. Вычислительные эксперименты показали, что уменьшение количества входных параметров позволило уменьшить количество нейронов, повысить скорость обучения нейронных сетей и точность вычислений.

В докладе [77] представлена разработка алгоритмов поиска информативных признаков для прогнозирования технического состояния ЭПЛА. С этой целью применяются методы анализа временных рядов и генетические алгоритмы. Разработанные алгоритмы исследованы и верифицированы на данных, полученных с использованием математической модели ЭПЛА и в результате ресурсных стендовых испытаний бесколлекторного электродвигателя БПЛА.

Эффективность предлагаемого подхода для построения алгоритма определения технического состояния ЭПЛА на основе нейронных сетей, обеспечивающих формализацию закономерностей в данных, исследуется в работе [78]. Представлена



схема отбора информативных признаков на основе «оберточных» методов для обучения нейронной сети. Приводятся данные экспериментальных исследований определения технического состояния ЭПЛА (исправное, предаварийное, аварийное), связанных с изменением люфта и сухого трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен обзор зарубежных и отечественных исследований, посвященных методам диагностики неисправностей ЭПЛА на основе моделей, на основе данных и гибридных методов. Основные усилия исследователей направлены на методы глубокого обучения с целью анализа больших объемов данных, получаемых в процессе функционирования ЭПЛА. Применяя методы глубокого обучения, можно извлекать эффективные признаки неисправностей прямо из сигналов мониторинга и одновременно выполнять классификацию неисправностей.

Диагностика и классификация неисправностей являются лишь первыми шагами на пути к техническому обслуживанию ЭПЛА по состоянию на основе прогнозирования. Важную роль в обеспечении безопасности и надежности авиационных систем играют оценка технического состояния и прогнозирование оставшегося полезного срока использования в процессе эксплуатации, что позволяет своевременно предвидеть возможные отказы оборудования и предотвращать их.

Рассмотренные в обзоре подходы являются инновационными, они инициированы бурным развитием и значительными достижениями при практическом применении нейросетевых технологий и глубокого обучения в некоторых практических областях. Приведенный обзор литературы свидетельствует о большом интересе исследователей, особенно зарубежных, к применению таких подходов в области диагностики и прогнозирования неисправностей ЭПЛА, но пока только на стадии разработки и исследований. Результаты имитационного моделирования и экспериментов на стендах свидетельствуют о перспективности и необходимости дальнейшего развития методов, рассмотренных в обзоре, при этом отмечены также существующие трудности на пути их практического применения.

Одна из основных проблем при разработке систем управления техническим состоянием ЭПЛА по состоянию заключается в сложности получения необходимых данных для исследований, поскольку ЭПЛА пока используются в ЛА недостаточно широко, а их отказы достаточно редки. В настоя-

щее время для исследований используются данные, полученные на основе моделирования и на испытательных стендах. На практике применение предлагаемых подходов может оказаться не столь эффективным из-за влияния реальных условий эксплуатации ЭПЛА и внешней среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia Garriga, A., Ponnusamy, S. S., Mainini, L. A Multi-fidelity Framework to Support the Design of More-Electric Actuation // AIAA Aviation Forum. Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. – Atlanta, 2018. – DOI: 10.2514/6.2018-3741.
2. Adu-Gyamfi, B.A., Good, C. Electric aviation: a Review of Concepts and Enabling Technologies // Transportation Engineering. – 2022. – Vol. 9, no. 4 – DOI: 10.1016/j.treng.2022.100134.
3. Baldo, L., Querques, I., Dalla Vedova, M.D.L., et al. A Model-Based Prognostic Framework for Electromechanical Actuators Based on Metaheuristic Algorithms // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, no. 3. – DOI: 10.3390/aerospace10030293.
4. Li, J., Yu, Z., Huang, Y., Li, Z. A Review of Electromechanical Actuation System for More Electric Aircraft // Proceedings of the IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS). – Beijing, 2016. – P. 490–497.
5. Annaz, F.Y., Kaluarachchi, M.M. Progress in Redundant Electromechanical Actuators for Aerospace Applications // Aerospace. – 2023. – Vol. 10(9). – DOI: 10.3390/aerospace10090787.
6. Fu, S., Avdelidis, N.P. Prognostic and Health Management of Critical Aircraft Systems and Components: An Overview // Sensors. – 2023. – Vol. 23, no. 19. – DOI: 10.3390/s23198124.
7. Bertolino, A.C., De Martin, A., Jacazio, G., Sorli, M. Towards a PHM System for Electromechanical Flight Control Actuators // Proceedings of I-RIM 2020. – Torino, 2020. – DOI: 10.5281/zenodo.4781001.
8. Bertolino, A.C., De Martin, A., Jacazio, G., Sorli, M. Design and Preliminary Performance Assessment of a PHM System for Electromechanical Flight Control Actuators // Aerospace. – 2023. – Vol. 10. – DOI: 10.3390/aerospace10040335.
9. Baldo L., Berri P.C., Matteo D. L., et al. Experimental Validation of Multi-fidelity Models for Prognostics of Electromechanical Actuators // Proceedings of the 7th European Conference of the Prognostics and Health Management Society. – Torino, 2022. – Vol. 7, no.1. – P. 32–42. – DOI: 10.36001/phme.2022.v7i1.3347.
10. Cai, B., Zhao Y., Liu, H., Xie, M. A Data-Driven Fault Diagnosis Methodology in Three-Phase Inverters for PMSM Drive Systems // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32, no. 7. – P. 5590–5600.
11. Sudhawiyangkul, T., Isarakorn, D. Design and Realization of an Energy Autonomous Wireless Sensor System for Ball Screw Fault Diagnosis // Sensors and Actuators A Physical. – 2017. – Vol. 258. – P. 49–58.
12. Chirico, A., Kolodziej, J.R. Fault Detection and Isolation for Electro-Mechanical Actuators Using a Data-Driven Bayesian Classification // SAE International Journal of Aerospace. – 2012. – Vol. 5, no. 2. – P. 494–502.

13. Chirico, A.J., Kolodziej, J.R. A Data-driven Methodology for Fault Detection in Electromechanical Actuators // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*. – 2014. – Vol. 136, no. 4. – DOI: 10.1115/1.4026835.
14. Song, Y., Du, J., Li, S. Multi-Scale Feature Fusion Convolutional Neural Networks for Fault Diagnosis of Electromechanical Actuator // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, no. 15. – Art. no. 8689. – DOI: 10.3390/app13158689.
15. Wang, J., Zhang, Y., Luo, C., Miao, Q. Deep Learning Domain Adaptation for Electro-Mechanical Actuator Fault Diagnosis Under Variable Driving Waveforms // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – Vol. 22, no. 11. – P. 10783–10793.
16. Derrien, J.-C., Securite, S.D. Electromechanical Actuator (EMA) Advanced Technologies for Flight Controls // 28-th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2012). – Brisbane, 2012. – URL: https://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/291.PDF.
17. Qiao, G., Liu, G., Shi, Z., et al. A Review of Electromechanical Actuators for More/All Electric Aircraft Systems // *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2018. – Vol. 232, no. 22. – P. 4128–4151. – DOI: 10.1177/0954406217749869.
18. Yin, Z., Hu, N., Chen, J., et al. A Review of Fault Diagnosis, Prognosis and Health Management for Aircraft Electromechanical Actuators // *IET Electronic Power Applications*. – 2022. – Vol. 16, no. 11. – P. 1249–1272. – DOI: 10.1049/elp2.12225.
19. Jian, F., Mare, J.-C., Yongling, F. Modelling and Simulation of Flight Control Electromechanical Actuators with Special Focus on Model Architecting, Multidisciplinary Effects and Power Flows // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2017. – No. 30 (1). – P. 47–65.
20. Cui, Z., Jing, B., Jiao, X., et al. The Integrated-Servo-Actuator Degradation Prognosis Based on the Physical Model Combined With Data-Driven Approach // *IEEE Sensors Journal*. – 2023. – Vol. 23, no. 9. – P. 9370–9381. – DOI: 10.1109/JSEN.2023.3248323.
21. Randall, R.B. The Use of Simulation Models to Generate Data Corresponding to Faults in Machines // 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS-2009). – Chendgu, 2009. – DOI: 10.1109/ICRMS.2009.5269971.
22. Mazzoleni, M., Di Rito, G., Previdi, F. Electromechanical Actuators for the More Electric Aircraft. – Cham: Springer, 2021. – 239 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-61799-8.
23. Hopf, K., Reifenrath, S. Filter Methods for Feature Selection in Supervised Machine Learning Applications – Review and Benchmark // Cornell University. – arXiv: 2111.12140v1[cs.LG]. – 2021. – DOI: 10.48550/arXiv2111.12140.
24. Chirico, A.J., Kolodziej, J.R., Hall, L. A Data Driven Frequency Based Feature Extraction and Classification Method for EMA Fault Detection and Isolation // 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference. – Houston, 2012. – DOI: 10.1115/DSCC2012-MOVIC2012-8749.
25. Jing, J., Liu, H., Lu, C. Fault Diagnosis of the Aircraft Electromechanical Actuation System Based on WPD-STFT Time Frequency Entropy and PNN // *Vibroengineering Procedia*. – Oct. 2017. – Vol. 14. – DOI: 10.21595/vp.2017.19247.
26. Li, J., Meng, G., Xie, G., Jia, Y. Sensor Fault Diagnosis Based on Wavelet Packet and SOM Neural Network // *Chinese Journal of Sensors and Actuators*. – 2017. – Vol. 30, no. 7. – P. 1035–1039. – DOI: 103969/j.issn.1004-1699.2017.07.011.
27. Ruiz-Cárcel, C., Starr, A. Data-Based Detection and Diagnosis of Faults in Linear Actuators // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2018. – Vol. 67. – Iss. 9. – P. 2035–2047. – DOI: 10.1109/TIM.2018.2814067.
28. Narasimhan, S., Roychoudhury, I., Balaban, E., Saxena, A. Combining Model-Based and Feature-Driven Diagnosis Approaches-A Case Study on Electromechanical Actuators // *Proceeding of the 21-st International Workshop on Principles of Diagnosis Held Jointly with Annual Conference of the PHM Society*. – Portland, 2010. – Vol. 2, no. 2. – DOI: 10.36001/phmconf.2010.v2i2.1936.
29. Wang, C., Ding, Y., Ma, J. An Adversarial Model for Electromechanical Actuator Fault Diagnosis under Nonideal Data Conditions // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 34, no. 1115. – P. 5883–5904. – DOI: 10.1007/s00521-021-06732-x.
30. Yang, J., Guo, Y., Zhao, W. Long Short-Term Memory Neural Network Based Fault Detection and Isolation for Electromechanical Actuators // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 360. – P. 85–96. – DOI: 10.1016/j.neucom.2019.06.029.
31. Yang, N., Shen, J., Jia, Y., Zhang, J. Fault Diagnosis of Electromechanical Actuator Based on Deep Learning Network // 39th Chinese Control Conference (CCC). – Shenyang, 2020. – P. 4002–4006. – DOI: 10.23919/CCC50068.2020.9189666.
32. Riaz, N., Shah, S.I.A., Rehman, F., et al. A Novel 2-D Current Signal-based Residual Learning with Optimized Softmax to Identify Faults in Ball Screw Actuators // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 115 299–115 313. – DOI: 10.1109/access.2020.3004489.
33. Siahpour, S., Li, X., Lee, J. Deep Learning-based Cross-sensor Domain Adaptation for Fault Diagnosis of Electromechanical Actuators // *International Journal of Dynamics and Control*. – 2020. – Vol. 8. – P. 1054–1062. – DOI: 10.1007/s40435-020-00669-0.
34. Ding, Y., Ma, L., Ma, J., et al. A Generative Adversarial Network-based Intelligent Fault Diagnosis Method for Rotating Machinery under Small Sample Size Conditions // *IEEE Access*. – Vol. 7. – P. 149 736–149 749. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2947194.
35. Wang, Y., Sun, G., Jin, Q. Imbalanced Sample Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Conditional Variational Auto-encoder Generative Adversarial Network // *Applied Soft Computing Journal*. – 2020. – Vol. 92, no. 7. – Art. no. 106333. – DOI: 10.1016/j.asoc.2020.106333.
36. Zhang, L., Gao, H., Wen, J., et al. A Deep Learning-Based Recognition Method for Degradation Monitoring of Ball Screw with Multi-sensor Data Fusion // *Microelectronics Reliability*. – 2017. – Vol. 75. – P. 215–222. – DOI: 10.1016/j.microrel.2017.03.038.
37. Yang, J., Guo, Y., Wanti, Z. An Intelligent Fault Diagnosis Method for an Electromechanical Actuator Based on Sparse Feature and Long Short-Term Network // *Measurement Science Technology*. – 2021. – Vol. 32, no. 9. – DOI: 10.1088/1361-6501/abfbab.
38. Zhang, X., Tang, L., Chen, J. Fault Diagnosis for Electro-Mechanical Actuators Based on STL-HSTA-GRU and SM // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. – 2021. – Vol. 70. – DOI: 10.1109/tim.2021.3127641.
39. Tao, X., Guo, Y., Zhao, W., et al. Fault Detection and Isolation of Electromechanical Actuator Based on SAE-BiLSTM // *The 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineer-*



- ing (ACMAE 2022). Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2472. – Art. no. 012031. – DOI: 10.1088/1742-6596/2472/1/012031.
40. Zhang, W., Peng, G., Li, C. A New Deep Learning Model for Fault Diagnosis with Good Anti-Noise and Domain Adaptation Ability on Raw Vibration Signals // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, no. 3. – DOI: 10.3390/s17020425.
 41. Jiang, G., He, H., Yan, J., Xie, P. Multiscale Convolutional Neural Networks for Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox // *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. – 2018. – Vol. 66, no. 4. – P. 3196–3207. – DOI: 10.1109/TIE.2018.2844805.
 42. Kordestani, M., Orchard, M.E., Khorasani, K., Saif, M. An Overview of the State of the Art in Aircraft Prognostic and Health Management Strategies // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – Vol. 72. – Art. no. 3505215. – DOI: 10.1109/TIM.2023.3236342.
 43. Rezaeianjouybari, B., Shang, Y. Deep Learning for Prognostics and Health Management: State of the Art, Challenges, and Opportunities // *Measurement*. – 2020. – Vol. 163, no. 4. – DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107929.
 44. Lei, Y., Li, N., Guo, L., et al. Machinery Health Prognostics: a Systematic Review from Data Acquisition to RUL Prediction // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – Vol. 104. – P. 799–834. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.11.016.
 45. Berri, P.C., Dalla Vedova, M.D.L., Mainini, L. Computational Framework for Real-time Diagnostics and Prognostics of Aircraft Actuation Systems // *Computers in Industry*. – 2021. – Vol. 132. – DOI: 10.1016/compind.2021.103523.
 46. Stanton, I., Munir, K., Ikram, A. Predictive Maintenance Analytics and Implementation for Aircraft: Challenges and Opportunities // *System Engineering*. – 2022. – Vol. 26, no. 137. – DOI: 10.1002/sys.21651.
 47. Scott, M.J., Verhagen, W.J.C., Bier, M.T., Marzocca, P. A Systematic Literature Review of Predictive Maintenance for Defence Fixed-Wing Aircraft Sustainment and Operations // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 18. – DOI: 10.3390/s22187070.
 48. Ismail, M.A.A., Balaban, E., Windelberg, J. Spall Fault Quantification Method for Flight Control Electromechanical Actuator // *Actuators*. – 2022. – Vol. 11, no. 29. – DOI: 10.3390/act11020029.
 49. Belmonte, D., Dalla Vedova, M.D.L., Maggiore, P. Prognostics of Onboard Electromechanical Actuators: a New Approach Based on Spectral Analysis Techniques // *International Review of Aerospace Engineering*. – 2018. – Vol. 11, no. 3. – DOI: 10.15866/irase.v11i3.13796.
 50. Zhang, J., Tian, J., Li, M., et al. A Parallel Hybrid Neural Network with Integration of Spatial and Temporal Features for Remaining Useful Life Prediction in Prognostics // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – Vol. 72. – DOI: 10.1109/TIM.2022.3227956.
 51. Dangut, M. D., Jennions, I.K., King, S., Skaf, Z. A Rare Failure Detection Model for Aircraft Predictive Maintenance Using a Deep Hybrid Learning Approach // *Neural Computing and Applications*. – 2023. – Vol. 35, no. 4. – P. 2991–3009. – DOI: 10.1007/s00521-022-07167-8.
 52. Hasib, A.A., Rahman, A., Khabir, M., Shawon, M.T. An Interpretable Systematic Review of Machine Learning Models for Predictive Maintenance of Aircraft Engine // *Cornell University*. – arXiv:2309.13310v1[cs.LG]. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2309.13310.
 53. Khan, K., Sohaib, M., Rashid, A. Recent Trends and Challenges in Predictive Maintenance of Aircraft's Engine and Hydraulic System // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 43, no. 8. – DOI: 10.1007/s40430-021-03121-2.
 54. Boujamza, A., Lissane Elhaq, S. Attention-Based LSTM for Remaining Useful Life Estimation of Aircraft Engines // *IFAC PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55, no. 12. – P. 450–455. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.353.
 55. Wang, C., Zhu, Z., Lu, N. A Data-Driven Degradation Prognostic Strategy for Aero-Engine under Various Operational Conditions // *Neurocomputing*. – 2021. – Vol. 462, no. 3. – P. 195–207. – DOI: 10.1016/j.neucom.2021.07.080.
 56. Chao, M.A., Kulkarni, C., Goebel, K., Fink, O. Fusing Physics-based and Deep Learning Models for Prognostics // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2022. – Vol. 217, no. 3. – DOI: 10.1016/j.res.2021.107961.
 57. Aimasso, A., Berri, P.C., Dalla Vedova, M.D. A Genetic-based Prognostic Method for Aerospace Electromechanical Actuators. *International Journal of Mechanics and Control*. – 2021. – Vol. 22, no. 2. – P. 195–206.
 58. Baldo, I., Vedova, M.D.L., Querques, I., Magglore, P. Prognostics of Aerospace Electromechanical Actuators: Comparison between Model-based Meta-heuristic Methods // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2526, no. 1. – Art. no. 012073. – DOI: 10.1088/1743-6596/1/012073.
 59. Dalla Vedova, M.D.L., Berri, P.C., Re, S. A Comparison of Bio-inspired Meta-heuristic Algorithms for Aircraft Actuator Prognostics // *29th European Safety and Reliability Conference*. – Hannover, – 2019. – DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0476-cd.
 60. Berri, P.C., Dalla Vedova, M.D., Maggiore, P. A Lumped Parameter High Fidelity EMA Model for Model-Based Prognostics // *29th European Safety and Reliability Conference*. – Hannover, 2019. – P. 1086–1093. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0480-cd.
 61. Berri, P.C., Dalla Vedova, M.D.L., Maggiore, P., Viglione, F. A Simplified Monitoring Model for PMSM Servoactuator Prognostics // *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*. – Osaka, 2018. – DOI: 10.1051/mateconf/201930404013.
 62. Randall, R.B. The Use of Simulation Models to Generate Data Corresponding to Faults in Machines // *8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS-2009)*. – Chengdu, 2009. – DOI: 10.1109/ICRMS.2009.5269971.
 63. Ahmad, M.F., Isa, N.A.M., Lim, W.H., Ang, K.M. Differential Evolution: A Recent Review Based on State-of-the-Art Works // *Alexandria Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 61, no. 5. – P. 3831–3872. – DOI: 10.1016/j.aej.2021.09.013.
 64. Kennedy, J., Eberhart, R. Particle Swarm Optimization // *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. – Perth, 1995. – P. 1942–1948. – DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
 65. Darwish, A. Bio-inspired Computing: Algorithms Review, Deep Analysis, and the Scope of Applications // *Future Computing and Informatics Journal*. – 2018. – Vol. 3, no. 2. – P. 231–246. – DOI: 10.1016/j.fcij.2018.06.001.
 66. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. Grey Wolf Optimizer // *Advances in Engineering*. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61. – DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

67. Kumar, V., Kumar, D. An Astrophysics-inspired Grey Wolf Algorithm for Numerical Optimization and its Application to Engineering Design Problems // *Advances in Engineering Software*. – 2017. – Vol. 112. – P. 231–254. – DOI: 10.1016/advengsoft.2017.05.008.
68. Егоров И.В., Соколов М.П. Сравнение эффективности нейросетевых алгоритмов с методами факторного анализа при диагностировании технического состояния ГТД // *Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники»*. – 2007. – № 123. – С. 89–95. [Egorov, I.V., Sokolov, M.P. Sroavnenie effektivnosti neirosetevykh algoritmov s metodami faktopnogo analiza pri diagnostirovanii tekhnicheskogo sostoyaniya // *Nauchnyj vestnik MGTU GA. Seriya «Ekspluatatsiya vozdushnogo transporta i remont aviatsionnoj tekhniki»*. – 2007. – No. 123. – P. 89–95. (In Russian)].
69. Соколов М.П., Земсков А.А., Куц М.С. Тренды технического диагностирования силовых установок и трансмиссий воздушных судов // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. – 2022. – № 15. – С. 37–46. [Sokolov, M.P., Zemskov, A.A., Kuts, M.S. Trendy tekhnicheskogo diagnostirovaniya silovykh ustanovok i transmissij vozdushnykh sudov // *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. – 2022. – No. 15. – P. 37–46. (In Russian)]
70. Mikhailov, A., Karavay, M., Farhadov, M. Inverse Sets in Big Data Processing // *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017)*. – Moscow, 2017. – Vol. 1. – P. 40–43.
71. Сальников С.В., Солодкий Е.М., Вишняков Д.Д. и др. Диагностика асинхронного двигателя на основе машинного обучения // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. – Санкт-Петербург, 2023. – Т. 1. – С. 295–300. [Sal'nikov, S.V., Solodkij, E.M., Vishnyakov, D.D., et al. Diagnostika asinkhronnogo dvigatelya na osnove mashinnogo obucheniya // *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam*. – Saint Petersburg, 2023. – Vol. 1. – P. 295–300. (In Russian)]
72. Козлов Д.С., Тюменцев Ю.В. Нейросетевые методы обнаружения отказов датчиков и приводов летательного аппарата // *Труды МАИ*. – 2012. – Вып. 52. – С. 2. [Kozlov, D.S., Tiumentsev, Y.V. Nejrosetevye metody obnaruzheniya otkazov datchikov i privodov letatel'nogo apparata // *Trudy MAI*. – 2012. – Vol. 52. – P. 2. (In Russian)]
73. Erofeev, E., Khaletskiy, L., Skryabin, A., Steblinkin, A. Methodologies and test-rig configurations for the experimental improvement of flight control actuation systems // *Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Component. Conference proceedings*. – Toulouse, 2018. – P. 109–116.
74. Вересников Г.С., Скрябин А.В., Гуцевич Д.Е. Разработка математической модели для исследования алгоритмов оценки и прогноза технического состояния сервопривода БЛА // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 7. – С. 170–181. [Veresnikov, G.S., Skryabin, A.V., Gutsevich, D.E. Razrabotka matematicheskoy modeli dlya issledovaniya algoritmov otsenki i prognoza tekhnicheskogo sostoyaniya servoprivoda BLA // *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*. – 2019. – No. 7. – P. 170–181. (In Russian)]
75. Veresnikov, G.S., Skryabin, A.V., Bazhenov, S.G. The Development of Algorithms for EMA Fault Early Detection System // *Proceedings of the 32th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. – Shanghai, 2020. – URL: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/previaw/ICAS2020_0239.htm.
76. Veresnikov, G.S., Lebedev, V.G., Ogorodnikov, O.V., Golev, A.V. Fault Detection Technique for Electromechanical Actuator of the Aircraft Using Neural Networks // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham: Springer, 2021. – P. 519–528.
77. Вересников Г.С., Скрябин А.В. Алгоритмы поиска информативных признаков для прогнозирования технического состояния электромеханического привода // *Тр. 14-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2021)*. – Москва, 2021. – С. 1389–1397. [Veresnikov, G.S., Skryabin, A.V. Feature Selection Algorithms for Forecasting Technical Condition of Electromechanical Actuator // *Proceedings of the 14th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD)*. – Moscow, 2021. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600182/>.
78. Вересников Г.С., Скрябин А.В. Диагностика неисправностей смешанного типа в редукторе электромеханического привода летательного аппарата с использованием нейронных сетей // *Тр. 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2022)*. – Москва, 2022. – С. 1116–1122. [Veresnikov, G.S., Skryabin, A.V. Diagnostics of Mixed Type Failures in the Aircraft Electromechanical Actuator Gear by Using Neural Networks // *Proceedings of the 15th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. – Moscow, 2022. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600182>.

Статья представлена к публикации руководителем PPC В.Ю. Столбовым.

Поступила в редакцию 16.02.2024,
после доработки 07.03.2024.
Принята к публикации 23.04.2024.

Кулида Елена Львовна – канд. техн. наук,
✉ elena-kulida@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0003-0226-9708>

Лебедев Валентин Григорьевич – д-р техн. наук,
✉ lebedev-valentin@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3206-9558>

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

© 2024 год. Кулида Е. Л., Лебедев В. Г.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



MODERN APPROACHES TO PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT OF AN AIRCRAFT ELECTROMECHANICAL ACTUATOR

E. L. Kulida* and V. G. Lebedev**

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

*✉ elena-kulida@yandex.ru, **✉ lebedev-valentin@yandex.ru

Abstract. In connection with implementing the concept of electric airplanes, it is necessary to ensure the high reliability of electromechanical actuators (EMAs) as important components of aviation systems. The structural composition of an EMA and the types of its faults are considered. Fault diagnosis methods based either on EMA modeling or the analysis of signals received during EMA operation, as well as hybrid methods combining both these approaches, are reviewed. The advantages, disadvantages, and difficulties in applying these approaches are investigated. Special attention is paid to EMA diagnosis methods based on deep learning, which process signals in automatic mode and implement complex fault diagnosis. The concept of aircraft equipment health management (in particular, EMA health management) is presented based on assessing the technical condition and prognosticating the remaining useful life in order to prevent faults before their occurrence. Several hybrid approaches with prognostics are highlighted to solve the aircraft health management problem. Finally, Russian R&D results in the field of machine learning-based aviation health management are reviewed.

Keywords: aircraft, electromechanical actuator (EMA), fault diagnosis, health management, prognostics.

Acknowledgments. This work was supported in part by the Russian Science Foundation, project no. 23-19-00464.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ[#]

С. М. Бекетов*, К. Н. Поспелов**, С. Г. Редько***

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*✉ salbek.beketov@spbp.ru, **✉ kapiton.pospelov@spbp.ru, ***✉ redko_sg@spbstu.ru

Аннотация. Рассмотрены основные аспекты концепций человеческого капитала, инновационных проектов и имитационного моделирования, на основе чего предложена имитационная модель, описывающая роль человеческого капитала в инновационных проектах. Разработанная модель высокого уровня абстракции создана для исследования роли социального компонента в организационной структуре инновационного проекта в общем контексте (на уровне отрасли, предприятия, части предприятия) и рассматривается прежде всего как инструмент для отслеживания динамики проектов с учетом состояния человеческого капитала системы. Модель состоит из двух основных частей: базовой имитационной модели, выполненной на языке системной динамики, и агентного компонента модели, описывающего динамику человеческого капитала. Модель представляет собой концептуальный инструмент, требующий калибровки и доработки для применения к конкретной организации.

Ключевые слова: имитационное моделирование, системная динамика, агентный подход, человеческий капитал, инновационные проекты.

ВВЕДЕНИЕ

Имитационное моделирование активно применяется для изучения различных социально-экономических и социотехнических систем [1, 2]. Преимущество этого подхода состоит в возможности отображения моделируемой системы на различных уровнях абстракции, что позволяет моделям выполнять описательные, прогностические и предписывающие функции на разных горизонтах планирования.

Три основных парадигмы имитационного моделирования – системная динамика, дискретно-событийный и агентный подходы [3] – благодаря различию заложенных в них принципов и инструментов обеспечивают широту области применения имитационного моделирования. В контексте рассмотрения влияния человеческого капитала на ин-

новационные проекты прежде всего следует исследовать две парадигмы: агентный подход и системную динамику.

Системная динамика подразумевает исключительно высокий уровень абстракции, поскольку в рамках подхода исследование различных систем осуществляется в терминах запасов и связывающих их потоков, а отдельные сущности внутри системы (в рамках агентного подхода часто представляемые отдельными акторами системных процессов) заданы вложенными характеристиками таких запасов и потоков [4]. Этот подход полезен при исследовательской работе в отношении глобальных систем, например при анализе мировых демографических процессов или эпидемиологических тенденций [4, 5]. Агентный подход концентрируется на поведении и взаимодействии отдельных акторов в системе, состояние которых в совокупности формирует состояние всей системы [6]. Сам по себе агентный подход достаточно универсален и позволяет моделировать системы на различных уровнях абстракции в рамках подхода: аб-

[#] Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-03-2024-004 от 17.01.2024).



страктность модели привязывается к объекту, моделируемому в качестве агента, и возрастает при переходе от локальных конкретных агентов (людей, станков, устройств и т. п.) к глобальным абстрактным агентам (предприятиям, регионам, государствам и т. п.) [7].

Переход к агентному моделированию во многом может быть связан с тем, что подразумеваемые в рамках прочих парадигм общность и строгость правил поведения могут ограниченно применяться в условиях отслеживания тенденций, ограниченно зависящих от человеческого мышления (например, в области эпидемиологии [4]), однако в организуемых и управляемых системах оказываются менее адекватны.

Потребность в отслеживании динамики взаимного влияния социального компонента и эффективности инновационного проекта в проектно-ориентированных системах (командах проектов, предприятиях и группах предприятий, выполняющих проекты) стала основной проблемой, поставленной в настоящей работе. Имитационное моделирование путем гибридизации агентного и системно-динамического подхода было выбрано в качестве способа разработки инструмента для организации такого отслеживания. Результаты работы также позволят обосновать ценность человеческого капитала для формирования устойчивой системы реализации инновационных проектов.

Таким образом, поставлена цель разработать инструментарий для отслеживания динамики проектов с учетом состояния человеческого капитала системы. Создаваемая модель при применении ее в условиях конкретной проектно-ориентированной системы должна позволить рассмотреть и проанализировать роль человеческого капитала в реализации инновационных проектов с двух точек зрения: снизу вверх, т. е. путем анализа поведения отдельных акторов инновационных процессов в контексте его воздействия на рассматриваемые проекты; и сверху вниз, т. е. путем анализа воздействия глобальных показателей инновационной деятельности предприятия (прежде всего результативности и эффективности инновационных проектов) на человеческий капитал.

1. ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ

1.1. Человеческий капитал

Концепция человеческого капитала получила широкое распространение в конце XX в. Согласно

Оксфордскому словарю¹ человеческий капитал определяется как «навыки, которыми обладают работники (сотрудники) и которые рассматриваются как ресурс или актив (предприятия)». Более полные определения включают, помимо навыков, понятия знаний, неявных знаний [8] и объектов интеллектуальной собственности, а также образование и даже здоровье сотрудников [9].

Человеческий капитал часто связывается с менеджментом знаний – направлением в управлении предприятием, в котором человеческий капитал рассматривается прежде всего с точки зрения экспертных знаний сотрудников, их навыков и известных им неявных знаний. В этом контексте некоторыми исследователями человеческий капитал может рассматриваться в том числе как часть интеллектуального капитала [10], который в концепции самообучающейся организации считается основным источником прибыли предприятия [11].

Развитие человеческого капитала является важным аспектом деятельности современных организаций. В различных восприятиях концепции менеджмента знаний он трактуется по-разному: в частности, в японской доктрине развития знаний человеческий капитал (по-прежнему выражающийся прежде всего через знания и навыки сотрудников) является динамически развивающейся структурой в составе организации, улучшение которой происходит в основном из-за постоянного обмена знаниями [12]. Такой подход направлен на поощрение коммуникации и передачи знаний. Американская концепция, в свою очередь, концентрируется на непосредственном управлении знаниями с помощью организационных и финансовых решений, стимулирующих развитие знания прежде всего внутри ограниченного круга изобретателей, которые передают вовне не столько знания, сколько результат интеллектуальной деятельности, что не всегда одно и то же [13].

В рамках данного исследования используются обе упомянутые выше концепции. Считается, что пополнение человеческого капитала в контексте знаний обеспечивается как путем передачи знаний от более опытных или знающих сотрудников к менее опытным или знающим, так и через генерацию нового знания усилиями одного сотрудника или ограниченной группы сотрудников. Терминологически такие процессы генерации знания можно называть экстенсивным и интенсивным соответ-

¹ Oxford English Dictionary. – URL: www.oed.com (дата обращения: 19.02.2024).

ственно: в первом случае индекс человеческого капитала организации будет повышаться путем распространения известного знания, а во втором – путем создания нового знания. Очевидно, что эти процессы должны быть связаны и согласованы, в противном случае рост человеческого капитала невозможен. Таким образом, в организации может происходить движение знаний, навыков и других форм интеллектуальных объектов в составе человеческого капитала, что обеспечит основу для формирования инновационного потенциала [14].

В отечественной науке активно развивается и изучается компетентностный подход. Прежде всего он применяется к образовательным процессам [15]. Развиваемые у обучающихся компетенции зафиксированы в образовательных стандартах, однако логически подход может применяться и к человеческому капиталу организаций – как минимум по причине того, что некоторые компетенции обозначаются как профессиональные и, соответственно, ориентированы на использование в профессиональной деятельности выпускников образовательных учреждений. Актуальные отечественные исследования также проводят связь между компетентностным подходом и человеческим капиталом, в том числе в инновационно ориентированных компаниях [16, 17]. Изучение компетенций также подходит для оценки человеческого капитала организаций. Особенность, позволяющая изолировать их от ранее описанных знаний и навыков, состоит в том, что компетенции невозможно передать другим сотрудникам – они являются суверенной характеристикой отдельного сотрудника. В модели человеческого капитала потребуется связать компетенции сотрудников и их знания для того, чтобы получить адекватную оценку влияния и передаваемых, и непередаваемых знаний на человеческий капитал организации.

При этом необходимо учитывать и другие аспекты человеческого капитала, связанные прежде всего со здоровьем сотрудников. Проблемы физического [18] и ментального [19] здоровья сотрудников активно исследуются в контексте их влияния на человеческий капитал. Важно при этом отметить, что учет конкретных факторов условий труда или профессиональных рисков для высокоуровневой исследовательской модели затруднен, поскольку угрозы физическому здоровью сотрудников могут существенно варьироваться от организации к организации.

Соответственно, при разработке модели роли человеческого капитала в инновационных проек-

тах необходимо будет сформировать отображение человеческого капитала сотрудников с учетом следующих основных компонентов:

- знаний, навыков и т. п., увеличивающих человеческий капитал путем передачи знаний одних сотрудников другим (назовём такие знания экстенсивными);

- знаний, навыков и т. п., увеличивающих человеческий капитал благодаря появлению и развитию среди ограниченного круга лиц или у конкретного человека, в том числе полученных извне экстенсивных знаний, навыков и т. п. (назовём такие знания интенсивными);

- здоровья и прочих факторов человеческого капитала, не относящихся к знанию, но доступных к формализации на уровне общей модели, не привязанной к какой-либо конкретной организации.

В современных исследованиях проводятся связи между исследовательскими проектами и человеческим капиталом [20]. Это позволяет подтвердить актуальность предлагаемого исследования.

1.2. Инновационные проекты

Проектная деятельность в современном предприятии является актуальной и распространенной практикой. Для ряда решаемых задач управление по принципам проектов оказывается более эффективным, чем традиционное операционное управление. Одним из контекстов, в которых принципы проектного управления находят применение, является инновационная деятельность, характеризующаяся традиционно высоким уровнем неопределенности и отсутствием строгих стандартов и регламентов, привлечением экспертных мнений и, в случае успеха, существенным влиянием на конкуренцию в отрасли [21]. Эти особенности инновационной деятельности связаны с тем, что инновационные проекты часто ориентируются на получение принципиально новых технологических, технических или организационно-правовых результатов, для которых отсутствуют общепринятые стандарты или распространенные лучшие практики. Соответственно, в таких условиях проектный подход, позволяющий добиваться уникальности и гибкости деятельности в рамках выполнения работ, оказывается уместен. В рамках настоящей статьи не приводятся уникальные определения инновационного проекта и не делается акцент на точном определении границ этого понятия. Предлагается считать инновационными проектами системы мероприятий, предусматривающие технико-экономическое, правовое и организа-



ционное обоснование использования результатов научной, научно-технической и изобретательской деятельности для создания принципиально новых (по функциям или по форме) продуктов, услуг и способов эксплуатации продукции либо организации принципиально новых процессов производства продуктов и услуг [22]. При рассмотрении термина выявляются некоторые особенности, которые необходимо учитывать при построении модели.

Выше уже была обозначена важность учета человеческого капитала при рассмотрении инновационно ориентированных компаний и, следовательно, выполняемых ими инновационных проектов [16]. Такой учет позволяет обосновать применение предлагаемой модели именно к инновационным проектам. Фактически это объясняется особенно высокой ролью человеческого капитала – выраженного прежде всего в потенциале генерации нового научного знания – в деятельности инновационных компаний в целом и при реализации инновационных проектов в частности [23]. Предполагается, что подобная характеристика инновационных проектов предъявит следующие требования к разрабатываемой модели:

- человеческий капитал должен оказывать влияние на систему инновационных проектов на всех этапах их реализации;
- каждый из этапов реализации инновационных проектов должен подразумевать вероятность срыва проекта ввиду влияния различных факторов, в том числе и факторов, связанных с человеческим капиталом организации (недостаток знаний, ошибки при разработке и т. д.);
- каждый проект должен оказывать влияние на человеческий капитал организации, пополняя запас знаний сотрудников.

Эти общие требования предположительно распространяются на весь спектр инновационных проектов, а потому подходят для верхнеуровневой имитационной модели. Для построения моделей, связанных с инновационной деятельностью конкретных организаций, потребуется уточнение перечисленных требований.

1.3. Имитационное моделирование

Во введении подробно описывались две часто применяемые парадигмы имитационного моделирования: системная динамика и агентное моделирование. Базовая модель в рамках работы выполняется в терминах системной динамики: это решение обусловлено абстрактным верхнеуровневым характером модели. Модель должна адаптировать-

ся к конкретным условиям отдельных отраслей и предприятий, но при этом отражать общие закономерности развития человеческого капитала при реализации инновационных проектов. В этом контексте агентное моделирование оказывается излишне детальным. Однако в качестве одной из перспектив разработки может быть принято гибридное моделирование, совмещающее системную динамику и агентный подход для уточнения некоторых системных взаимодействий.

Гибридное моделирование представляет собой обособленную парадигму в рамках имитационного моделирования. Гибридная модель совмещает в себе несколько отдельных базовых подходов к имитации, что обеспечивает покрытие практически неограниченного пространства моделируемых систем. При этом применяться этот метод должен только в том случае, когда достижение целей моделирования невозможно при применении какой-либо из базовых парадигм [3].

В зависимости от сочетания методов разнятся и возможности гибридной модели. Сочетание агентного подхода и моделирования в терминах системной динамики используется для описания систем, в которых некоторые глобальные подробно не детализированные закономерности (цены на рынках, крупные городские инфраструктуры, общие демографические закономерности) связываются с поведением отдельных индивидов или объектов, таких как организации и предприятия, отдельные муниципальные или государственные образования [24, 25]. Именно по причине взаимодействия глобальных факторов и конкретных агентов – персонала компании, работников отрасли, социальных групп – при рассмотрении вопросов роли человеческого капитала в реализации инновационных проектов такая комбинация подходов применима.

Таким образом, имитационное моделирование представляется адекватным инструментом решения поставленной проблемы и исследования системных взаимосвязей человеческого капитала в инновационных проектах. Ставятся две задачи:

- выполнить базовую модель на языке системной динамики;
- дополнить базовую модель агентным компонентом для уточнения динамики отдельных переменных, связанных с человеческим капиталом.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

2.1. Базовая модель в терминах системной динамики

Для верхнеуровневого абстрактного моделирования принимается упрощенное восприятие моде-

лируемой системы. В контексте системной динамики отдельные проекты не обладают уникальными чертами и обособленными значениями атрибутов, как, например, в дискретно-событийном моделировании, и выступают исключительно характеристиками запасов и потоков внутри модели.

В качестве базового шаблона реализации имитационной модели принимается модель структуры «Main Chain», представляющая собой цепочку запасов, соединенных промежуточными потоками и обычно используемая для визуализации производственных цепочек [26].

С учетом предъявленных к системе требований (влияние человеческого капитала на всех этапах реализации проекта, вероятность срыва проекта на всех этапах, влияние каждого реализованного проекта на человеческий капитал организации) модель дополняется многочисленными отдельными конвертерами (переменными) и потоками, выводящими проекты из системы до их завершения. Ключевыми выходными характеристиками системы являются принесенная прибыль и рост человеческого капитала по итогам успешной реализации инновационного проекта.

Базовая модель, а также ее дополнение агентным компонентом созданы в среде имитационного моделирования AnyLogic. Таким образом, модель приобретает вид, представленный на рис. 1.

Здесь квадратами со скругленными углами (например, «Запросы в обработке», «Проектирова-

ние» и т. п.) представлены запасы – объекты модели, в которых накапливаются агенты (в данном случае проекты). Широкие стрелки между ними («Темп подготовки ТЗ», «Темп разработки», «Отказ в проектировании» и т. п.) обозначают потоки перехода проектов из одного состояния проекта в другое – в рамках модели такие переходы для каждого конкретного проекта осуществляются мгновенно (т. е. проект описывается дискретным набором состояний – запасов). Круги («Время подготовки запроса», «Общая техническая готовность» и т. п.) обозначают основные факторы, влияющие на параметры переходов между состояниями проектов.

Все потоки в модели задаются сложными функциями, сочетающими влияние факторов, связанных с этим потоком. Большая часть функций, задающих переходы между основными запасами структуры «Main Chain», описывается функциями задержек первого порядка с ускорением, коррелирующим с интегральной оценкой человеческого капитала. Типовая формула для вычисления значений потока $f_1(t)$ такова:

$$f_1(t) = \theta(t) \frac{I(t)}{\tau}, \quad (1)$$

где $\theta(t)$ – интегральная (общая) оценка человеческого капитала в момент времени t ; $I(t)$ – значение предстоящего потока запаса в момент времени t ; τ – задержка.

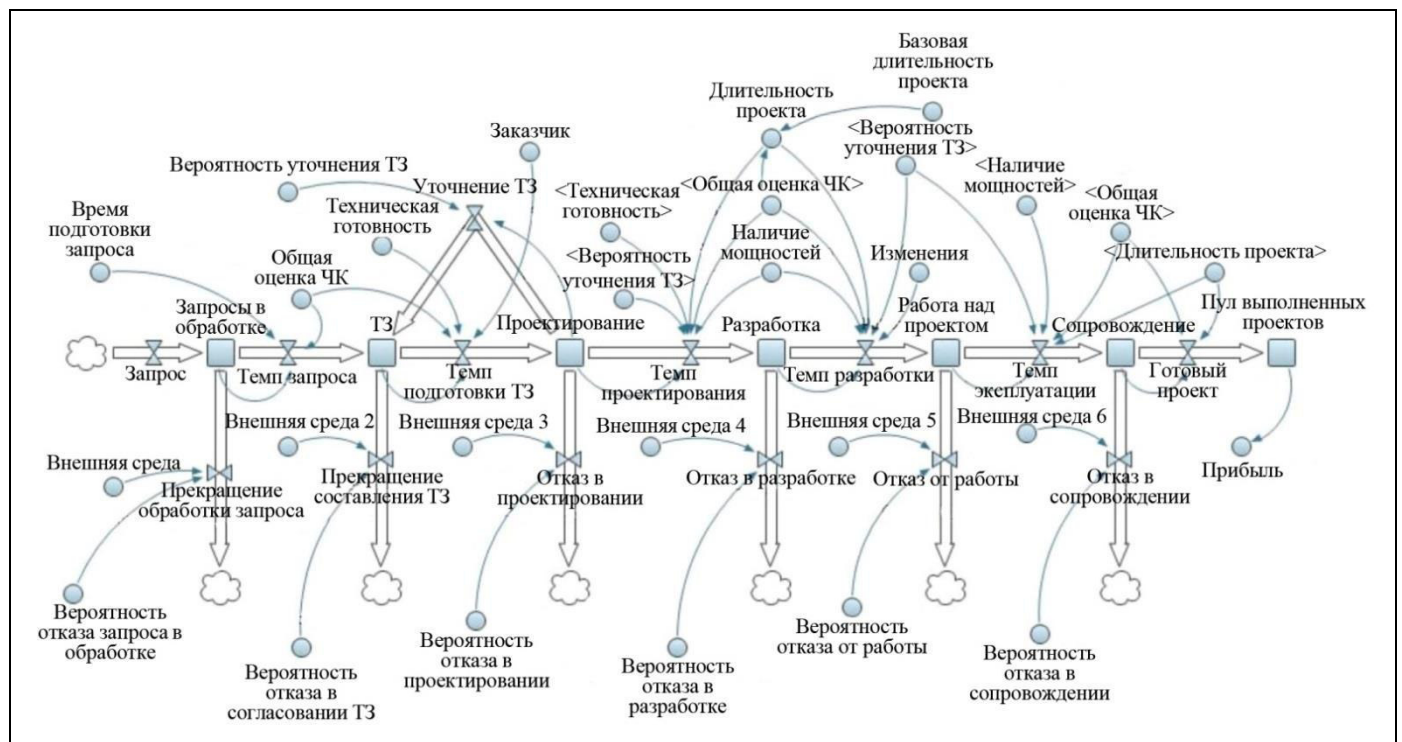


Рис. 1. Основной модуль базовой модели в терминах системной динамики

Формула (1) с естественными изменениями применима к темпу запроса, темпу подготовки технического задания (здесь к интегральной оценке человеческого капитала для ускорения потока добавляются значения технической готовности и оценки влияния заказчика – в качестве ускорителя принимается средняя величина), темпа проектирования, темпа разработки, темпа эксплуатации (влияние прочих факторов здесь аналогично описанному для подготовки технического задания) и потока «готовый проект».

Потоки, представляющие отказ в дальнейшей проработке модели по какой-либо из причин, моделируются по формуле

$$f_2(t) = \varepsilon p I(t),$$

где ε – интегральная оценка влияния факторов внешней среды (в том числе и вероятность отказа заказчика) на конкретном этапе реализации проекта; p – вероятность отказа от проработки проекта со стороны исполнителя на конкретном этапе реализации проекта.

Такая формула с различными значениями входных переменных применима для потоков прекращения обработки запроса, прекращения составления технического задания, отказа в проектиро-

вании, отказа в разработке, отказа от работы, отказа в сопровождении.

Для моделирования человеческого капитала в базовой модели требуется дополнительный компонент, который моделирует динамику человеческих знаний, навыков и неинтеллектуальных факторов, например здоровья. Для базовой модели в терминах системной динамики принимается возможным моделировать с помощью одного компонента имитационной модели весь человеческий капитал организации. Упомянутый компонент имеет вид, представленный на рис. 2.

Весь модуль на рис. 2 направлен на формирование единой интегральной оценки человеческого капитала, влияющей на этапы реализации инновационных проектов (см. рис. 1). На нем отражаются профессиональные и поведенческие компетенции (исключительно интенсивные факторы роста человеческого капитала), знания и навыки сотрудников (имеющие как интенсивный, так и экстенсивный характер), уровень здоровья сотрудников, а также ряд простых факторов, оцененных в настоящей модели в форме констант или постоянно изменяющихся динамических факторов (например, эмоциональное состояние сотрудников).

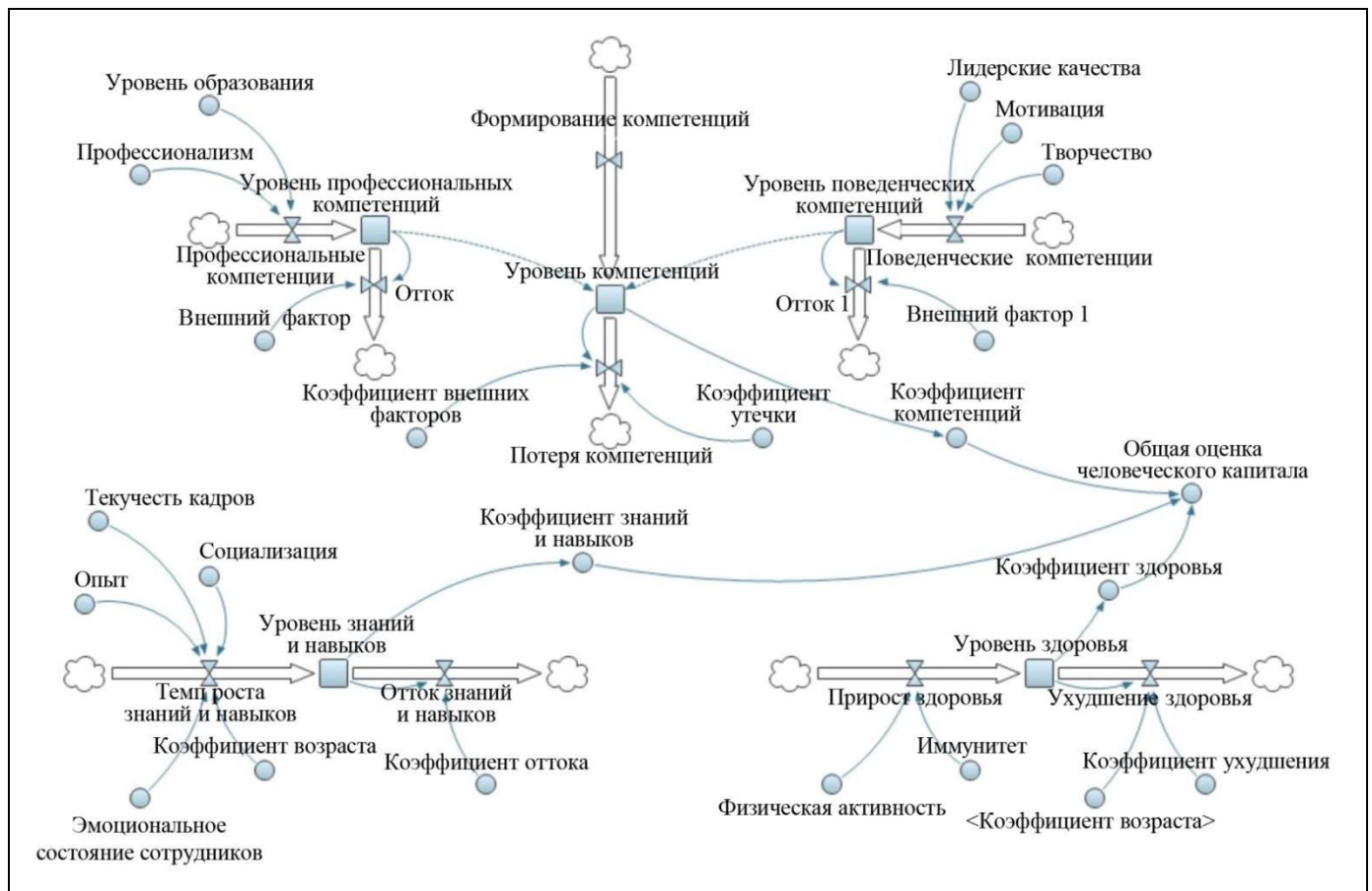


Рис. 2. Дополнительный модуль оценки человеческого капитала базовой модели в терминах системной динамики

Моделирование потоков для модуля оценки человеческого капитала во многом основано на калибровочных коэффициентах, привязанных к конкретной моделируемой системе. Так, например, прирост здоровья описывается формулой

$$f_3(t) = k_1 I + k_2 P,$$

где k_1 и k_2 ($k_1 + k_2 = 1$) – калибровочные коэффициенты; I – оценка иммунитета сотрудников организации; P – оценка физической активности сотрудников организации.

Для углубленных моделей влияния человеческого капитала такие оценки иммунитета и физической активности могут быть динамическими переменными, изменяющимися в соответствии с динамикой поведения и особенностей деятельности сотрудников, но в верхнеуровневой абстрактной модели такая детализация сочтена нецелесообразной.

Часть потоков этого модуля модели также описывается задержками первого порядка в исходном виде или с ускорителями (см. формулу (1)). Такими потоками являются оттоки поведенческих и профессиональных компетенций, отток знаний и ухудшение здоровья, потеря компетенций (принципиальное отличие от оттока связано с тем, что в потере компетенций моделируется утрата сотрудниками компетенций в связи с их неиспользованием, в то время как оттоки, в том числе и компетентностные, описывают уход сотрудников и связанное с этим снижение человеческого капитала).

Прочие входные потоки модели – темп роста знаний и навыков, темпы роста поведенческих и профессиональных компетенций, формирование компетенций сотрудников – моделируются как совокупная оценка позитивно влияющих на поток факторов, деленная на совокупную оценку негативно влияющих на поток факторов с калибровочными коэффициентами при необходимости.

Следующей задачей моделирования являлось дополнение модели агентным компонентом для уточнения динамики человеческого капитала в рамках системы.

2.2. Агентный компонент как дополнение к базовой модели

На рис. 3 представлен общий алгоритм поведения агента (человека в проектно-ориентированной системе) в различных моделируемых ситуациях в терминах нотации BPMN (Business Process Model and Notation).

Суть введения агентного компонента состоит в замене дополнительного модуля оценки человеческого капитала. Теперь интегральная оценка человеческого капитала будет представлять собой сум-

му оценок человеческого капитала, присущих каждому сотруднику. Такая логика тоже не является безусловно верной, поскольку не учитывает некоторые вероятные скрытые закономерности (например, скрытый оптимум числа сотрудников с определенным уровнем человеческого капитала), однако принята допустимой для абстрактной верхнеуровневой модели.

В разрабатываемом агентном дополнении основной модели в качестве агента принимается отдельный человек, сотрудник оцениваемой организации. Ему присущи те же компоненты и те же закономерности их изменения, что и в дополнительном модуле, но они оцениваются в приложении к отдельному человеку. При этом увеличение знаний и навыков в той части, в которой эти знания и навыки являются «экстенсивными», т. е. растущими путем распространения, а не генерации, задается получением соответствующих сообщений от других агентов.

Таким образом, в предлагаемом агентном дополняющем компоненте происходят следующие динамические изменения основных параметров агентов:

- При успешном завершении проектов возрастают знания и навыки набора задействованных (в базовом варианте – случайных) агентов; у этих агентов появляется возможность обмениваться полученными знаниями (обмен происходит с вероятностью, зависящей от уровня знаний и здоровья агента).

- При неудачном завершении проектов ухудшается здоровье набора задействованных (в базовом варианте – случайных) агентов (обусловлено психологическим напряжением из-за неудачной реализации).

- При отработке каждой единицы модельного времени теряется часть знаний и навыков всех сотрудников (обусловлено длительной стагнацией, которая нивелируется успешными проектами или генерацией знаний), вырастают компетенции всех сотрудников.

- При каждом новом этапе проекта (увеличении запаса каждого последовательного этапа реализации проектов) осуществляется генерация знаний у набора задействованных (в базовом варианте – случайных) агентов – с некоторой вероятностью они могут получить знания и навыки, в случае успеха появляется также возможность обмениваться сгенерированными знаниями (обмен происходит с вероятностью, зависящей от уровня знаний и здоровья агента).

- При получении агентом (в базовом варианте – случайным) обменного сообщения у него возрастают знания и навыки.

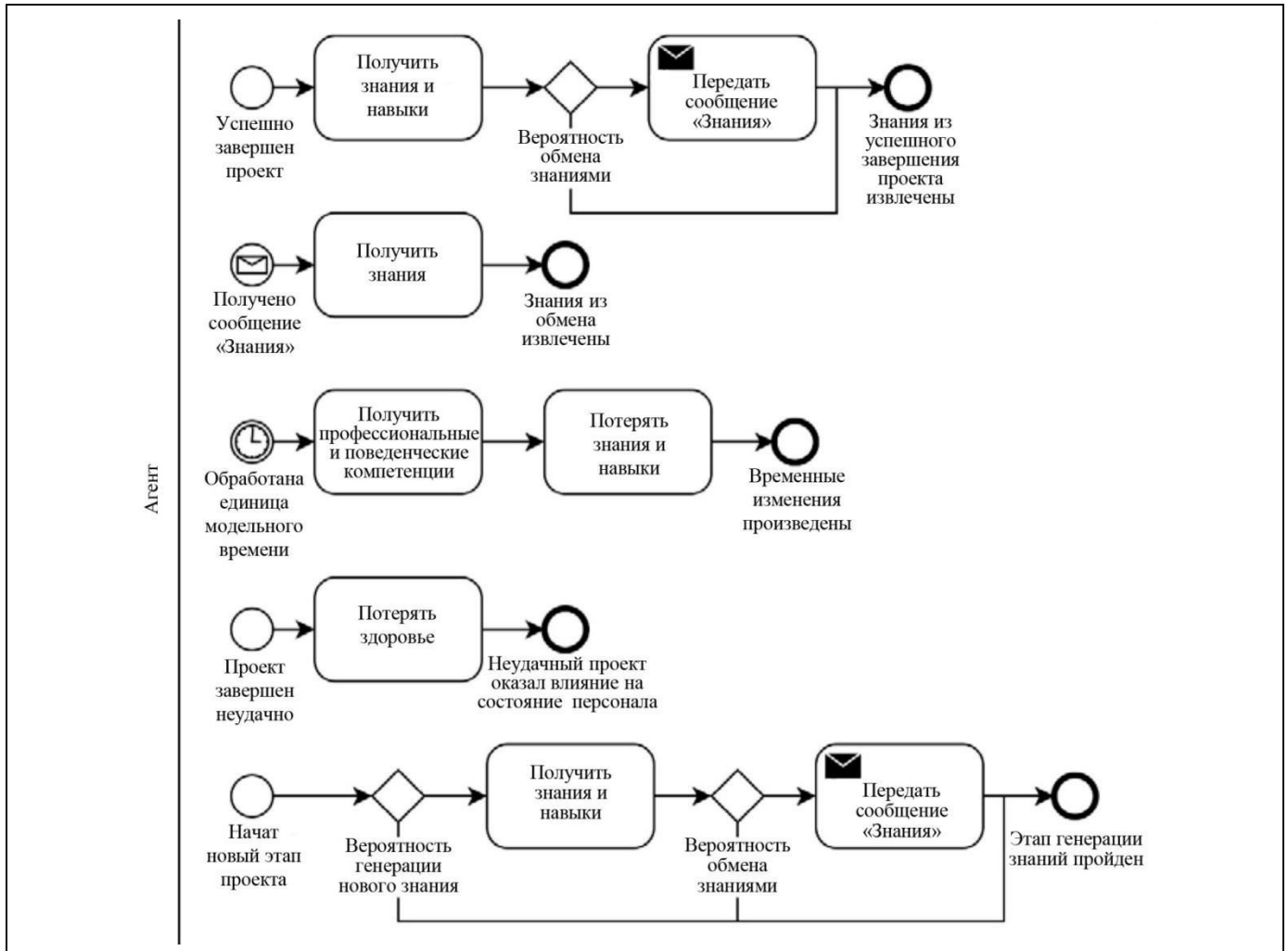


Рис. 3. Алгоритм поведения агента в терминах нотации BPMN

Также необходимо отметить, что за пределами алгоритма, представленного на рис. 3, происходит прием и увольнение сотрудников с определенной периодичностью. Такой поток задается дополнительным модулем системно-динамической модели (рис. 4). Вновь входящие в систему сотрудники имеют базовые значения всех характеристик (знания и навыки, профессиональные компетенции, поведенческие компетенции, здоровье), характеристики уходящих сотрудников теряются.

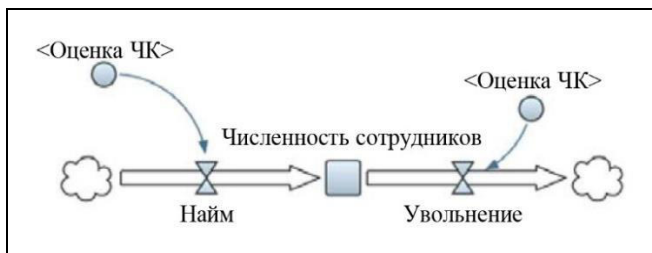


Рис. 4. Дополнительный модуль изменения численности персонала

На рис. 4 Оценка_ЧК – интегральная оценка человеческого капитала в системе. Такая оценка вычисляется на основе отдельных оценок человеческого капитала отдельных сотрудников по формуле

$$\theta(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \xi_{ij}}{N},$$

где ξ_{ij} – значение j -го критерия оценки человеческого капитала (знания и навыки, профессиональные компетенции, поведенческие компетенции, здоровье) для i -го сотрудника; N – количество сотрудников.

Реализованные диаграммы состояний для агентов в терминах AnyLogic, выполненные в соответствии с алгоритмом (см. рис. 3), представлены на рис. 5.

Представленные диаграммы состояний в совокупности (действующие не для отдельного агента,

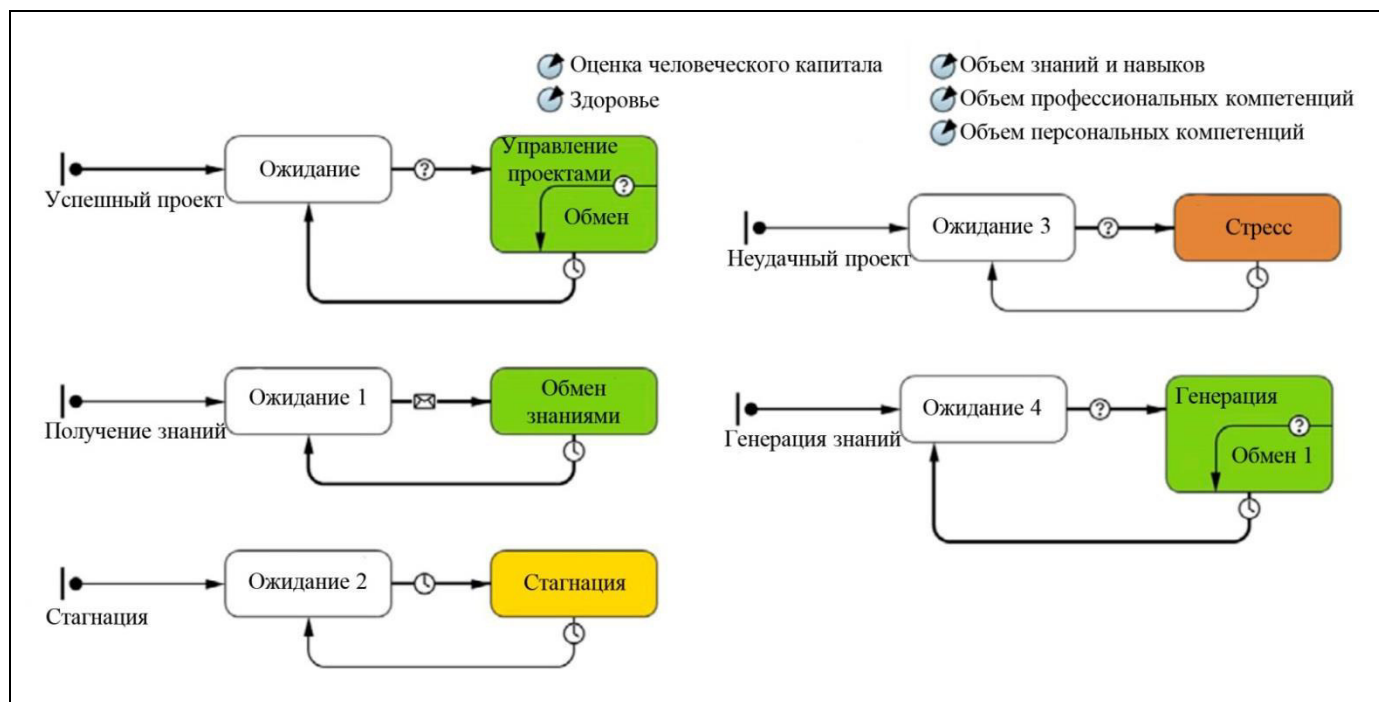


Рис. 5. Диаграммы состояний агентного компонента модели

а для всей популяции агентов) заменяют описанный ранее дополнительный модуль оценки человеческого капитала базовой модели в терминах системной динамики. Переходы в диаграммах состояний заданы условиями в связи с получением сообщений или состоянием системно-динамической модели.

2.3. Обсуждение основных особенностей модели

Модель представляет собой концептуальное отражение основных выявленных на основе анализа источников и опыта авторов исследования факторов взаимного влияния человеческого капитала проектно-ориентированной системы (фирмы, консорциума, проектной команды и т. п.) на эффективность выполняемых инновационных проектов. По причине концептуального характера модели необходимо сделать ряд замечаний о ее компонентах, которые могут быть подвергнуты пересмотру при применении модели на практике для оценки роли человеческого капитала в конкретных проектно-ориентированных системах:

- Может быть пересмотрен и изменен на верхнем уровне набор факторов, влияющих на параметры базовой модели динамики проектов (так, могут быть обоснованно в соответствии с целями моделирования исключены или заменены факторы здоровья, технической готовности предприятия, возраста и др.; модель может быть дополнена дру-

гими факторами в соответствии с требованиями к конкретному случаю ее применения).

- Основная структура базовой модели может быть усложнена в ходе калибровки модели – для лучшего соответствия конкретной проектно-ориентированной системе могут быть изменены порядки задержек, описывающих функции потоков, изменен набор факторов, влияющих на конкретный переход между состояниями, и т. д.

- Правила динамики человеческого капитала могут быть пересмотрены на верхнем уровне абстракции: может быть введено общее или частное изменение факторов человеческого капитала в результате различных модельных состояний (например, улучшение навыков отдельных агентов при неудачно реализованных проектах, дошедших до определенной стадии, и т. п.).

- Может быть изменено взаимное влияние факторов, в частности добавлено нелинейное влияние отдельных факторов на интегральные оценки (так, фактор здоровья в общей модели принят в качестве влияющего на интегральную оценку линейно, сообразно с другими факторами, что считается авторами корректным для систем разработки инновационных ИТ-проектов, однако для систем с риском тяжелых профессиональных заболеваний или требующих исключительно работы на местах без возможности перехода на удаленную занятость низкие значения фактора здоровья могут обнулять интегральную оценку человеческого капитала).



В текущем виде модель имеет ряд ограничений, обусловленных ее конструкцией. Так, модель не позволяет оценить уникальную динамику одного проекта или малой группы проектов, поэтому ее адекватность низка для систем с небольшим количеством проектных сущностей – модель рекомендуется к применению в крупных проектно-ориентированных структурах (фирмах, консорциумах, программных комитетах и т. п.). Кроме того, модель является верхнеуровневой абстракцией, а потому не позволяет обеспечить высокую адекватность при малом наборе эмпирических данных для валидации и калибровки модели. Дополнительным ограничением адекватности модели является то, что структура модели частично основана на опыте авторов, а потому универсальность предложенной концепции подлежит обсуждению: к некоторым проектно-ориентированным системам такая система может оказаться слабо применима, однако перечень таких систем на текущем этапе разработки модели является неопределенным. Перспективными направлениями дальнейших исследований, по мнению авторов, могут стать прежде всего универсализация концепции и рассмотрение возможностей применения предложенного инструмента к различным системам.

Следует отметить также преимущество модели по сравнению с другими инструментами учета фактора человеческого капитала в деятельности компаний. Известны применения агентного моделирования для обмена знаниями [27], а также агентные модели для изучения влияния отдельных факторов (например, степени взаимного доверия [28]) на передачу знаний внутри организации. Агентное моделирование в целом является достаточно распространенным инструментом для моделирования человеческого капитала организаций (что логично вытекает из его идеологии) [27–29], а потому перечисленные выше частные модели могут дополнять общую конструкцию описанной в работе гибридной модели. В рассмотренных работах-аналогах, впрочем, не вводятся концепции гибридных моделей, а также отсутствует ориентация на проектную деятельность, потому в контексте приложения модели к проектно-ориентированным они менее полезны. Вместе с тем формальное описание процессов, связанных с человеческим капиталом, в рассмотренных примерах моделей точнее и глубже, а потому интеграция с такими моделями может серьезно усилить предлагаемый инструмент. Существующие же аналоги, ориентированные на проектное управление (см., например, работу [30]), предлагают значительно менее конкретный подход к описанию жизненного цикла проекта, также концентрируясь прежде всего на

человеческом капитале. Таким образом, предложенный инструмент позволяет достичь большей адекватности моделирования в проектно-ориентированных системах, чем при использовании рассмотренных аналогов, однако имеет перспективы улучшения путем дополнения и уточнения компонентов модели, связанных с человеческим капиталом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена имитационная модель, отображающая роль человеческого капитала в реализации инновационных проектов.

В аналитической части работы рассмотрены основы концепций человеческого капитала, инновационных проектов и имитационного моделирования, сформулированы основные требования к создаваемой модели. В ходе реализации модель была создана в двух исполнениях: в виде базовой модели, полностью выполненной в терминах системной динамики, и в виде гибридной модели, дополненной агентным компонентом к базовому модулю, по-прежнему выполненному в терминах системной динамики. Модель валидирована по набору данных, предоставленному неназванной организацией, по двум временным рядам: пулу успешно реализованных проектов и прибыли от успешной реализации проектов, что подтверждает адекватность модели.

Модель является верхнеуровневой абстракцией, а потому может быть дополнена и уточнена для моделирования процессов конкретной отрасли или организации. Отображенные в модели закономерности и основные факторы человеческого капитала могут быть скорректированы при доработке и уточнении модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинцяк А.М., Болсуновская М.В., Бурлуцкая Ж.В., Петряева А.А. Укрупненная имитационная модель динамики туристической отрасли // Бизнес-информатика. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 53–67. [Gintciak, A.M., Bolsunovskaya, M.V., Burlutskaya, Z.V., Petryaeva, A.A., High-level simulation model of tourism industry dynamics // Business Informatics. – 2022. – Vol. 16, no. 3. – P. 53–67. (In Russian)]
2. Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Федяевская Д.Э. и др. Комплексное моделирование процессов нефтедобычи: аналитический обзор // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 2 (595). – С. 51–62. [Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., Fedyaevskaya, D.E., et al. Complex modeling of the oil production processes: Analytical review // Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEHK. – 2023. – No. 2 (595). – P. 51–62. (In Russian)]

3. Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В. и др. Возможности применения гибридного подхода в моделировании социально-экономических и социотехнических систем // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ социально-экономических процессов. – 2022. – № 3. – С. 73–86. [Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., Burlutskaya, Z.V., et al. The opportunities of using a hybrid approach for modeling socio-economic and sociotechnical systems // Proceedings of VSU. Series: Systems analysis and information technologies. – 2022. – No. 3. – P. 73–86. (In Russian)]
4. Borovkov, A.I., Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., et al. COVID-19 Spread Modeling Considering Vaccination and Re-Morbidity // International Journal of Technology. – 2022. – Vol. 13. – No. 7.
5. Forrester, J.W. World dynamics. – Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press, 1973. – 144 p.
6. Hansen, P., Liu, X., Morrison, G.M. Agent-based modelling and socio-technical energy transitions: A systematic literature review // Energy Research & Social Science. – 2019. – No. 49. – P. 41–52.
7. Utomo, D.S., Onggo, B.S., Eldridge, S. Applications of agent-based modelling and simulation in the agri-food supply chains // European Journal of Operational Research. – 2018. – No. 269 (3). – P. 794–805.
8. Goffin, K., Koners, U. Tacit Knowledge, Lessons Learnt, and New Product Development // Journal of Product Innovation Management. – 2011. – Vol. 28, iss. 2. – P. 300–318.
9. Goldin, C. Human Capital. In: Handbook of Cliometrics. Ed. By C. Diebolt, M. Hauptert. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. – 42 p.
10. Gareev, B.R. Strategical Financial Indicators Concerning the Interests of the Workers // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2014. – Vol. 150. – P. 142–147.
11. Senge, P.M. The Fifth Discipline: The Art & Practice of the Learning Organization. – Michigan: Doubleday Deckle Edge, 2006. – 424 p.
12. Bandera, C., Keshtkar, F., Bartolacci, M.R., et al. Knowledge management and the entrepreneur: Insights from Ikujiro Nonaka's Dynamic Knowledge Creation model (SECI) // International Journal of Innovation Studies. – 2017. – Vol. 1, no. 3. – P. 163–174.
13. Добренков В.И., Афонин Ю.А. Управление знаниями: лучший мировой опыт // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. – 2022. – Т. 18, № 3 (56). – С. 16–22. [Dobrenkov, V.I., Afonin, Y.A. Knowledge management: the best world experience // Sustainable innovative development: design and management. – 2022. – Vol. 18, no. 3 (56). – P. 16–22. (In Russian)]
14. Иванов И.Н., Орлова Л.В. Знания как основа формирования инновационного потенциала персонала организации // Вестник университета: Государственный университет управления. – 2023. – № 1. – С. 76–82. [Ivanov, I.N., Orlova, L.V. Knowledge as the basis for forming the innovative potential of the organization staff // Vestnik universiteta: State University of Management. – 2023. – No. 1. – P. 76–82 (In Russian)]
15. Цигулева О.В., Абакумова Н.Н., Поздеева С.И. Гуманитарные характеристики человеческого капитала в контексте компетентностного подхода к образованию // Язык и культура. – 2022. – № 57. – С. 292–307. [Tsiguleva, O.V., Abakumova, N.N., Pozdeeva, S.I. Human capital's humanitarian characteristics of a competent approach to education // Language and Culture. – 2022. – No. 57 – P. 292–307. (In Russian)]
16. Панферов В.П. Компетентностный подход в формировании человеческого капитала инновационно-ориентированной компании // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2018. – № 6 (144). – С. 120–123. [Panferov, V.P., Competence-based Approach to the Formation of Human Capital Innovation-oriented Company // Economics and Management: Scientific and Practical Journal. – 2018. – No. 6 (144). – P. 120–123. (In Russian)]
17. Карпова Т.П. Компетентностный подход к оценке человеческого капитала для инновационного развития организации // Современный менеджмент: проблемы и перспективы: Сб. науч. статей XVI международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 361–366. [Karpova, T.P. Competence-based approach to the assessment of human capital for the innovative development of the organization // Sb. nauch. statei XVI mezhduнародnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. – St. Petersburg, 2021. – P. 361–366. (In Russian)]
18. Iorember, P.T., Iormom, B., Jato, T.P., Abbas, J. Understanding the bearable link between ecology and health outcomes: The criticality of human capital development and energy use // Heliyon. – 2022. – Vol. 8, no. 12. – Art. no. e12611.
19. Richter, L.M., Ahun, M.N., Besharati, S., et al. Adolescent Mental Health Problems and Adult Human Capital: Findings from the South African Birth to Twenty Plus Cohort at 28 Years of Age // Journal of Adolescent Health. – 2021. – Vol. 69, no. 5. – P. 782–789.
20. Xu, J., Li, H. Managerial human capital and corporate R&D investment // Journal of Economic Behavior & Organization. – 2023. – Vol. 213. – P. 151–171.
21. Gudkov, P.G., Guseva, A.I., Accuracy of Expert Assessments in Evaluating Innovative Projects // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 190. – P. 284–291.
22. Туккель И.Л., Сурина А.В., Культин Н.Б. Управление инновационными проектами: учебник / под ред. И.Л. Туккеля. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с. [Tukkel', I.L., Surina, A.V., Kul'tin, N.B. Upravlenie innovatsionnymi proektami: uchebnik / pod red. I.L. Tukkelya. – SPb.: BKHV-Peterburg, 2011. – 416 s. (In Russian)]
23. Тугускина Г.Н., Тимохова К.А., Чубукова И.В. Роль человеческого капитала в инновационном развитии предприятия // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Экономические науки. – 2019. – № 1 (9). – С. 24–32. [Tuguskina, G.N., Timokhova, K.A., Chubukova, I.V. The role of human capital in the innovative development of an enterprise // University proceedings. Volga region. Economic sciences. – 2019. – No. 1 (9). – P. 24–32. (In Russian)]
24. Brailsford, S., Churilov, L., Dangerfield, B. Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making. – Chichester: John Wiley & Sons, 2014. – 342 p.
25. Barbosa, C., Azevedo, A., Hybrid Simulation for Complex Manufacturing Value-chain Environments // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 11. – P. 1404–1412.
26. Nuñez Rodríguez, J., Andrade Sosa, H.H., Villarreal Archila, S.M., Ortiz, A., System Dynamics Modeling in Additive Manufacturing Supply Chain Management // Processes. – 2021. – No. 9. – 982.



27. Wang, J., Gwebu, K., Shanker, M., Troutt, M.D. An application of agent-based simulation to knowledge sharing // Decision Support Systems. – 2009. – Vol. 46, iss. 2. – P. 532–541.
28. Li, H., Li, C., Wang, Z. An agent-based model for exploring the impacts of reciprocal trust on knowledge transfer within an organization // Journal of Business & Industrial Marketing. – 2021. – Vol. 36, no. 8. – P. 1486–1503.
29. Satoko, W. A Hybrid Model of Human Resource Management // Japanese Management for a Globalized World. – 2018. – P. 175–204.
30. Khatun, T., Hiekata, K. A Model-Based Hybrid System for Human Resource Allocation in Multi-Project Management // Transdisciplinarity and the Future of Engineering. – 2022. – P. 586–595.

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

*Поступила в редакцию 25.08.2023,
после доработки 20.02.2024.
Принята к публикации 03.04.2024.*

Бекетов Сальбек Мустафаевич – аналитик,
✉ salbek.beketov@spbpu.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>

Поспелов Капитон Николаевич – аналитик,
✉ kapiton.pospelov@spbpu.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-6160-8218>

Редько Сергей Георгиевич – д-р техн. наук,
✉ redko_sg@spbstu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4343-4154>

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

© 2024 г. Бекетов С. М., Поспелов К. Н., Редько С. Г.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

A HUMAN CAPITAL SIMULATION MODEL IN INNOVATION PROJECTS

S. M. Beketov*, K. N. Pospelov**, and S. G. Redko***

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

*✉ salbek.beketov@spbpu.com, **✉ kapiton.pospelov@spbpu.com, ***✉ redko_sg@spbstu.ru

Abstract. The main aspects of three concepts—human capital, innovation projects, and simulation modeling—are considered, and a simulation model is proposed to describe the role of human capital in innovation projects. This high-level abstraction model is intended to study the role of the social component in the organizational structure of an innovation project in a general context (at the level of an economic sector, an enterprise, or part of an enterprise). It is treated primarily as a tool for tracking the dynamics of projects considering the state of human capital of the system. The model consists of two main components, namely, a basic simulation model in system dynamics terms and an agent-based component of the model describing human capital dynamics. The model is a conceptual tool that requires calibration and refinement when being implemented in a particular organization.

Keywords: simulation modeling, system dynamics, agent-based approach, human capital, innovation projects.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, contract no. 075-03-2024-004 of January 17, 2024.

МОДЕЛЬ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВОСПРОИЗВОДСТВА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В. Б. Гусев

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

✉ gusvbr@ipu.ru

Аннотация. Рассмотрена модель синтеза управления системой воспроизводства, учитывающая синхронное изменение технологической матрицы в процессе ее реструктуризации. Такой тип моделей можно характеризовать как модели с комбинированными (прямыми и косвенными) управляющими связями. В случае наличия резерва производственных ресурсов процессы изменения управляющих параметров и преобразования технологических связей должны происходить одновременно. Получены инварианты соотношений между объемами затрат и выпусков многоотраслевой экономики. Это позволило модифицировать формализованное представление модели структурного управления системой воспроизводства. В результате линейную модель воспроизводства потребовалось заменить нелинейной. Приведены результаты численных расчетов для предложенной модели, полученные с использованием реальных данных многоотраслевой экономики. На основе этих результатов проведен сравнительный анализ полученной модели и исходной модели реструктуризации системы воспроизводства.

Ключевые слова: синтез структурного управления, нелинейная модель, система воспроизводства, преобразование технологической матрицы, оптимальная реструктуризация.

ВВЕДЕНИЕ

Модель технологического ядра воспроизводства, отражающая состояние многоотраслевой экономики на определенном этапе, может основываться на данных об использовании ресурсов и услуг [1]. Стандартная модель «затраты – выпуск» предполагает, что прямые затраты линейно зависят от объемов выпуска и цен. В таком предположении построен ряд моделей управления экономикой, в частности предложенных в работах [2, 3]. При малых изменениях управляющих параметров это предположение можно считать справедливым. Однако при конечных диапазонах изменения этих параметров предположение линейности некорректно, поскольку величины объемов и цен непосредственно влияют на оценку величин технологических коэффициентов для соответствующих отраслей.

Пусть стоимость объема выпуска i -й отрасли V_i многоотраслевой экономической системы, имеющей n отраслей, образует вектор $\mathbf{V}$. Объемы затрат и выпуска в стоимостном выражении также

зависят от цен P_i на соответствующие виды продукции. Изменение цен и объемов выпуска на этапе k задается векторами индексов цен $\mathbf{p}$ и индексов выпуска $\mathbf{v}$:

$$v_i^k = V_i^k / V_i^{k-1}, p_i^k = P_i^k / P_i^{k-1}, i = 1, \dots, n.$$

Обозначим $\mathbf{Z} = [Z_{ij}]$ матрицу объемов затрат ресурсов в процессе воспроизводства, $i, j = 1, \dots, n$, где j – номер отрасли, использующей в производстве ресурс номер i . Эта матрица позволяет определить коэффициенты a_{ij} , которые вычисляются по формуле

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

и образуют технологическую матрицу $\mathbf{A} = [a_{ij}]$, имеющую спектр (набор собственных значений) $\mathbf{S}$. Последний используется для определения свойств преобразований технологической матрицы и моделей устойчивого воспроизводства.

Воспользуемся определением [2] *продуктивности* экономической системы как отношения добавленной стоимости к промежуточным затратам



$\pi = Y/Z$, где Y – валовая добавленная стоимость (ВВП), Z – сумма промежуточных затрат по отраслям. Обозначим V валовой выпуск, тогда материалоемкость $a = Z/V$, $V = Y + Z$, отсюда для продуктивности справедливо соотношение $\pi = 1/a - 1$.

Целенаправленная реструктуризация технологического ядра направлена на увеличение его продуктивности. При построении моделей синтеза управления системой воспроизводства в качестве управляющих параметров i -й отрасли можно использовать объем выпуска V_i и цены P_i на продукцию.

Стандартная модель «затраты – выпуск» предполагает, что прямые затраты линейно зависят от объемов выпуска и цен. Однако это предположение некорректно. Действительно, в предположении линейности на каждом этапе управляющего воздействия коэффициенты a_{ij} предполагаются неизменными. Однако нужно учитывать, что с изменением управляющих параметров технологическая матрица A также будет изменяться от этапа к этапу.

В связи с этим технологическое ядро может подвергаться двум типам преобразований: без изменения спектра S (вращению) и с изменением спектра S (деформации).

При изменении индексов выпуска матрица A справа и слева умножается на диагональные матрицы D и D^{-1} с коэффициентами $D_{jj} = v_j$ и $D^{-1}_{jj} = 1/v_j$ соответственно. При изменении индексов цен матрица A справа и слева умножается на диагональные матрицы C и C^{-1} с коэффициентами $C_{jj} = p_j$ и $C^{-1}_{jj} = 1/p_j$ соответственно.

Если матрица A – шуровская ($\max|S| < 1$), справедливы следующие утверждения [3, 4].

• Если a – максимальное собственное число матрицы A , r – максимальное собственное число матрицы A^T , то система воспроизводства устойчива и в стабильном состоянии удовлетворяет уравнениям

$$av = Av,$$

$$rp = A^T p.$$

Устойчивость системы воспроизводства здесь обеспечивается устойчивостью матрицы A и понимается как сходимость итерационного процесса

$$x^{k+1} = A x^k \frac{\|x^k\|}{\|A x^k\|}, k = 0, 1, 2, \dots,$$

который можно интерпретировать как поэтапный процесс перехода к стабильному состоянию (в ин-

дексах выпуска и цен) или монотонному (магистральному) росту в абсолютных величинах.

• Преобразования, порождаемые матрицами D и C , имеют несколько инвариантов. Спектр S полученных после преобразования матриц остается неизменным. Эти преобразования можно назвать соответственно объемным и ценовым вращениями.

• Для каждого вектора индексов цен p имеется вектор индексов выпуска v , соответствующий устойчивому состоянию системы воспроизводства с максимальным собственным числом a технологической матрицы $D^{-1}AD$.

• Аналогично для каждого вектора индексов выпуска v имеется вектор индексов цен p , соответствующий устойчивому состоянию системы воспроизводства с максимальным собственным числом r технологической матрицы $C^{-1}AC$.

• Собственные числа устойчивого состояния a и r совпадают и не зависят от матриц преобразования D и C .

• Деформация технологического ядра может происходить при изменении матрицы промежуточных затрат $Z = [Z_{ij}]$, не являющейся мультипликативной, – например, при внедрении новой технологии или при изменении структуры конечного потребления.

Задача реструктуризации выпуска

Эта задача построена в терминах линейной модели Леонтьева [5]. Рассмотрим билинейную модель структурной оптимизации воспроизводства. Компоненты вектора затрат производств Z равны

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

Верхняя граница коэффициента прямых затрат в предположении зависимости коэффициентов материалоемкости от объемов выпуска определяется из соотношения

$$av_i \geq \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j.$$

Задача оптимизации структуры выпуска [2] имеет вид

$$\min_{a, V} a \quad (2)$$

при условии реализуемости оптимального решения

$$\theta \geq v_i \geq 1, \theta > 1.$$

План-прогноз развития экономики в объемных показателях рассчитывается следующим образом. Будем использовать критерий роста объема вы-

пуска $\gamma = 1/a$. Процесс расчета индикативной динамики объемных показателей, приводящих к максимуму этого критерия на этапе k , $k = 1, 2, \dots$, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \max_{\gamma, \mathbf{v}^k} \gamma, \\ \mathbf{v}^k \geq \gamma \mathbf{A}^k \mathbf{v}^k, \\ \mathbf{I} \leq \mathbf{v}^k \leq \theta \mathbf{I}, k = 1, 2, 3, \dots, \\ \mathbf{A}^{k+1} = (\mathbf{D}^k)^{-1} \mathbf{A}^k \mathbf{D}^k, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\mathbf{I}$ – вектор, составленный из единиц.

Проблема заключается в том, что технологическая матрица изменяется от итерации к итерации, в то время как внутри задачи (3) она считается неизменной. В пределе при малых допустимых интервалах изменения индексов выпуска это можно считать оправданным. Однако при конечных величинах размера этих интервалов решение становится не точным. Это потребовало модифицировать вид ограничений задачи (3).

Задача реструктуризации в стоимостном выражении

Объем выпуска равен $V_j p_j$, коэффициенты a_{ij} преобразуются в $a_{ij} p_i / p_j$.

Компоненты вектора затрат $\mathbf{R}$ на производство ресурсов равны

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

Верхняя граница коэффициента себестоимости c определяется из соотношения

$$c V_j p_j \leq \sum_{i=1}^n a_{ij} V_j p_i,$$

тогда задача оптимизации индексов цен на отдельном этапе цен имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \min_{c, p} c, \\ c p_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ji} p_j, \\ \eta \geq p_i \geq 1, \eta > 1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При переходе на следующий этап матрица $\mathbf{A}^k$ преобразуется в матрицу $(\mathbf{C}^k)^{-1} \mathbf{A}^k \mathbf{C}^k$. Задачи реструктуризации выпуска и реструктуризации цен целесообразно решать последовательно друг за другом, для того чтобы предельный уровень продуктивности достигал большего значения. Тогда

этапы для соответствующих задач нумеруются нечетными и четными числами соответственно.

1. МОДИФИЦИРОВАННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВОСПРОИЗВОДСТВА

Учет зависимости коэффициентов материалоемкости a_{ij} от управляющих параметров приводит к необходимости перехода к нелинейной модели. В предположении непрерывной зависимости коэффициентов материалоемкости от объемов выпуска в установившемся режиме синхронного изменения промежуточных затрат и вращения технологических связей получим инварианты вращения.

Утверждение 1. При синхронном преобразовании прямого (объемного) вращения технологической матрицы и линейном изменении промежуточных затрат отношения между затратами и выпуском постоянны и имеют вид

$$Z_{ki} = c_{ki} V_i^2 / V_k,$$

где $c_{ki} = Z_{ki}^0 V_k^0 / (V_i^0)^2 = a_{ki} V_k^0 / V_i^0$, Z_{ki}^0 , Z_i^0 , V_i^0 – начальные значения компонент затрат и выпуска, или

$$Z_{ki} = (a_{ki} V_k^0 / V_i^0) V_i^0 / V_k.$$

Доказательство этого утверждения приведено в приложении.

Следствие 1. Рассмотрим применение инварианта для $Z_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij}$.

В результате синхронного вращения технологической матрицы получим

$$\begin{aligned} Z_i &= (V_i^0 / V_i) \sum_{j=1}^n Z_{ij}^0 V_j^2 / (V_j^0)^2 = \\ &= (1 / V_i) \sum_{j=1}^n a_{ij} (V_i^0 / V_j^0) V_j^2 = (1 / V_i) \sum_{j=1}^n c_{ij} V_j^2, \end{aligned}$$

где $c_{ij} = a_{ij} (V_i^0 / V_j^0)$. ♦

Следствие 2. В результате объемного вращения при векторе выпуска $\mathbf{V}$ отраслевые коэффициенты a_{ij} преобразуются в $a_{ij} V_i / V_j = Z_{ij} / V_j$, где $i, j = 1, \dots, n$. При этом условие воспроизводства имеет вид

$$a V_i^2 \geq \sum_{j=1}^n c_{ij} V_j^2.$$



Для индексов выпуска $v_i = V_i / V_i^0$

$$Z_i = 1 / v_i \sum_{j=1}^n Z_{ij}^0 v_j^0;$$

условие воспроизводства имеет вид

$$av_i^2 \geq \sum_{j=1}^n b_{ij} v_j^2,$$

где агрегаты $b_{ij} = Z_{ij}^0 / V_i^0 = a_{ij} V_j^0 / V_i^0$. ♦

Таким образом, с учетом обозначения $(\mathbf{v})^2$ вектора с квадратами коэффициентов v_i^2 , новая формулировка задачи реструктуризации принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \max_{\gamma, \mathbf{v}^i} \gamma, \\ (\mathbf{v}^k)^2 \geq \gamma \mathbf{B}^k (\mathbf{v}^k)^2, \\ \mathbf{I} \leq \mathbf{v}^k \leq \theta \mathbf{I}, k = 1, 3, 5, \dots, \\ D_{ij}^k = \begin{cases} v_i^k, & j = i, \\ 0, & j \neq i, \end{cases} \\ \mathbf{B}^{k+1} = (\mathbf{D}^k)^{-1} \mathbf{B}^k \mathbf{D}^k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следствие 3. При $\theta \rightarrow 1$ решение задачи (5) непрерывно зависит от параметра θ , а следовательно, переходит в решение задачи (3).

Действительно, при $\theta = 1$ решением в обоих случаях будет единичный вектор $\mathbf{I}$. В силу ограничения

$$\mathbf{I} \leq \mathbf{v}^k \leq \theta \mathbf{I}, k = 1, 3, 5, \dots,$$

вектор $\mathbf{v}^k$ тем ближе к $\mathbf{I}$, чем меньше θ . При этом оптимум целевой функции в обоих случаях одинаков и равен

$$\gamma = 1 / \min_i \sum_j b_{ij}.$$

При $\theta \rightarrow 1$ значения v_k также стремятся к единице. ♦

Для задачи реструктуризации в стоимостном выражении справедливо следующее утверждение, аналогичное утверждению 1.

Утверждение 2. При синхронном преобразовании ценового вращения технологической матрицы соотношения между затратами и выпуском имеют вид

$$R_{ki} = d_{ki} P_i^2 / P_k,$$

где $d_{ki} = R_{ki}^0 P_k^0 / (P_i^0)^2 = a_{ki} P_k^0 / P_i^0$, R_{ki}^0 , R_i^0 , P_i^0 – начальные значения компонент затрат и цен.

Ввиду симметрии постановки задач (2), (5) доказательство этого утверждения проходит по той же схеме, что доказательство утверждения 1. Точно также формулируются и доказываются следствия, симметричные следствиям 1–3.

Следствие 4. Рассмотрим применение инварианта для $R_i = \sum_{j=1}^n R_{ij}$.

$$R_i = \sum_{j=1}^n R_{ij}.$$

В результате синхронного вращения технологической матрицы получим

$$\begin{aligned} R_i &= (P_i^0 / P_i) \sum_{j=1}^n R_{ij}^0 P_j^2 / (P_j^0)^2 = \\ &= (1 / P_i) \sum_{j=1}^n a_{ij} (P_i^0 / P_j^0) P_j^2 = (1 / P_i) \sum_{j=1}^n c_{ij} P_j^2, \end{aligned}$$

где $c_{ij} = a_{ij} (P_i^0 / P_j^0)$. ♦

Следствие 5. В результате объемного вращения при векторе выпуска $\mathbf{V}$ отраслевые коэффициенты преобразуются в $a_{ij} P_i / P_j$, где $i, j = 1, \dots, n$. При этом условие воспроизводства имеет вид

$$c P_i^2 \geq \sum_{j=1}^n c_{ji} P_j^2.$$

Для индексов выпуска $p_i = P_i / P_i^0$ условие воспроизводства имеет вид

$$c p_i^2 \geq \sum_{j=1}^n b_{ij} p_j^2,$$

где агрегаты $b_{ij} = a_{ij} P_j^0 / P_i^0$. ♦

Рассмотрим процесс расчета индикативной динамики объемных и ценовых показателей, приводящих к совместному балансу выпусков и цен. Будем использовать критерии роста рентабельности $r = 1 / c$:

$$\left. \begin{aligned} \max_{r, \mathbf{p}} r, \\ (\mathbf{p}^m)^2 \geq r \mathbf{B}^{mT} (\mathbf{p}^m)^2, \\ \mathbf{I} \leq \mathbf{p}^m \leq \eta \mathbf{I}, m = 2, 4, 6, \dots, \\ C_{ij}^m = \begin{cases} p_i^m, & j = i, \\ 0, & j \neq i, \end{cases} \\ \mathbf{B}^{m+1} = (\mathbf{C}^m)^{-1} \mathbf{B}^m \mathbf{C}^m. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решения задач (4), (6) выполняются последовательно при заданной верхней границе θ , $\eta > 1$ для рентабельности r и индекса промежуточного потребления a . На такте k могут быть получены объемы индикативных выпусков и цен в абсолютных единицах.

Следствие 6. При $\eta \rightarrow 1$ решение задачи (6) непрерывно зависит от параметра η , а следовательно, переходит в решение задачи (4).

Действительно, при $\eta = 1$ решением в обоих случаях будет единичный вектор $\mathbf{I}$. В силу ограничения

$$\mathbf{I} \leq \mathbf{p}^k \leq \eta \mathbf{I}, \quad k = 1, 3, 5, \dots,$$

вектор $\mathbf{p}^k$ тем ближе к $\mathbf{I}$, чем меньше η . При этом оптимум целевой функции в обоих случаях одинаков и равен

$$r = 1 / \min_i \sum_j b_{ji}.$$

При $\eta \rightarrow 1$ значения p_i также стремятся к единице. ♦

Процедуры расчета решений нелинейных задач (5), (6) могут быть построены путем модификации метода проекции градиента [3]. При этом все изменения состоят в замене индексов границ θ , η на θ^2 , η^2 , а также в замене операции присвоения результирующих векторов $\mathbf{v}$, $\mathbf{p}$ на векторы $((\mathbf{v})^2)^{1/2}$, $((\mathbf{p})^2)^{1/2}$.

Как и для линейной модели, согласованная пара цен и объемов выпуска ведет себя подобным образом, поскольку индексы рентабельности r и промежуточного потребления a в этом случае одинаковы для всех отраслей, что в перспективе приводит к равномерному развитию экономической системы (так называемый магистральный эффект [6]). Однако, как и для линейной модели, на начальных этапах ликвидации диспропорций отраслевые показатели изменяются весьма неравномерно.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения индикативного плана, учитывающего совместное изменение объема выпуска и цен, решается серия задач оптимизации при ограничении допустимого изменения индексов в за-

данных границах. Границы изменения индексов цен определяются из требований допустимой инфляции или дефляции. Выбор единицы в качестве нижней границы индексов означает, что для отраслей в плане предусмотрено не уменьшение выпуска и цен.

Рассмотрим пример совместного планирования объемов выпуска и цен. Ниже показаны результаты расчетов. При расчетах величины v_i интерпретируются как индексы объемов выпуска или выполняемых услуг, а p_i как индексы цен. Ограничения на них в предположении не убывания соответственно имеют вид

$$v_i(t) \geq 1, \quad p_i(t) \geq 1, \quad i = 1, \dots, n.$$

Для данных по многоотраслевой экономике РФ за 2020 г. [1] были получены кривые индикативной динамики индексов выпуска и цен, приводящие через определенное число шагов к сбалансированной структуре, что соответствует магистральному эффекту для оптимизационных моделей экономики [6].

Вычислительный процесс реструктуризации автоматически формирует три группы отраслей: отрасли: с ростом выпуска (инвестируемые), с ростом цен (инвестирующие), и с постоянными выпуском и ценами на продукцию (нейтральные). Согласно изложенному в работе [7], для реализации инвестиций в отрасли с растущим выпуском может быть предложен механизм акцизных сборов для отраслей с растущими ценами.

Всего в использованном списке ОКВЭД содержится 60 отраслей. У инвестируемых отраслей индексы выпуска больше единицы, у инвестирующих отраслей индексы цен больше единицы. Для получения численного результата применялся модифицированный программный пакет решения задач билинейного программирования и преобразований технологических матриц. Схема взаимодействия отраслей представлена на рис. 1.

План рассчитывается при ограничениях на изменение индексов выпуска в интервале $[1; 1,01]$ (рис. 2) и цен в интервале $[1; 1,01]$ (рис. 3).

Графики на рис. 2, 3 мало отличаются друг от друга и подтверждают заключения следствий 3, 5.

При увеличении допустимых границ изменения управляющих параметров различие между графиками динамики их оптимальных значений для линейной и самосогласованной нелинейной модели становится больше (рис. 4, 5).

1. Продукция горнодобывающих производств
2. Продукты пищевые, напитки, изделия табачные
3. Кокс и нефтепродукты
4. Средства транспортные и оборудование, прочие
5. Сооружения и строительные работы
6. Услуги по оптовой торговле, кроме оптовой торговли автотранспортными средствами и мотоциклами
7. Услуги по розничной торговле, кроме розничной торговли автотранспортными средствами и мотоциклами
8. Услуги, связанные с недвижимым имуществом
9. Услуги в сфере государственного управления и обеспечения военной безопасности; услуги по обязательному социальному обеспечению
10. Услуги в области здравоохранения

1. Текстиль и изделия текстильные, одежда, кожа и изделия из кожи
2. Древесина и изделия из дерева и пробки, кроме мебели; изделия из соломки и материалов для плетения
3. Услуги печатные и услуги по копированию звуко- и видеозаписей, а также программных средств
4. Средства лекарственные и материалы, применяемые в медицинских целях
5. Продукты минеральные неметаллические прочие
6. Оборудование электрическое
7. Средства транспортные и оборудование, прочие
8. Мебель, изделия готовые прочие
9. Услуги по водоотведению; шлам сточных вод; услуги по сбору, обработке и удалению отходов; услуги по утилизации отходов; услуги по рекультивации и прочие услуги по утилизации отходов
10. Услуги водного транспорта
11. Услуги воздушного и космического транспорта
12. Услуги издательские
13. Услуги по производству кинофильмов, видеофильмов и телевизионных программ, звукозаписей и изданию музыкальных записей; услуги в области теле- и радиовещания
14. Услуги телекоммуникационные
15. Услуги туристических агентств, туроператоров и прочие услуги по бронированию и сопутствующие им услуги
16. Услуги общественных организаций

37

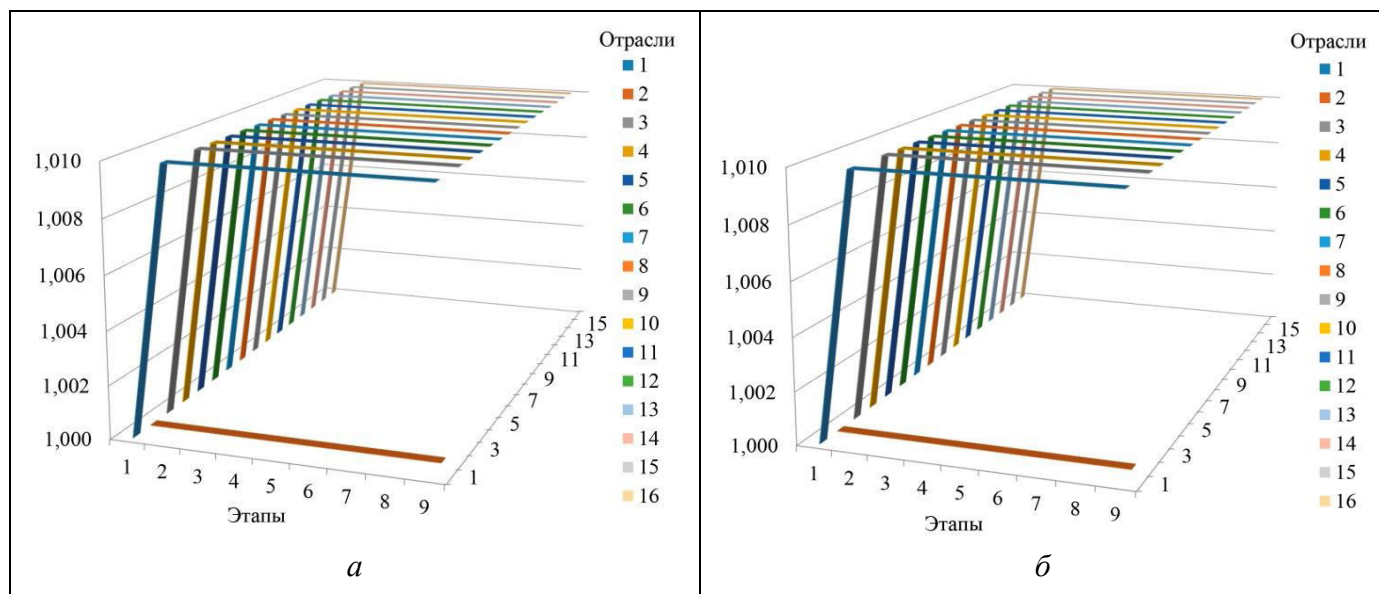


Рис. 3. Динамика индексов цен с диапазоном изменения $[1; 1,01]$: a – линейная модель; b – нелинейная модель

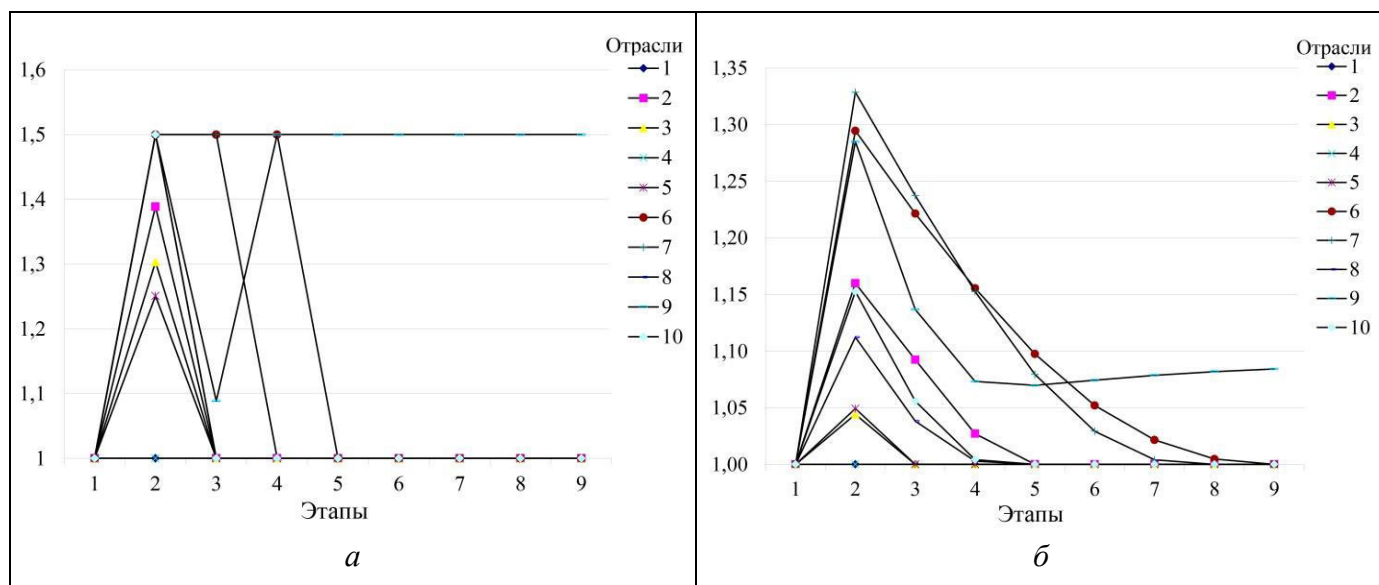


Рис. 4. Динамика индексов выпуска с допустимым диапазоном изменения $[1; 1,5]$: a – линейная модель; b – нелинейная модель

Максимальные различия оптимальных индексов выпуска для линейной и нелинейной модели наблюдаются на начальных этапах реструктуризации.

Оптимальные индексы цен для нелинейной модели убывают медленнее, чем для линейной модели. Таким образом, качественно результаты расчетов аналогичны, однако чем больше интервал изменения параметров управления, тем больше погрешность результатов вычислений для линейной модели.

Динамика продуктивности для линейной и не-

линейной модели различается – для нелинейной модели она ниже. Однако предельный уровень для нелинейной модели несколько выше (рис. 6).

Из приведенных рисунков видно, что для обеих моделей цены росли в тех отраслях, где план выпуска не увеличивался и, с учетом роста выпуска в других (инвестируемых) отраслях, относительно уменьшался. Это напоминает эффект рыночного регулирования цен. Однако масштабы роста цен здесь определяются исходя из роста продуктивности системы воспроизводства вместо критерия максимума отраслевой прибыли.

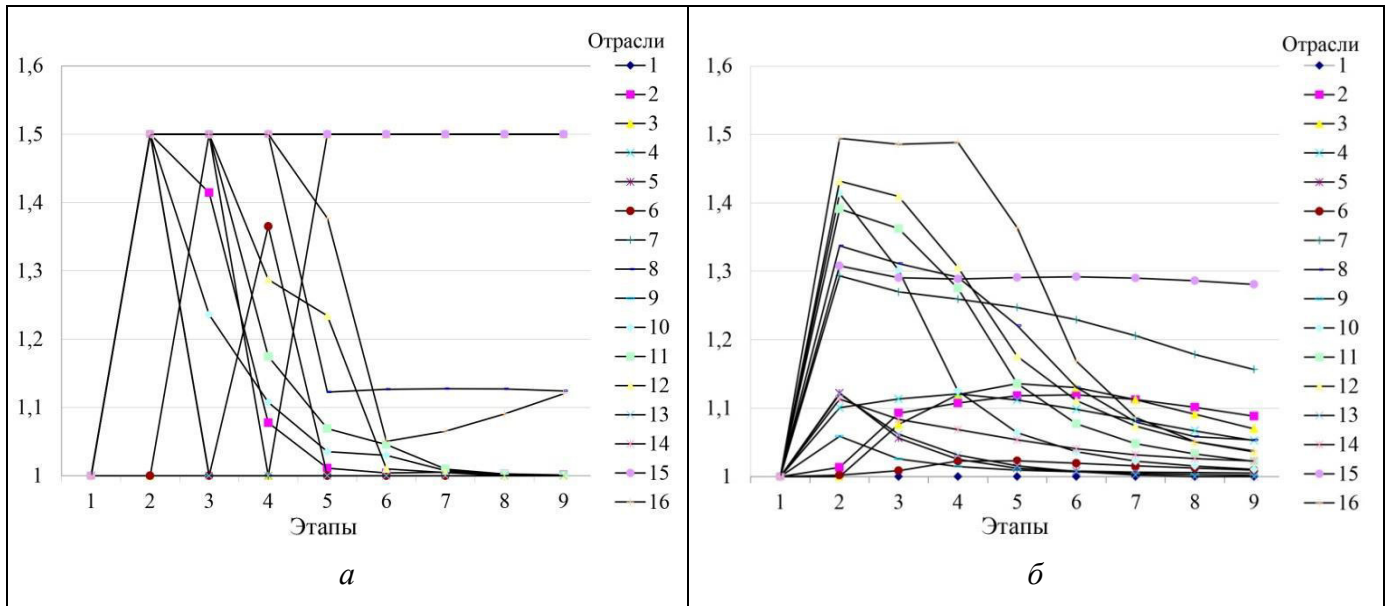


Рис. 5. Динамика индексов цен с допустимым диапазоном изменения [1; 1,5]: а – линейная модель; б – нелинейная модель

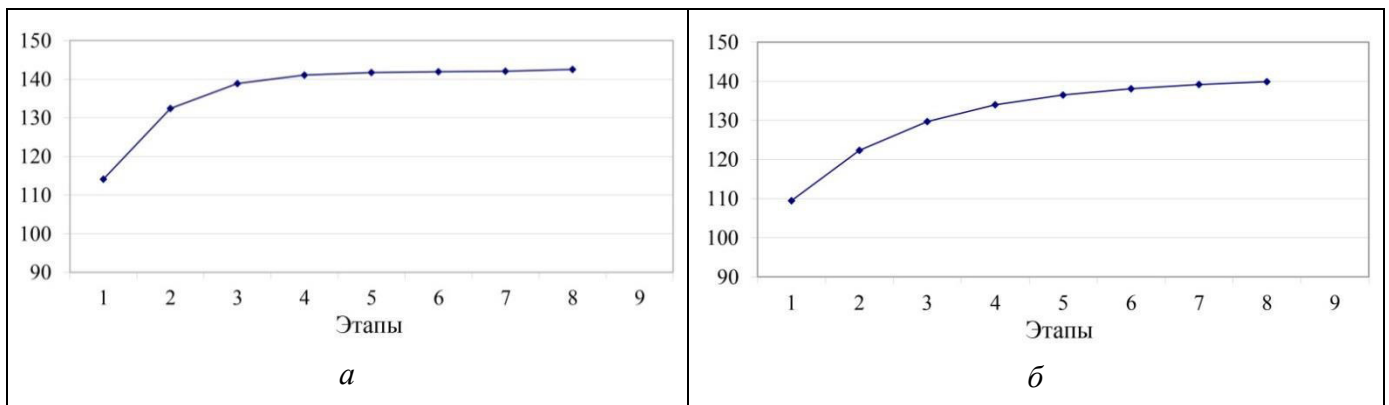


Рис. 6. Динамика продуктивности: а – линейная модель; б – нелинейная модель

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимость разработки самосогласованной модели с синтезом управления для процесса воспроизводства обусловлена тем, что при сохранении структуры исходной линейной модели ее структурные параметры также зависят от управляющих переменных. Такой тип моделей можно характеризовать как модели с прямыми и косвенными управляющими связями. В результате поиск оптимального решения становится искаженным и несет неточность. Величина искажения прямо зависит от размера допустимого интервала изменения управляющих переменных. Один путь решения этой проблемы заключается в применении ограничений на изменение управляющих параметров с малым допустимым интервалом. Путем пе-

рехода к самосогласованной нелинейной модели удалось избавиться от этого эффекта при любых размерах допустимого интервала. Результаты расчетов, полученные на реальных данных многоотраслевой экономики РФ, подтвердили теоретические выводы, а также эффективность разработанных вычислительных процедур.

Представленные в работе результаты могут повысить адекватность применяемых в экономической теории моделей [8], что, по мнению автора, разумно учитывать в практике стратегического планирования и стандартах национального счетоводства [9].

Разработанная самосогласованная модель может найти применение в ряде областей, таких как анализ процессов охраны окружающей среды [10], сельского хозяйства [11], территориального развития [12].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения 1.

Будем считать, что технологическая матрица A приведена к виду, позволяющему работать с индексами выпуска путем преобразования $D^{-1}AD$, где D - диагональная матрица с компонентами V_i на диагонали. Обозначим v_i индекс цен на продукцию i :

$$v_i = 1 + \Delta V_i / V_i.$$

Тогда

$$Z_{ki} + \Delta Z_{ki} = a_{ki}(1 + \Delta V_i / V_i) / (1 + \Delta V_k / V_k) \times (\Delta V_i + V_i) \quad k, \quad i = 1, \dots, n.$$

Если $\Delta V_i = 0$, то

$$\begin{aligned} \partial Z_{ki} / \partial V_k &= -Z_{ki} / V_k, \\ \partial \ln Z_{ki} &= -\partial \ln V_k, \\ Z_{ki} V_k &= V_k^0 Z_{ki}^0. \end{aligned}$$

Если $\Delta V_k = 0$, то

$$\begin{aligned} \partial Z_{ki} / \partial V_i &= 2Z_{ki} / V_i, \\ \partial \ln Z_{ki} &= \partial \ln V_i, \\ Z_{ki} / V_i^2 &= Z_{ki}^0 / (V_i^0)^2. \end{aligned}$$

Таким образом, в результате вращения технологического ядра получим

$$Z_{ki} = (b_{ki} / V_k)(d_{ki}(V_i)^2),$$

где

$$b_{ki} = V_k^0 Z_{ki}^0, \quad d_{ki} = Z_{ki}^0 / (V_i^0)^2,$$

или

$$Z_{ki} = (Z_{ki}^0 V_k^0 / (V_k^0)^2) V_i^2 / V_k = c_{ki} V_i^2 / V_k.$$

Инвариант равен

$$c_{ki} = Z_{ki}^0 V_k^0 / (V_i^0)^2 = a_{ki} (V_k^0 / V_i^0).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Таблицы ресурсов и использования товаров и услуг Российской Федерации за 2020 год. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/tri-2020.xlsx> (дата обращения 26.12.2022 г.). [Tablicy resursov i ispol'zovaniya tovarov i uslug Rossijskoj Federacii za 2020. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/tri-2020.xlsx> (accessed December 26, 2022). (In Russian)]
2. Гусев В.Б. Экстремальные характеристики модели технологического ядра крупномасштабной экономической системы // Проблемы управления. – 2021. – № 6. – С. 30–39. [Gusev, V.B. The Technological Core Model of a Large-Scale Economic System: Optimal Characteristics // Control Sciences. – 2021. – No. 6. – P. 25–33.]
3. Гусев В.Б. Бинарная модель управления реструктуризацией технологического ядра экономики // Проблемы управления. – 2022. – № 6. – С. 14–25. [Gusev, V.B. A Strategic Management Model for Restructuring the Technological Core of an Economy // Control Sciences. – 2022. – No. 6. – P. 11–20.]

4. 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)]
5. Леонтьев В.В. Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика. – М.: Политиздат, 1990. [Leontief, W. Essays in Economics. Theories, Theorizing, Facts, and Policies. – New York: Transaction Books, 1985. – 424 p.]
6. Dorfman, R., Samuelson, P.A., Solow, R.M. Linear Programming and Economic Analysis. – New York: Dorfman Publications, Inc., 1958. – 525 p.
7. Гусев В.Б. Метод планирования реструктуризации и перехода к экономическому росту в условиях санкций // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 11. – С. 84–87. – DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_84. [Gusev, V.B. A Method of Planning the Restructuring and Transition to Economic Growth in the Face of Sanctions // Mathematical Methods in Technologies and Technics. – 2022. – No. 11. – P. 84–87. – DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_84. (In Russian)]
8. Veduta, E.N., Dzhakubova, T.N. Economic Science and Economic-Mathematical Modeling / Mathematical Modeling in Economy. – 2017. – No. 3-4. – P. 10–22.
9. Ведута Е.Н. Международный стандарт национального счетоводства // Стандарты и качество. – 2019. – № 5 (983). – С. 46–51. [Veduta, E.N. The International Standard on National Accounting // Standarty i kachestvo. – 2019. – No. 5 (983). – P. 46–51. (In Russian)]
10. Perla, J.M., Guida, A.J., Díaz-Márquez, A.M. Urban Metabolism of Human Settlements in Small Island-Protected Environments // Environmental and Sustainability Indicators – 2023. – Vol. 21, no. 6. – Art. no. 100324. – DOI: 10.1016/j.indic.2023.100324.
11. Alemu, A.E. Determinants of Smallholders' Preference to Hybrids – Prospect for Upgrading to High-Value Food Chains // J. Agribus. Rural Dev. – 2016. – No. 3(41). – P. 1–11. – DOI: 10.17306/JARD.2016.50.
12. Olarte, S., Díaz-Márquez, A. Social Determinants, Urban Planning, and Covid-19 Response: Evidence From Quito, Ecuador // Urban Planning. – 2023. – No. 8. – P. 281–291. – DOI: 10.17645/up.v8i2.6189.

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

Поступила в редакцию 22.12.2023,
после доработки 06.03.2024.
Принята к публикации 03.04.2024.

Гусев Владислав Борисович – канд. физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ gusvbr@ipu.ru.
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6382-7441>

© 2024 г. Гусев В. Б.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.



A COMBINED MANAGEMENT MODEL FOR RESTRUCTURING A REPRODUCTION SYSTEM

V. B. Gusev

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

✉ gusvbr@ipu.ru

Abstract. This paper considers a management model for a reproduction system with the synchronous change of the technological matrix during its restructuring. Such models can be characterized as models with combined (direct and indirect) control links. In the case of production resource reserves, the processes of changing control parameters and transforming technological links should be simultaneous. Invariants are obtained for the relationship between the volume of inputs and outputs of a multi-sector (diversified) economy. As a result, the formalized representation of the structural management model of a reproduction system is modified, and the linear reproduction model is replaced by a nonlinear one. The results of numerical calculations using this model and the real data of a diversified economy are presented. Based on the results, the obtained model is compared with the original restructuring model of a reproduction system.

Keywords: structural management, nonlinear model, reproduction system, transformation of the technological matrix, optimal restructuring process.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ИСАНД) В ОБЛАСТИ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Д. А. Губанов*, О. П. Кузнецов**, Е. А. Курако***, Д. В. Лемтюжникова****,
Д. А. Новиков*****, А. Г. Чхартшвили*****

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

****МАИ (национальный исследовательский университет), г. Москва

*✉ dmitry.a.g@gmail.com, **✉ olpkuz@yandex.ru, ***✉ kea@ipu.ru, ****✉ darabbt@gmail.com,
*****✉ novikov@ipu.ru, *****✉ sandro_ch@mail.ru

Аннотация. Представлено описание подходов, лежащих в основе разрабатываемой в ИПУ РАН Информационной системы анализа научной деятельности (ИСАНД) в области теории управления. Описана онтология ИСАНД, ориентированная на представление и сбор знаний в области теории управления: как научного знания (онтология теории управления), так и знаний, связанных с научной деятельностью агентов в данной области (организаций, журналов, конференций и отдельных исследователей). Дана схема построенной на основе онтологии архитектуры ИСАНД как сложного программного комплекса, обеспечивающего сбор, хранение и анализ публикаций и их метаданных, которые поступают из внешних источников. Описан алгоритм построения тематических профилей научных объектов (публикаций, ученых, организаций, журналов, конференций), описаны осуществляемые при помощи ИСАНД процессы обработки текстов и возможности сетевого анализа. Описаны основные возможности использования ИСАНД.

Ключевые слова: анализ научной деятельности, теория управления, информационная система, классификация, онтология, тематический профиль, тематическое пространство, термин, обработка текстов, анализ сетей.

ВВЕДЕНИЕ

Бурный рост числа научных публикаций, продолжающийся в течение последних десятилетий, породил спрос на разработку компьютерных систем, автоматизирующих работу с большими массивами публикаций. Любая такая система должна содержать базу публикаций и, соответственно, средства пополнения и сопровождения этой базы. Однако состав аналитических инструментов работы с публикациями в разных системах различен и определяется целями, которые ставят перед собой создатели таких систем. Хорошо известны базы Web of Science, Scopus, РИНЦ, Google Scholar, ResearchGate, OpenAlex и др., главная цель которых – анализ цитируемости публикаций, на основе которого вычисляются наукометрические оценки пуб-

ликаций и их авторов (индекс Хирша), а также научных журналов (импакт-фактор).

Более сложными и менее исследованными являются задачи анализа содержания научных текстов. Систем такого рода гораздо меньше. Можно отметить американскую систему Semantic Scholar (www.semanticscholar.org), специализирующуюся на компьютерных науках и медицине, а также разработку НИУ ВШЭ iFORA (<https://issek.hse.ru/ifora>), которая, впрочем, работает не только с научными публикациями, но и с патентами, рыночной аналитикой и др.

Разрабатываемая в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) Информационная система анализа научной деятельности (ИСАНД), тестовая версия которой доступна по адресу <https://isand.ipu.ru>, представляет



собой систему, ориентированную на анализ содержания научных публикаций по теории управления. База публикаций системы содержит массивы публикаций сотрудников ИПУ РАН с 2005 г., статьи журналов «Проблемы управления» за 2003–2023 гг., «Advances in Systems Science and Applications» (ASSA) за 2017–2020, 2022–2023 гг. и др., доклады конференций «Управление большими системами» за 2009 г., 2011–2018, 2021–2023 гг., «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD) за 2007–2023 гг. и др.; в дальнейшем предполагается как существенное расширение этой базы за счет ретроспективной информации из других источников, так и регулярное ее пополнение и поддержание в актуальном состоянии.

В основе большинства задач, связанных с анализом содержания научных текстов, лежит позиционирование текстов в *тематическом пространстве*. Традиционные методы структурирования тематического пространства – *универсальные классификаторы* типа УДК [1], международного классификатора OECD [2], классификатора Российского научного фонда [3], ГРНТИ [4] и др. – не вполне соответствуют задачам, решаемым системой, по двум причинам. Первая причина – универсальность, достоинства которой оборачиваются недостатком: слишком крупным членением научных направлений и, соответственно, слишком слабой дифференциацией разделов этих направлений. Вторая причина – одномерность, связанная со строгим соблюдением таксономического принципа: каждый объект классификации должен характеризоваться ровно одной вершиной дерева классификатора. Это требование, во-первых, затрудняет классификацию междисциплинарных работ, а во-вторых, не дает возможности описать тот факт, что, например, два специалиста, работающих в одной и той же области, но использующих разный математический аппарат, по существу, имеют разные компетенции, которые в тематическом пространстве должны быть позиционированы по-разному. Поэтому *классификатор ИСАНД*, разработанный в системе ИСАНД, является многомерным и основан на современных принципах построения онтологий. В его основе лежит предложенная в работе [5] трехмерная онтология наук об управлении. Подробное описание классификатора ИСАНД содержится в § 4.

Наличие классификатора, структурирующего тематическое пространство, позволяет характеризовать в терминах этого пространства основные *объекты* научной деятельности: публикации, научных сотрудников (исследователей), научные

журналы, научные и научно-образовательные учреждения, научные конференции. Эти характеристики называются *профилями*, которым посвящен раздел «Тематические профили научных объектов». На основе построенных профилей в системе ИСАНД решаются конкретные задачи анализа, связанные с указанными объектами научной деятельности. Например, исследователя интересует поиск публикаций по заданной тематике; руководству учреждения может понадобиться поиск специалистов с указанными компетенциями, редакции научного журнала или организаторам конференции требуется компетентный рецензент для данного научного текста и т. д. Примеры таких задач приведены в § 6.

Отдельные разделы статьи посвящены описанию *архитектуры* системы ИСАНД, а также интеллектуальным *методам анализа текстов и сетей*, возникающих на базе объектов ИСАНД.

1. РАЗРАБОТКА ОНТОЛОГИИ ИСАНД

Онтология – формальная спецификация согласованного описания (концептуализации) предметной области (по Т. Груберу [6, 7]), разрабатываемая группой экспертов и интерпретируемая как машиной, так и человеком. Иными словами, онтология представляет собой формализованное описание согласованных экспертами понятий в определенной предметной области, разработанное для однозначного понимания как людьми, так и машинами. Web Ontology Language (OWL) [8, 9] – язык, предложенный консорциумом World Wide Web Consortium (W3C), который служит практическим средством для создания конкретных структурированных онтологий, позволяющих формализовать знания в некоторой предметной области с использованием классов, отношений, индивидов и логических ограничений. Онтологии OWL упрощают обмен информацией (как между людьми, так и между программными агентами), обеспечивают возможность повторного использования знаний, поддерживают вывод новых знаний и являются основой для построения баз знаний информационных систем, основанных на знаниях.

Разработка предметно-ориентированной OWL-онтологии в рассматриваемом случае включает в себя следующие этапы:

1. Анализ требований и сценариев использования информационной системы.

2. Создание основных классов и их атрибутов, отношений между классами, определение логических ограничений на классы и свойства.

3. Формализация в рамках выбранного языка OWL.

4. Валидация и тестирование онтологии.

5. Развертывание и интеграция онтологии.

6. Поддержка и обновление онтологии.

Разработка онтологии ИСАНД (как и непосредственно информационной системы) мотивирована запросами следующих потенциальных пользователей (*агентов*):

- *исследователи*,
- *редакции научных журналов и организаторы научных конференций*,
- *руководители научных и образовательных организаций, подразделений и коллективов*,
- *организаторы науки*.

Исследователям важна содержательная поддержка их научной работы, в том числе анализ актуальных научных направлений, изучение ключевых понятий и идентификация влиятельных агентов (исследователей, журналов, конференций, организаций) и научных публикаций.

Редакции журналов и организаторы конференций стремятся обеспечить соответствие представленных материалов журналу либо конференции, найти квалифицированных рецензентов и потенциальных участников конференции.

Руководители заинтересованы в поиске новых сотрудников и участников проектов, в анализе актуальности научных направлений внутри научной или образовательной организации.

Для организаторов науки актуальны вопросы, связанные с организационными структурами (организации, подразделения, научные коллективы и исследователи), с прогнозом и оценкой перспективности направлений научных исследований и эффективности деятельности агентов.

Таким образом, онтология ИСАНД ориентирована на представление и сбор знаний в области теории управления: как *научного знания* (онтология теории управления), так и знаний, связанных с *научной деятельностью* агентов в данной области (организаций, журналов, конференций и отдельных исследователей).

Рассмотрим онтологию научного знания и онтологию научной деятельности в теории управления.

1.1. Онтология научного знания (онтология теории управления)

Онтология научного знания предназначена для систематизации и классификации знаний в области теории управления. Предлагаемый классификатор (см. описание в работе [10]) является «системой

координат» тематического пространства, позволяющей реализовать взгляд на совокупность научных направлений с определенной точки зрения, а также отразить возможную многоотнесенность научного документа или многообразие компетенций ученого. Характеристикой объекта в этом пространстве является вектор, называемый профилем (см. § 3). Отметим, что этот классификатор частично отражен в публикации [11] (см. также работу [12]) и учитывает более ранние публикации по терминологии теории управления [13–15].

Онтология научного знания ИСАНД представляет собой существенно расширенную версию онтологии теории управления, предложенной в работе [5]. Она имеет четырехуровневую структуру, уровни которой (кроме нижнего) представляют собой дерево. Уровни нумеруются числами от 0 до 3. Нулевой уровень содержит четыре фиксированных вершины «Общенаучная проблематика», «Математический аппарат», «Предметная область», «Сфера применения». Предполагается, что при возможных расширениях онтологии этот уровень не изменяется. Он отражает не конкретные темы теории управления, а различные аспекты научных исследований: математический аппарат, используемый в исследовании (теорию игр, теорию вероятностей, ...), предметную область, т. е. некоторую прикладную теорию (теорию автоматического управления, анализ данных, теорию управления в организационных системах, ...) и конкретную сферу применения (подвижные объекты, производство, энергетику, финансы, медицину, ...). Вершины нулевого уровня назовем *метафакторами*.

Каждая из вершин нулевого уровня является корнем тематического поддерева, раскрывающего ее содержание. Например, поддерево «Математический аппарат» содержит вершину «Теория игр» (первый уровень) и детализирующие ее вершины второго уровня: «Теория некооперативных игр» и др. Соответственно, поддерево «Предметная область» среди прочих содержит вершину «Теория управления в организационных системах» и детализирующие ее вершины второго уровня, напри

мер, «Механизмы планирования», а поддерево «Сфера применения» содержит вершины «Энергетика» (первый уровень) и «Атомная энергетика» (второй уровень). Каждый фактор нижнего (второго) уровня характеризуется фиксированным набором терминов.

Классификатор построен экспертами ИПУ РАН для теории управления, на данный момент он включает в себя четыре фактора нулевого уровня,

53 фактора первого уровня, 161 фактор второго уровня, более трех тысяч терминов (см. https://www.ipu.ru/sites/default/files/page_file/ClassifierCS.xlsx). Фрагмент графа классификатора приведен на рис. 1.

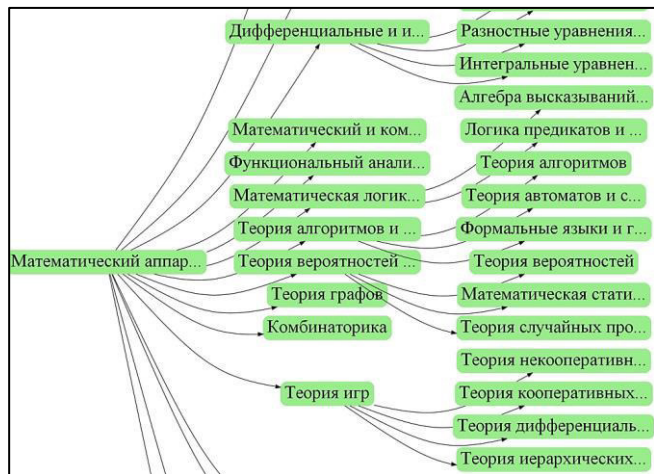


Рис. 1. Фрагмент графа классификатора

Ключевым терминам теории управления (около 1000 терминов) были даны определения и описания, в которых были поставлены гиперссылки на другие термины данной системы понятий – см.

работы [11, 12] и <https://www.ipu.ru/education/glossary>.

1.2. Онтология научной деятельности

Онтология научной деятельности предназначена для описания агентов (организаций, сообществ, персон) и результатов их действий. Текущая версия онтологии включает в общей сложности 45 классов в таксономии (например, «Публикация»), 23 объектных свойства (например, «влияет на»), 37 простых свойств (например, «название»).

Онтология включает в себя девять классов верхнего уровня, в том числе классы «Агент», «Действие», «Результат», «Категория», «Роль» и «Профиль». На рис. 2 показана небольшая часть онтологии с основными классами и связями верхнего уровня (более полная версия – см. https://www.ipu.ru/sites/default/files/page_file/isand_ra_ontology.pdf). Класс «Агент» моделирует индивидуальные и коллективные сущности (организация, подразделение, научный коллектив и т. д.). Эти сущности выполняют действия (класс «Действие»), производя те или иные результаты (класс «Результат»). Подклассами класса «Агент» являются «Индивид» («Персона» и «Программный агент»), «Организация», «Сообщество»,

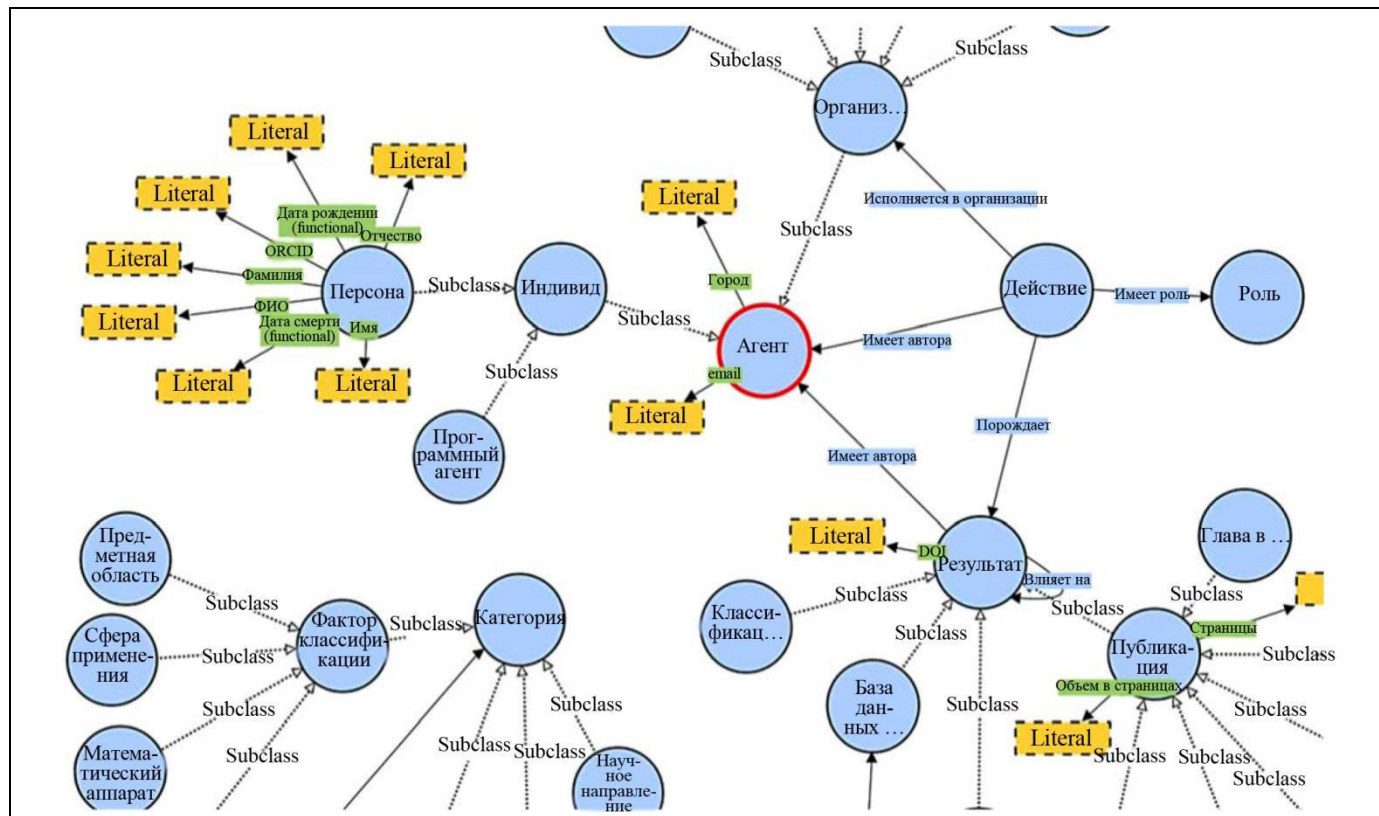


Рис. 2. Основные классы онтологии научной деятельности

«Научный Коллектив» и т. д. Класс «Организация» участвует в различных отношениях с другими типами сущностей, в частности класс связан через отношение «является Членом» с классом «Персона». Класс «Категория» позволяет тематически классифицировать другие сущности онтологии (например, результаты действий).

В целом классы в онтологии и связи между ними соответствуют методологии научной деятельности (см. монографию [16]).

1.3. Онтологии ИСАНД и разработка информационной системы

Онтологии являются основой базы знаний ИСАНД, реализованной в виде RDF-хранилища (*Resource Description Framework*). RDF – это стандарт W3C для описания метаданных ресурсов в сети интернет, позволяющий интегрировать и управлять данными из различных источников. Хранилище поддерживает обработку запросов на языке SPARQL, созданном специально для работы с RDF-данными и обеспечивающем гибкое управление семантикой и метаданными. Веб-приложения, использующие такое хранилище, могут легко адаптироваться к изменениям онтологической модели. Описание структуры данных и сами данные о конкретных экземплярах могут быть извлечены из хранилища одинаково эффективно. Эта база знаний занимает центральное место в архитектуре ИСАНД, описание которой приведено в следующем параграфе.

2. АРХИТЕКТУРА ИСАНД

ИСАНД представляет собой сложный программный комплекс, обеспечивающий сбор, хранение и анализ публикаций и их метаданных, которые поступают из внешних источников.

Система работает с двумя внешними потоками информации. Первый поток – это загрузка из источников данных, таких как журналы, конференции, издательства и электронные библиотеки. Они предоставляют свою базу публикаций для загрузки в ИСАНД. В зависимости от возможностей источника получение данных может быть как разовым, так и регулярным. Второй поток – это взаимодействие пользователей с системой. Они могут добавлять и корректировать данные о своих публикациях, а также получать результаты поиска и анализа информации. Для этого предоставляются соответствующие методы сайта. Кроме того, предоставля-

ется возможность воспользоваться электронными сервисами для получения данных для своих информационных систем.

Архитектура системы является многоуровневой и использует шаблон Request–Response для организации взаимодействия между компонентами. Основные подсистемы и связи между ними представлены на рис 3.

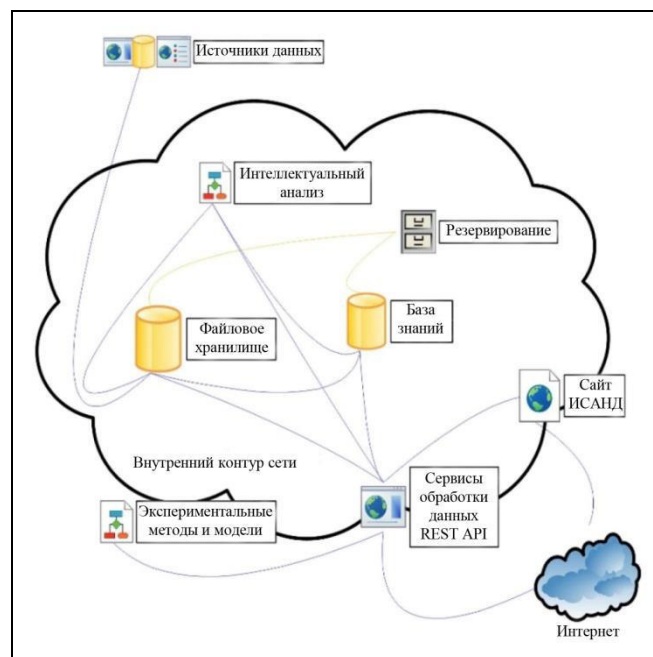


Рис. 3. Архитектура ИСАНД

В рамках внутреннего контура ИСАНД (см. рис. 3) можно выделить несколько основных подсистем:

- файловое хранилище и подсистема загрузки данных,
- база знаний,
- подсистема интеллектуального анализа информации,
- подсистема экспериментальных методов и моделей,
- подсистема резервирования,
- сервисы обработки данных,
- сайт ИСАНД.

Все файлы публикаций или файлы с метаданной о публикациях, в том числе и сборные архивы, поступают в подсистему загрузки данных, где они сохраняются в своем исходном виде и копируются в блок структурированных данных, где каждая публикация индексируется и хранится отдельно. В случае архива они автоматически разбираются на отдельные файлы. Публикации из блока



структурированных данных доступны остальным частям системы только для чтения.

Для каждого файла подсистема загрузки применяет методы из блока интеллектуального анализа информации, которые проверяют его целостность, язык и кодировку, а затем сегментируют публикацию на отдельные блоки. Такие методы можно назвать первичными. Из важных сегментов публикации можно отметить следующие: название, ключевые слова, авторы и библиографические ссылки. Дополнительно первичные методы анализа определяют состав и количество терминов из используемой онтологии научного знания (см. п. 1.1). Результаты работы данных методов сохраняются в структурированном блоке и также доступны остальным компонентам системы. Необходимо добавить, что ИСАНД – развивающаяся система, в которой эволюционируют модели анализа информации и происходит уточнение онтологии научного знания в части терминов и факторов классификации. После таких изменений первичные методы анализа системы будут выполнены повторно для всего структурированного архива.

Следует отметить, что часть источников данных предоставляет информацию не в виде файла с текстом публикации, а уже в сегментированном виде. Так как форматов данных много и представленные сегменты в них различны, то применяется другая часть первичных методов, которая для универсальности последующей обработки преобразует их в единый внутренний формат.

База знаний (БЗ) хранит информацию в графовом виде согласно модели представления данных RDF. Для определения сущностей и отношений между ними в БЗ используются онтологии научного знания и научной деятельности (см. пп. 1.1 и 1.2 соответственно). Для пополнения информации в БЗ используются результаты первичных методов обработки, расположенные в файловом хранилище во внутреннем формате. Обеспечивающее обновление базы ПО регулярно обращается в подсистему файлового хранилища и получает список новых поступлений. Так как данные поступают из разных источников, то периодически возникает ситуация, когда появляются дубликаты статей, загруженных ранее. Перед загрузкой происходит комплексная проверка идентичности поступающих сущностей уже существующим в БЗ, но точное сопоставление не может быть выполнено автоматически. Происходит это из-за неполноты получаемых данных. Если рассмотреть сущность «Персона», то ее экземпляры нельзя сопоставить только по фамилии,

имени и отчеству, требуется дополнительная информация, например, электронная почта или идентификаторы внешних систем (в том числе ORCID iD, Scopus Author ID, ResearcherID). Часто дополнительной информации о «Персоне» в публикациях нет или она противоречива, поэтому в результате загрузки возникают дублирующие записи об одной и той же сущности. В связи с этими проблемами БЗ построена так, что все поступающие данные хранятся с учетом источника их поступления. В то же время одной из задач методов анализа информации является выявление дубликатов и объединение сущностей.

Подсистема анализа информации является ядром функционирования системы ИСАНД и помимо первичной загрузки и выявления дубликатов реализует вычисление тематических профилей (см. § 3), интеллектуальную обработку данных (см. § 4) и интеллектуальный анализ сетей (см. § 5). Реализован данный блок в виде сервисов, располагающихся на нескольких серверах.

Одной из важных задач ИСАНД является предоставление исследователям возможности реализовать свои новые модели и методы. Для этого существует специальный блок – подсистема экспериментальных методов и моделей. Данный блок имеет доступ к непубличным данным и методам, но работает в изолированной среде, т. е. результаты применения этих методов не попадают в основную систему. При этом в случае успешной реализации они могут быть перенесены уже в блок интеллектуального анализа информации.

Естественно, для сохранения накопленной обработанной информации реализована система резервного копирования. Информация из файлового хранилища и БЗ дублируется на отдельном сервере.

Для обеспечения общего доступа к данным системы и методам обработки информации реализован стандартизированный программный интерфейс API (*application programming interface*) на основе технологии REST (*representational state transfer*). Обращение к сервисам из внутреннего контура происходит по протоколу HTTP, а из внешнего по протоколу HTTPS.

Также через REST API работает сайт ИСАНД, который предоставляет пользователю удобный графический доступ в систему. Сайт позволяет просматривать метаинформацию о публикациях и результаты работы методов анализа, а также редактировать информацию о публикациях в зависимости от прав, полученных при регистрации.

3. ТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ НАУЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Классификатором в системе ИСАНД является онтология научного знания теории управления, описанная ранее в § 1, которая позволяет отразить возможную многоотнесенность научных объектов. Под научными объектами в данном разделе будем иметь в виду либо агентов (ученых, организации, журналы, конференции), либо публикации. Характеристикой каждого из этих объектов в тематическом пространстве является вектор, называемый (тематическим) *профилем*.

Напомним (см. § 1), что онтология теории управления имеет четырехуровневую структуру (метафакторы, факторы, подфакторы, термины). Уровни нумеруются числами от 0 до 3.

Множество вершин первого уровня, называемых факторами, обозначим через $V = \{v_1, \dots, v_n\}$. При этом i -я вершина первого уровня связана с множеством $V_i = \{v_{i1}, \dots, v_{in_i}\}$ вершин второго уровня – подфакторов. Обозначим через m общее число подфакторов: $m = \sum_{i \in N} n_i$.

Третий уровень – это вершины-термины, характеризующие подфакторы. Каждый термин, как правило, характеризует один подфактор (т. е. в некоторых случаях древовидность онтологии может нарушаться).

Приведем далее алгоритм расчета профилей научных объектов в соответствии с работой [10]. Обозначим:

K – множество ученых;

L – множество публикаций;

Δ_{lij} – сумму числа вхождений в l -ю публикацию базовых терминов ij -го подфактора;

$$\omega(k, l) = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-й ученый является автором} \\ & l\text{-й публикации;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$r(l)$ – количество авторов l -й публикации.

В соответствии с алгоритмом, описанным в работе [10], определим *профиль второго уровня публикации* l :

$$x_l = (x_{l1}, \dots, x_{lij}, \dots, x_{lm}),$$

$$\text{где } x_{lij} = \frac{\Delta_{lij}}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \Delta_{lij}}, \quad l \in L, \quad j \in N_i, \quad i \in N.$$

Очевидно, что этот вектор является стохастическим, т. е. $\sum_{i,j} x_{lij} = 1$.

Замечание. В дальнейшем возможно рассмотрение более сложных методов определения профиля (в том числе основанных на сетевых связях (ссылках) публикаций).

Для нахождения *профиля первого уровня публикации* l просуммируем для каждого фактора значения компонент профиля второго уровня, отвечающих связанным с ним подфакторам:

$$X_l = (X_{l1}, \dots, X_{li}, \dots, X_{lm}),$$

$$\text{где } X_{li} = \sum_{j \in N_i} x_{lij}, \quad l \in L, \quad i \in N.$$

Наконец, для нахождения *профиля нулевого уровня публикации* просуммируем для каждой из трех вершин нулевого уровня значения компонент профиля первого уровня, отвечающих связанным с ней вершинам первого уровня.

Таким образом, каждая публикация характеризуется трехмерным вектором профиля нулевого уровня, n -мерным вектором профиля первого уровня, m -мерным вектором профиля второго уровня. Все три вектора являются стохастическими.

На основании профилей публикаций можно определить профили других научных объектов, связанных с публикациями.

На основе аддитивного принципа агрегирования определим *профили второго и первого уровня k -го ученого*, используя массив его публикаций

$$y_{ij}^k = \frac{\sum_{l \in L} \omega(k, l) \frac{x_{lij}}{r(l)}}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in L} \omega(k, l) \frac{x_{lij}}{r(l)}}, \quad k \in K, \quad j \in N_i, \quad i \in N,$$

$$Y_i^k = \sum_{j \in N_i} y_{ij}^k, \quad k \in K, \quad i \in N.$$

Профиль нулевого уровня определяется суммированием для каждой из трех вершин нулевого уровня значений компонент профиля первого уровня, отвечающих связанным с ней вершинам первого уровня.

Далее определим *профили журнала*, в котором опубликованы работы ученых. Пусть $U \subset L$ – множество работ, опубликованных в журнале $p \in P$, где P – множество журналов. Тогда профили определяются по формулам

$$w_{ij}^p = \frac{\sum_{l \in U} x_{lij}}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in U} x_{lij}}, \quad p \in P, \quad j \in N_i, \quad i \in N,$$

$$W_i^p = \sum_{j \in N_i} w_{ij}^p, \quad p \in P, \quad i \in N.$$



Размерности профилей журнала также равны m (для профиля второго уровня) и n (для профиля первого уровня).

Наряду с тематическими профилями важной характеристикой журнала является количество опубликованных в нем работ, т. е. количество элементов в множестве U .

Замечание. Аналогично профилю журнала можно рассчитать профиль *научной конференции*.

Поскольку профили публикации, ученого, организации, журнала, конференции могут быть заданы в виде стохастических векторов, можно единообразно рассчитывать степень близости между этими научными объектами. Предлагается применять следующее расстояние между двумя профилями, задаваемыми стохастическими векторами $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ и $q = (\beta_1, \dots, \beta_n)$:

$$d(\alpha, \beta) = 1 - \sum_{j=1}^n \min(\alpha_j, \beta_j) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n |\alpha_j - \beta_j|.$$

Отметим, что эта метрика является частным случаем хорошо известного в теории вероятностей расстояния общей вариации и принимает значения от 0 до 1 включительно.

Замечание. Легко убедиться (см. работу [10]), что в данной метрике расстояние между профилями первого уровня всегда не больше расстояния между профилями второго уровня и не меньше расстояния между профилями нулевого уровня тех же объектов.

4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ТЕКСТОВ

4.1. Выделение структуры научных публикаций

На данный момент функционирование ИСАНД связано с двумя процессами обработки текстов: выделение метаинформации из текста публикации и предобработка текстового слоя для вычисления профилей (см. § 3).

Задача автоматического выделения структуры научных публикаций возникает при необходимости систематизировать и нормализовать накопленные данные с разными целями: формирование базы данных публикаций с возможностью поиска по ней, построение графов цитирования по библиографическим ссылкам, использование размеченных данных для обучения языковых моделей. Одна из главных проблем для решения этой задачи – большая разрозненность в структуре самих публикаций. Это может быть и разная последователь-

ность структурных элементов, и отсутствие каких-либо из них, и разный формат написания в рамках одного структурного элемента (к структурным элементам относят идентификаторы, заголовок статьи, авторов, аннотацию и т. д.).

Методы выделения структуры текста могут основываться на традиционных алгоритмах OCR (*Optical Character Recognition*). Они представляют из себя механическое или электронное преобразование документов в пригодные для редактирования и поиска данные. К этим алгоритмам относятся: метод шаблонов, граничный анализ, зональная сегментация, структурный метод. Однако данные подходы не являются автоматическими и требуют значительного вмешательства для настройки и корректировки под различные форматы научных публикаций.

Методы автоматического выделения структуры в большинстве случаев ориентированы исключительно на использование технологий машинного обучения, поскольку для обеспечения высокой эффективности эвристических методов требуется разработка множества правил, учитывающих все возможные особенности каждого типа структурных элементов. Важно отметить, что эти подходы не всегда обеспечивают высокую точность результата, которая также может зависеть от языка, на котором написана соответствующая публикация [17, 18].

В работе [19] авторы представили подход по извлечению метаданных из заголовков документов с кириллическими символами. Подход включает в себя: создание датасета CORE, извлечение текста из PDF-файла с помощью утилиты pdfMiner с последующей токенизацией и обучение моделей GROBID (*GeneRatiOn of BIbliographic Data*) и BiLSTM (*Bidirectional Long Short-Term Memory*) для сравнения результатов. Набор данных CORE предоставляет данные научных публикаций. Он состоит из метаданных и полных текстов в машинно-обрабатываемом формате. Датасет, основанный на ресурсах PubMed Central Open Access Subset, CiteSeer и Cora-ref [20], состоит из 15 553 документов, полученных после фильтрации всех кириллических исходных данных по языку, удаления дубликатов, отбрасывания тех документов, которые не являются научными публикациями.

Далее рассмотрим, как структура научных публикаций определяется в ИСАНД. Здесь в качестве источников данных выступают публикации из хранилища. Общее количество статей в нем на момент написания настоящей работы составляло

26 335, исключая дубликаты и подозрительные статьи. После исключения файлов с шифрованием, поврежденной кодировкой и отсутствием текстового слоя осталось 22 532 статьи, включая 21 520 статей на русском языке.

Автоматическое извлечение структурных элементов научных публикаций основывается на инструменте с открытым исходным кодом GROBID, который представляет собой свободно распространяемую библиотеку, обученную на англоязычных публикациях для автоматического извлечения структурных элементов, и имеет возможность дообучения на корпусах текста других языков. GROBID использует каскад моделей разметки последовательностей для анализа документа. Такой модульный подход позволяет адаптировать обучающие данные, функции, текстовые представления и модели к различным иерархическим структурам документа. Предлагаемая модель является расширением задачи распознавания именованных сущностей [21]. По умолчанию решение задачи выполняется с помощью стандартных методов «плоского» машинного обучения, базирующихся на линейном цепном методе условных случайных полей (англ. *Conditional Random Field*, CRF). Однако в GROBID можно использовать модели маркировки последовательностей глубокого обучения, обученные с помощью библиотеки Deep Learning Framework for Text (DeLFT). DeLFT — это платформа Keras и TensorFlow для обработки текста, ориентированная на маркировку последовательностей и классификацию текста, которая реализует

стандартные современные архитектуры глубокого обучения, соответствующие задачам обработки текста.

Доступные нейронные модели включают комбинацию методов типа CRF и глубокой двусторонней нейронной сети долгой краткосрочной памяти BidLSTM. Данная комбинация методов BidLSTM–CRF используется со встраиванием модели глобальных векторов для представления слов (англ. *Global Vectors for Word Representation*, GloVe), с дополнительным каналом функций, с эмбедингами из языковой модели (ELMo) и точно настроенными архитектурами на основе трансформеров со слоем активации CRF или без него, которые могут использоваться в качестве альтернативы линейного цепного метода CRF.

В настоящее время для полнотекстовых моделей не существует нейронной модели, поскольку входные последовательности для этой модели слишком велики для поддерживаемых в настоящее время архитектур глубокого обучения. Для этой задачи постановку проблемы необходимо изменить или использовать альтернативные архитектуры глубокого обучения (со скользящим окном и т. д.).

Для разбора научной публикации GROBID использует каскад моделей маркировки последовательностей, представленный на рис. 4. Архитектура и параметры структурных элементов зависят от используемых меток, от объема доступных обучающих данных, от времени выполнения, ограниченный на память и точность и т. д.

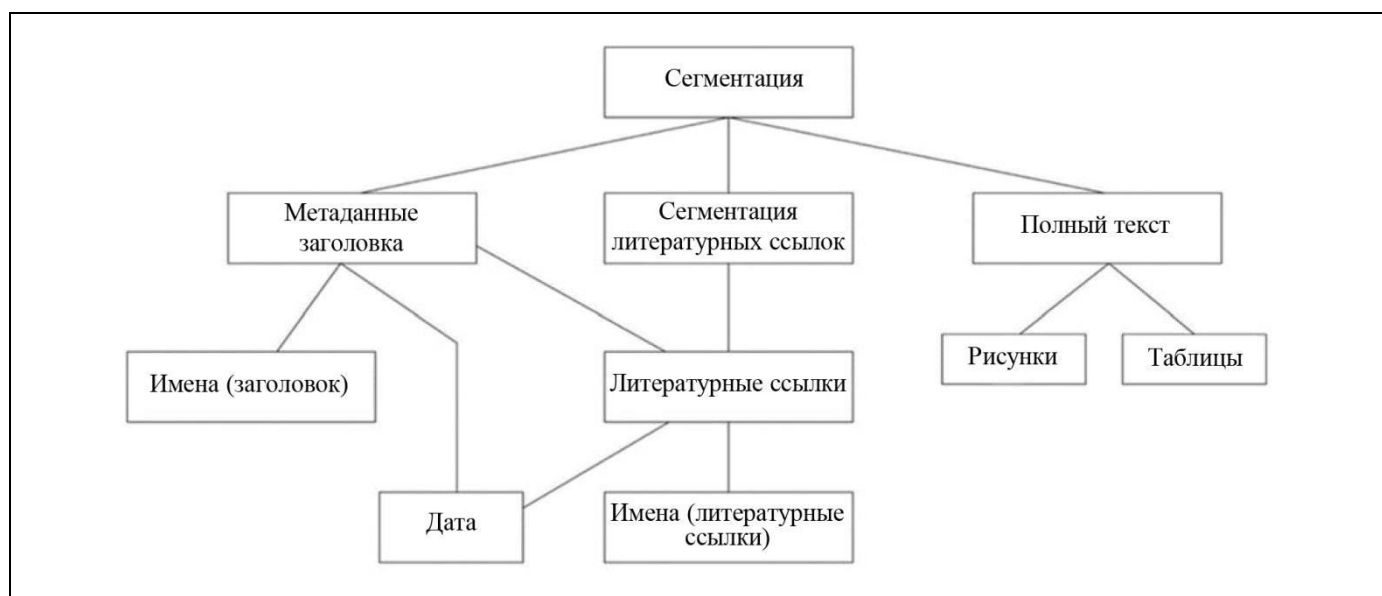


Рис. 4. Каскад структурных элементов в GROBID



Модель *Сегментация* используется для определения основных структурных элементов документа, таких как титульная страница, заголовок, основная часть, сноски, библиографические разделы и т. д. Обнаруженные моделью сегментации области заголовков передаются в модель заголовков. Модель заголовков обучается распознавать такую информацию, как название, авторы, принадлежность, аннотация и т. д. Некоторые модели маркировки могут использоваться в нескольких местах документа. Например, модель даты, используемая для сегментации исходной даты на годы, месяцы и т. д. и обеспечение нормализации даты в соответствии со стандартом ISO, вызывается, когда даты идентифицируются не только в области заголовка, но и при разборе зоны ссылок. Аналогично модели рисунков или таблиц применяются для структурирования всех рисунков и таблиц документа. Структурирование одного и того же типа сущности зависит также и от позиции этой сущности. Например, в шапке статьи обычно указываются полные имена авторов и они связаны с маркерами аффилиации, а имена авторов в строке ссылок обычно намного короче и никогда не смешиваются с информацией об аффилиации.

Метод обучения библиотеки GROBID, примененный при создании ИСАНД, основывается на предположении о стабильности структуры статей журналов в течение времени. В соответствии с этим предположением произведен анализ статей из разных источников с последующей группировкой и выявлением наиболее часто встречающихся шаблонов. Начальная фаза обучения включает 400 таких шаблонов, применяемых для обучения моделей, в том числе следующие шаблоны: «Метаданные заголовка», «Сегментация», «Адрес организации», «Имена (заголовок)» и «Сегментация литературных ссылок». В ходе экспериментов использовались PDF-файлы статей для создания обучающих данных при помощи инструмента GROBID. Внесение корректировок вызывало трудности из-за ограничений в методике исправления обучающих файлов. Если в обучающем файле отсутствовала часть текста из статьи, ее добавление было невозможно, что делало такой файл непригодным для обучения. В результате некоторые шаблоны были исключены из тренировочного набора в связи с вышеуказанными ограничениями. Дообучение GROBID происходит на основе предварительно проаннотированных обучающих данных. Каждая статья для дообучения поставляется с PDF-файлом, набором предварительно аннотиро-

ванных XML-файлов и набором файлов без расширения XML, содержащих список токенов с характеристиками для обучения. После завершения процесса обучения были получены значения метрики $f1$ (показанные в таблице), которые отражают эффективность моделей.

Метрика $f1$ для модели GROBID

Модель GROBID	$f1$ (микро-усреднение)	$f1$ (макро-усреднение)
Метаданные заголовка	80,95	73,25
Сегментация	83,95	70,33
Адрес организации	82,71	78,29
Имена (заголовок)	93,97	87,71
Сегментация литературных ссылок	91,18	81,01

Для понимания значений метрики $f1$ рассмотрим несколько примеров.

Пример. 1. Успешное извлечение.

• **Исходная строка:** «Влияние квантовых эффектов на проводимость наноструктур. Иванов А.А., Петров Б.Б., Сидорова В.В. - Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия.»

• **Распознанная строка:**

○ **название:** «Влияние квантовых эффектов на проводимость наноструктур»;

○ **авторы:** «Иванов А.А.», «Петров Б.Б.», «Сидорова В.В.»;

○ **аффилиация:** «Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия».

• **Токены:**

○ **слова:** «Влияние», «квантовых», «эффектов», «на», «проводимость», «наноструктур», «Иванов», «А.А.», «Петров», «Б.Б.», «Сидорова», «В.В.», «Московский», «физико-технический», «институт», «Долгопрудный», «Россия» (17 токенов);

○ **знаки препинания:** «.», «,», «,», «-», «,», «,», «.» (7 токенов);

○ **итого:** 17 (слова) + 7 (знаки препинания) = 24 токена.

• **Анализ:**

○ **ТР** (истинные положительные): все токены, составляющие название статьи, имена авторов, название института, город и страну, правильно отнесены к соответствующим категориям.

○ **FN** (ложные отрицательные): отсутствуют.

○ **FP** (ложные положительные): отсутствуют.

○ **TN** (истинные отрицательные): все знаки препинания, кроме двух запятых в аффилиации, классифицированы как «не относящиеся к метаданным».

- **Precision** (точность): $TP / (TP + FP) = 100 \%$.
- **Recall** (полнота): $TP / (TP + FN) = 100 \%$.
- **F1 score**: $2 * (1 * 1) / (1 + 1) = 100 \%$. ♦

Первый пример демонстрирует идеальный случай, где все элементы, включая название статьи, имена авторов, название института, город и страну, были извлечены и классифицированы верно. Это соответствует *f1 score* 100 %, указывая на высокую точность модели.

Пример 2. Частичная ошибка.

• **Исходная строка:** «Новые подходы к машинному обучению. Автор: Смирнова Е.Д., Институт системного программирования РАН, Москва, Россия».

• **Распознанная строка:**

- **название:** «Новые подходы к машинному обучению»;
- **авторы:** «Смирнова Е.Д.»;
- **аффилиация:** «Институт системного программирования РАН» (город и страна пропущены).

• **Токены:**

- **слова:** «Новые», «подходы», «к», «машинному», «обучению», «Автор», «Смирнова», «Е.Д.», «Институт», «системного», «программирования», «РАН», «Москва», «Россия» (14 токенов);
- **знаки препинания:** «.», «:», «,», «,», «,» (5 токенов);
- **итого:** $14 + 5 = 19$ токенов

• **Анализ:**

- **TP:** Токены в названии, имени автора и названии института классифицированы верно.
- **FN:** Токены «Москва» и «Россия» ошибочно отнесены к категории «не относящиеся к метаданным».
- **FP:** Отсутствуют.
- **TN:** Остальные токены (знаки препинания, слово «Автор:») классифицированы как «не относящиеся к метаданным» – верно.

○ В исходной строке 19 токенов относятся к метаданным, из них 11 распознаны верно (TP), 2 пропущены (FN).

- **Precision:** $TP / (TP + FP) = 11 / (11 + 0) = 100 \%$.
- **Recall:** $TP / (TP + FN) = 11 / (11 + 2) \approx 84,62 \%$.
- **F1 score:** $2 * (1 * 0,8462) / (1 + 0,8462) \approx 91,67 \%$. ♦

Второй пример иллюстрирует частичную ошибку, где город и страна в аффилиации были пропущены. Несмотря на эту ошибку, *f1 score* остается достаточно высоким (около 91,67%), так как большая часть информации извлечена корректно.

Пример 3. Ошибка в определении элемента.

• **Исходная строка:** «Keywords: Deep learning, Natural language processing, Text analysis».

• **Распознанная строка:**

- **название:** «Keywords: Deep learning, Natural language processing, Text analysis»;
- **авторы:** (не определены);
- **аффилиация:** (не определена).

• **Токены:**

- **слова:** «Keywords», «Deep», «learning», «Natural», «language», «processing», «Text», «analysis» (8 токенов);
- **знаки препинания:** «:», «,», «,» (3 токена);
- **итого:** $8 + 3 = 11$ токенов.

• **Анализ:**

- **TP:** Отсутствуют.
- **FN:** Все токены, включая «Keywords:», «Deep», «learning» и т. д., неправильно классифицированы. Они должны были быть отнесены к категории «ключевые слова» или «не относящиеся к метаданным».
- **FP:** Все токены ошибочно отнесены к категории «название».
- **TN:** Отсутствуют, так как все токены отнесены к какой-либо категории.

○ В исходной строке 11 токенов. $TP = 0$, все токены отнесены к неправильной категории ($FN = 11$, $FP = 11$).

- **Precision:** $TP / (TP + FP) = 0 / (0 + 11) = 0 \%$.
- **Recall:** $TP / (TP + FN) = 0 / (0 + 11) = 0 \%$.
- **F1 score:** $2 * (0 * 0) / (0 + 0) = 0 \%$. ♦

Третий пример показывает критическую ошибку: строка с ключевыми словами была ошибочно распознана как название статьи, а авторы и аффилиация не были определены вовсе. В этом случае *f1 score* равен 0 %, что указывает на неспособность модели справиться с задачей.

Пример 4. Пропуск информации.

• **Исходная строка:** «Применение методов анализа данных в медицине. А. Петров, Б. Иванов. – Научно-исследовательский институт имени Н.И. Пирогова».

• **Распознанная строка:**

- **название:** «Применение методов анализа данных в медицине»;
- **авторы:** «А. Петров», «Б. Иванов»;
- **аффилиация:** (не определена, название института ошибочно не отнесено к аффилиации);

• **Токены:**

- **слова:** «Применение», «методов», «анализа», «данных», «в», «медицине», «А.», «Петров», «Б.», «Иванов», «Научно-исследовательский», «институт», «имени», «Н.И.», «Пирогова» (15 токенов);
- **знаки препинания:** «.», «,», «,», «-» (4 токена);
- **итого:** $15 + 4 = 19$ токенов.

• **Анализ:**

- **TP:** название статьи, имена авторов.
- **FN:** Все токены названия института.



○ **FP:** Отсутствуют.

○ **TN:** Остальные токены (знаки препинания, точка) классифицированы как «не относящиеся к метаданным» – верно.

○ Допустим, в исходной строке 19 токенов относятся к метаданным, из них 10 распознаны верно (TP), 5 пропущены (FN).

○ **Precision:** $TP / (TP + FP) = 10 / (10 + 0) = 100 \%$.

○ **Recall:** $TP / (TP + FN) = 10 / (10 + 5) = 66,67 \%$.

○ **F1 score:** $2 * (1 * 0,6667) / (1 + 0,6667) = 80 \%$. ♦

Четвертый пример демонстрирует случай пропуска информации, где название института ошибочно не отнесено к аффилиации. Это приводит к снижению *f1 score* до 80 %, подчеркивая важность корректной классификации элементов метаданных.

Доступ к заголовкам и аннотациям в базе статей позволил провести анализ их сходства с применением метрик, таких как расстояние Джаро – Винклера, Левенштейна и косинусное расстояние. Анализ результатов подтвердил высокую точность соответствия заголовков и аннотаций в рамках выбранных метрик. В частности, модели, такие как «Метаданные заголовка» и «Сегментация», достигли значительных успехов. Тем не менее, другие модели, в частности «Адрес организации», «Имена (заголовки)» и «Сегментация литературных ссылок», выявили потребность в дополнительном улучшении для достижения желаемых результатов.

4.2. Выделение именных групп и кореференция

Предобработка текстового слоя для вычисления профилей состоит из операций преобразования слов в нижний регистр, лемматизации (приведения слов к нормальной форме), удаления стоп-слов (слов, знаков, символов, которые самостоятельно не несут никакой смысловой нагрузки), подготовки общего словаря для всех документов, преобразования слов в векторы (с помощью фреймворка *pytorch*), с которыми умеет работать нейронная сеть. Особенный интерес вызывает задача кореференции, которую необходимо решать для обеспечения полноты профиля, т. е. для того, чтобы учитывались не только все упоминания термина, но также и его косвенные упоминания, когда вместо него в тексте используется местоимение или синоним.

Стандартом решения многих задач обработки текстов, связанных с классификацией слов в тексте, является использование языковых моделей,

проводящих токенизацию входного текста по словам. Это следует из того, что интуитивно проще классифицировать слово, когда оно представлено только одним токеном. Ввиду большого числа слов в используемом словаре такие языковые модели требуют значительных затрат памяти и вычислительных ресурсов. Для языков с богатой морфологией модели должны хранить информацию о каждой возможной словоформе каждого слова, что увеличивает размер словаря в среднем в два десятка раз. В качестве альтернативного подхода используется токенизация текста по наборам подряд стоящих символов, называемых подсловами (*subword* или *word pieces*). Это позволяет модели оперировать словарем ограниченных размеров [22]. Однако при использовании такой стратегии токенизации необходимы дополнительные механизмы объединения векторных представлений нескольких токенов, соответствующих одному слову [23].

Задача кореференции – это задача обработки естественных языков. В заданном тексте устанавливаются группы именных групп (слов или словосочетаний), обозначающих один и тот же объект [24]. Предполагается, что задача может быть решена более точно при использовании токенизации по подсловам. Задача осложняется необходимостью классифицировать не слова, а именные группы – группы подряд стоящих слов [25]. В ИСАНД применяется решение задачи кореференции при использовании токенизации по подсловам путем вычисления для каждой пары токенов двух оценок. Первая оценка выражает вероятность того, что два токена входят в одну именную группу. Вторая оценка выражает вероятность того, что два токена входят в две разные кореферентные именные группы. Совмещение двух оценок позволяет получить модель решения задачи кореференции, которая наследует все преимущества моделей с токенизацией по подсловам: меньший размер модели, более точная работа с языками с богатой морфологией.

Модель кореференции основана на том, что текст на естественном языке представляет собой описание действий или состояний различных объектов. Именная группа – это словосочетание, ссылающееся на объект внеязыковой действительности, называемый референтом. Именные группы обычно выражаются в тексте последовательностью из существительного и синтаксически подчиненных ему слов. Если две именные группы ссылаются

ся на один и тот же референт, то они называются кореферентными. Задача кореференции заключается в поиске всех пар кореферентных именных групп.

Первое полученное решение кореференции было основано на предположении, что для большей части пар именных групп в тексте можно однозначно определить наличие или отсутствие кореферентной связи при помощи системы правил. Полученная система правил отсеивала 71 % пар именных групп, однозначно определяя для них наличие или отсутствие кореференции. Для остальных пар использовалась типичная для данной задачи стратегия сравнения векторов признаков двух именных групп. В этот вектор кодировалась информация о положении именной группы в тексте, грамматических и синтаксических признаках их главных слов, а также некоторая другая. Нейронная сеть, состоящая из набора полносвязных слоев, определяла итоговую оценку вероятности наличия кореферентной связи. Данный подход имеет следующие недостатки: он опирается на сторонние решения синтаксического и морфологического анализа; набор заданных на этапе создания модели признаков именных групп, по которым определяется кореференция, может быть неполон.

В данный момент исследуется подход, основанный на выставлении каждой паре токенов текста оценки вероятности того, что оба токена находятся или в одной именной группе, или в двух кореферентных именных группах. Оценка основана на модификации механизма внимания self-attention и использует только векторные представления токенов для принятия решения. Такой подход позволяет решать одновременно и задачу определения именных групп в тексте, и задачу кореференции между ними. В настоящее время подход имеет следующие недостатки: возможность работы только в ограниченном окне токенов, необходимость обучения на больших корпусах и нестрогое покрытие именных групп: только часть токенов кореферентных групп получает высокую оценку. Построенная модель обладает высокой точностью, но не является достаточно полной. Это указывает на то, что модель находит только малую часть правильных пар токенов, но почти не ошибается.

5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕТЕЙ

Научная деятельность порождает немалое количество объектов (публикаций, авторов, органи-

заций, журналов и т. д.), связанных между собой различными связями (см. § 1) и тем самым образующих сеть. Узлы этой сети могут быть связаны цитированием (одна публикация цитирует другую), авторством (автор связан со своей публикацией), соавторством (авторы одной и той же публикации) и т. д.

Одной из наиболее простых и наглядных является сеть соавторства. В ней узлами являются ученые, а ненаправленная дуга между двумя узлами означает наличие хотя бы одной совместной публикации. Сеть соавторства позволяет, например, наглядно изобразить структуру публикационного сотрудничества в рамках научных подразделений. Это может оказаться полезным в ряде ситуаций (например, для нового сотрудника или руководителя подразделения). Рассмотрим в качестве примера следующий граф, на котором узлами являются сотрудники одного из реальных научных подразделений (рис. 5).

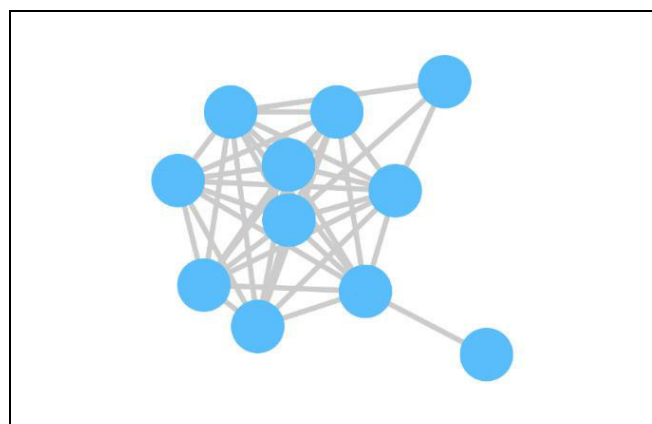


Рис. 5. Связная сеть соавторства сотрудников научного подразделения

Видно, что граф является связным, а связи в нем – достаточно плотными. Это означает, что в данной лаборатории сотрудники достаточно тесно взаимодействуют друг с другом при подготовке публикаций.

Пример другой, в некотором смысле противоположной ситуации, представлен на рис. 6.

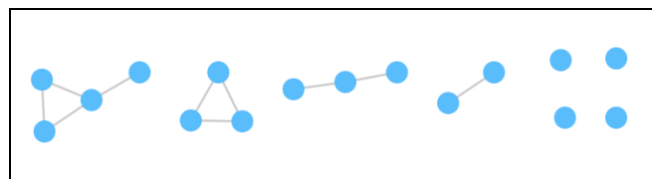


Рис. 6. Несвязная сеть соавторства сотрудников научного подразделения

Здесь имеются несколько компонент связности, в том числе включающих в себя изолированные узлы. Это может означать, что отдельные группы в данной лаборатории работают автономно.

Анализировать сети соавторства можно и с точки зрения выявления общих закономерностей. Рассмотрим вопрос о том, как наличие совместных публикаций соотносится с расстоянием между тематическими профилями авторов.

Например, среднее расстояние между профилями сотрудников ИПУ РАН является довольно большим и составляет 0,85 (в смысле метрики, описанной в § 3). Это означает, что публикации сотрудников относятся, вообще говоря, к различным областям теории управления.

Определим критерий наличия *сильной связи* между двумя авторами: существует третий автор, который имеет хотя бы одну публикацию с первым автором без второго и хотя бы одну публикацию со вторым без первого (т. е. связан отдельно с каждым из двух авторов). Оказывается, что профили авторов, соединенных сильной связью, в среднем ближе друг к другу (среднее расстояние 0,59), чем профили авторов, связь которых не является сильной (среднее расстояние 0,64), и это различие является статистически значимым. Это наблюдение отражает наличие взаимосвязи между двумя понятиями близости авторов – в смысле расстояния между профилями в тематическом пространстве теории управления и в смысле расстояния между узлами в графе соавторства.

6. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСАНД

На сегодняшний день ИСАНД предоставляет следующие возможности: построение тематического профиля ученого или подразделения, тематическое ранжирование ученого или подразделения, создание профиля связности тем, наложение профиля на граф глоссария по теории управления, а также исследование проекций профилей ученых на двумерном пространстве.

Напомним (см. п. 1.1), что система использует онтологию по теории управления, состоящую из четырех блоков: общенаучные термины, математический аппарат, предметная область и сфера применения. Общенаучные термины включают термины, которые встречаются в различных научных темах. Остальные три блока включают факторы, которые, в свою очередь, делятся на подфакто-

ры. Каждый подфактор определяется терминами, которые были выбраны экспертами соответствующих научных областей. Таким образом, с помощью ИСАНД можно построить профиль ученого, который покажет, насколько часто данный специалист использует термины из соответствующих факторов и подфакторов.

Функциональность сайта реализована в шести разделах (рис. 7).



Рис. 7. Рабочие окна ИСАНД

6.1. Тематический поиск

Раздел «Тематический поиск» позволяет отобрать релевантные публикации, ученых, журналы, конференции, организации и города по заранее заданным факторам (первый уровень тематической классификации), подфакторам (второй уровень тематической классификации) и терминам теории управления. Он предполагает первоначальный выбор одного метафактора из четырех:

- общенаучная проблематика,
- предметная область,
- математический аппарат,
- сфера применения (рис. 8).

Следующим этапом предполагается выбор темы из предложенного списка с возможностью поиска темы, а также сортировки тем по алфавиту и по популярности (рис. 9).

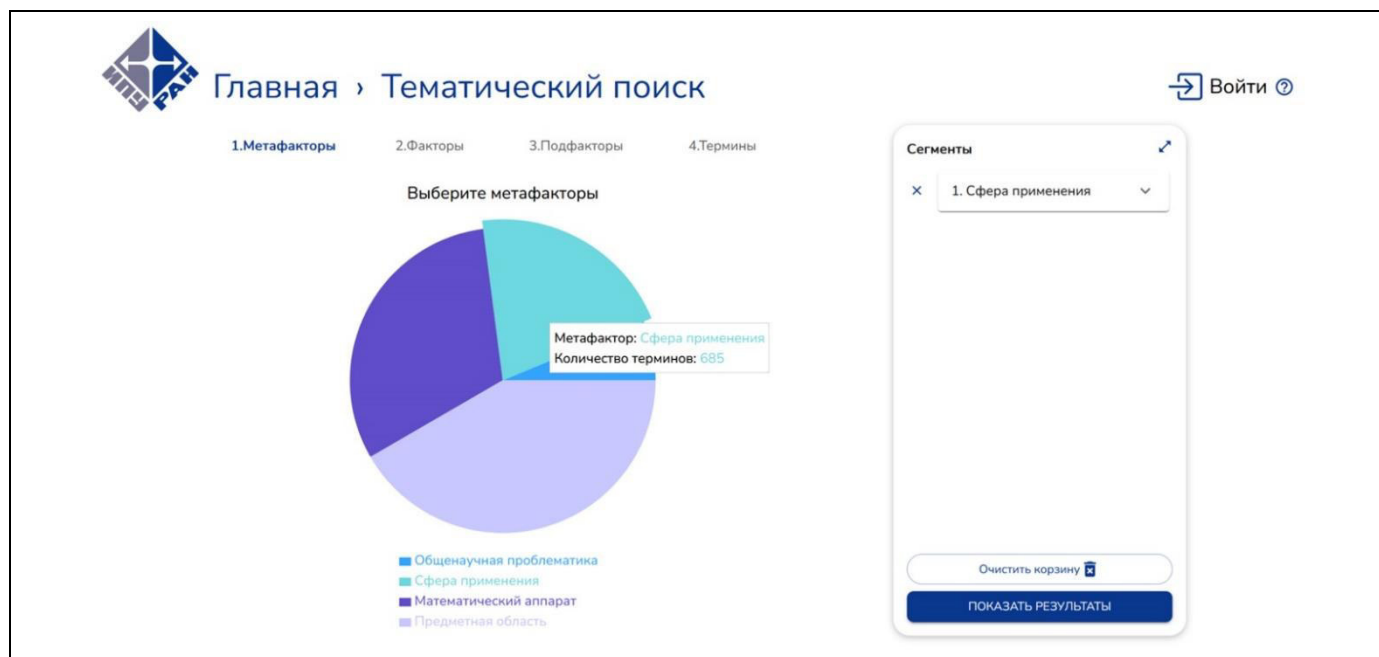


Рис. 8. Выбор метафакторов для тематического поиска

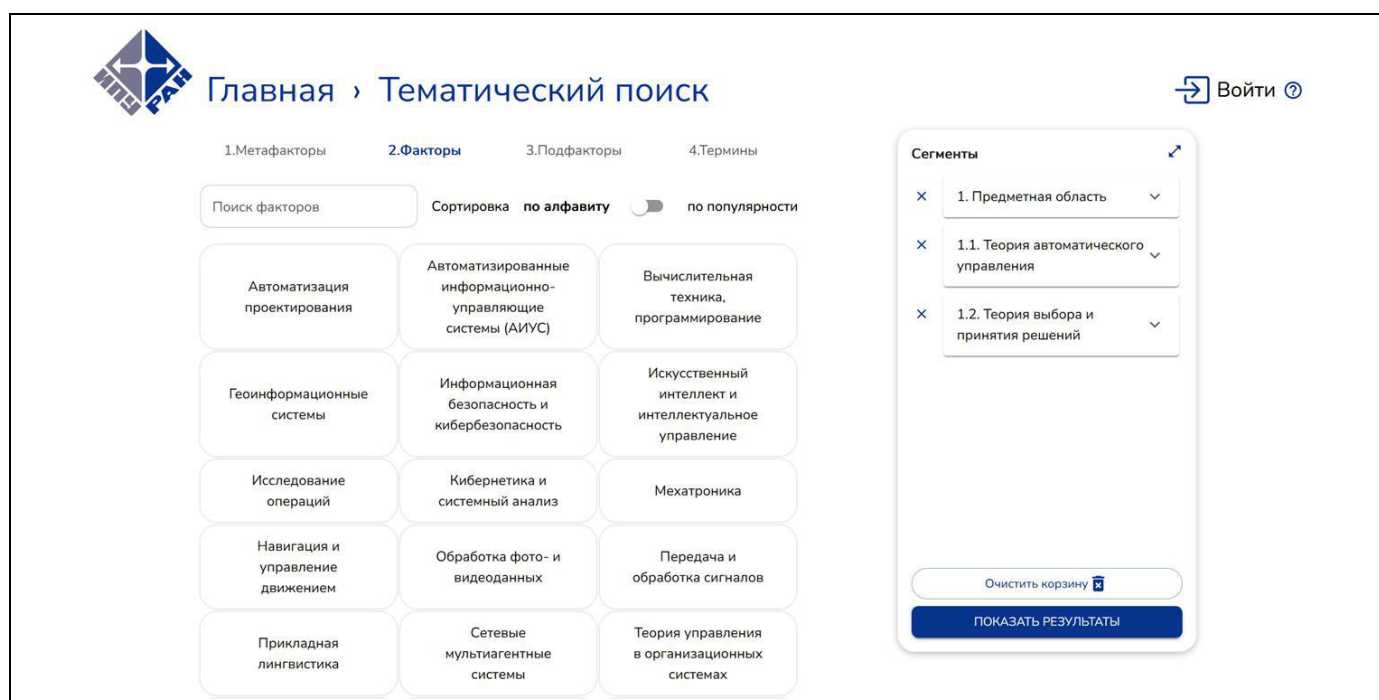


Рис. 9. Выбор факторов для тематического поиска

Для уточнения выборки могут быть заданы также подфакторы и термины на аналогичных интерфейсах.

Выдача результатов группируется по публикациям, авторам, городам, журналам, организациям и конференциям (рис. 10). В выдаче результатов показывается количество терминов, найденных в материалах с учетом примененных фильтров и групп. Таким образом, ученый может получить

ответы на вопросы: какие публикации являются наиболее релевантными выбранной тематике, какие ученые преимущественно занимаются выбранной темой, на каких конференциях чаще всего можно услышать доклады по данному направлению, в каких журналах стоит публиковать статью по заявленным темам и, наконец, в каких организациях и городах работают ученые, связанные с заданными направлениями.



Главная › Тематический поиск › Результаты

ПУБЛИКАЦИИ

АВТОРЫ

ГОРОДА

ЖУРНАЛЫ

ОРГАНИЗАЦИИ

КОНФЕРЕНЦИИ

Всего 43 публикаций

Теория управления (дополнительные главы)

Количество терминов
Сфера применения: 53
Математический аппарат: 745
Анализ систем управления: 139

Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем.

Количество терминов
Сфера применения: 41
Математический аппарат: 240
Анализ систем управления: 138

Подавление смещений плазмы по вертикали системой управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в D-образном токамаке

Количество терминов
Сфера применения: 1
Математический аппарат: 119
Анализ систем управления: 39

Разработка многофакторной системы прогнозирования для управления динамическими системами

Количество терминов
Сфера применения: 9
Математический аппарат: 118
Анализ систем управления: 29

a



Главная › Тематический поиск › Результаты

Войти

Публикации

Авторы

Города

Журналы

Организации

Конференции

Всего 971 авторов



Новиков Дмитрий Александрович

Количество терминов
Теория автоматического управления: 2111
Теория выбора и принятия решений: 1245



Лазарев Александр Алексеевич

Количество терминов
Теория автоматического управления: 1844
Теория выбора и принятия решений: 481



Галяев Андрей Алексеевич

Количество терминов
Теория автоматического управления: 1944
Теория выбора и принятия решений: 105

б

Рис. 10. Отсортированный список результатов тематического поиска: а – по публикациям, б – по авторам

В профиле публикации выводятся название, аннотация и авторы (рис. 11).

Построение тематического профиля дает пользователю возможность увидеть профиль с четырех ракурсов: предметная область, математический аппарат, сфера применения, общенаучная проблематика в диаграммах по факторам, подфакторам и терминам (рис. 12, *a – в* соответственно).

Тематический профиль является эффективным инструментом для решения многих задач анализа научной деятельности – например, для тематического анализа научных групп.

6.2. Профили ученых

В ходе научной деятельности регулярно возникают ситуации, когда несколько научных коллективов занимаются исследованием одной задачи. Это может происходить как в рамках общего проекта, так и в процессе реструктуризации научных подразделений. Для планирования научной деятельности необходимо понимать, какими компетенциями обладают сотрудники.

Предлагается определение направлений исследований научных коллективов на основании тем их публикаций. Более детальный анализ сравнения научных групп проводится с помощью некоторых критериев, приведенных в этой работе.

Данный раздел предоставляет возможность построить и сравнить тематические профили выбранных ученых. Для построения сравнительных диаграмм первым шагом необходимо выбрать авторов для сравнения. При выборе авторов есть

возможность выбрать отдельные работы либо все работы автора.

Слева на вертикальной оси диаграммы выводятся термины, столбец диаграммы показывает количество вхождений в публикации. Значение столбца диаграммы может быть приведено к одной из пяти схем отображения.

- «Абсолютный вектор» отражает суммарное количество вхождений терминов.
- «Стохастический вектор» – абсолютный вектор с нормализованными столбцами.
- «Булев вектор» – компоненты этого вектора могут принимать два значения: единица – если количество терминов больше значения «отсечение по терминам» и ноль – в остальных случаях.
- «По количеству использованных терминов» – вариант абсолютного вектора, когда «отсечение по терминам» убирает те столбцы, где «уникальных» терминов меньше, чем значение «отсечение по терминам». В случае абсолютного вектора «отсечение по терминам» работает с общим числом вхождений терминов, в данном случае – с уникальным.

- «Термины» – просмотр терминов.

Выбор уровня означает выбор уровня графа глоссария – дерева терминов, в соответствии с которым проводится сравнение публикаций. Большее значение уровня обеспечивает более детальный анализ. Отсечение по категориям и по терминам убирает минимальные приведенные значения, чтобы сделать график более выразительным. Чекбокс «Учитывать общенаучные термины» добавляет в выборку слова, относящиеся к общенаучной проблематике.



Главная › ... › Результаты › Публикация

 Войти

Теория управления организационными системами

Аннотация

Авторы (1)

Книга посвящена описанию основ математической теории управления организационными системами. Ее цель – показать возможность и целесообразность использования математических моделей для повышения эффективности функционирования организаций (предприятий, учреждений, фирм и т. д.). Описываются более сорока типовых механизмов – процедур принятия управленческих решений (реализующих функции планирования, организации, стимулирования и контроля); управления составом и структурой организационных систем, институционального, мотивационного и информационного управления. Их совокупность может рассматриваться как «конструктор», элементы которого позволяют создавать эффективную систему управления организацией. Книга адресована студентам вузов, аспирантам (в первую очередь – обучающимся по специальности 2.3.4 «Управление в организационных системах») и специалистам (теоретикам и практикам) в области управления организационными системами.

НД

Новиков Дмитрий Александрович

Факторы

Подфакторы

Термины

Рис. 11. Карточка публикации

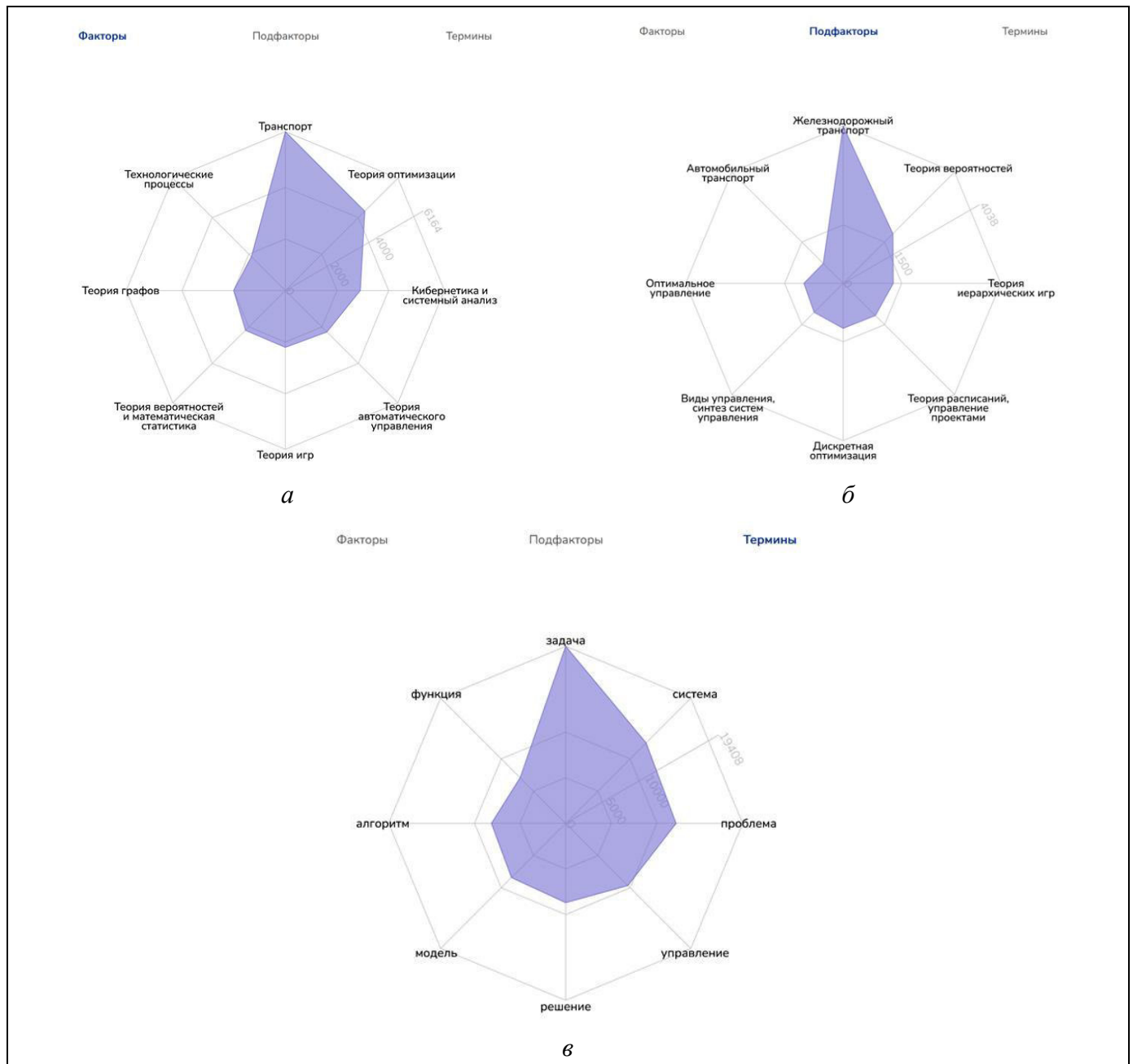


Рис. 12. Тематический профиль научного объекта: а – факторы, б – подфакторы, в – термины

Опция «Выберите путь» позволяет уточнить тему – второй уровень графа глоссария. Временная шкала позволяет выбрать промежуток времени для сравнения публикаций. Имеется возможность углубленного сравнения профилей по подфакторам второго уровня (рис. 13).

6.3. Тематическое ранжирование

В данном разделе пользователь получает список релевантных ученых, отсортированный по количеству использованных терминов выбранных факторов (первый уровень тематической класси-

фикации) или подфакторов (второй уровень тематической классификации). Уровень задает глубину анализа в соответствии с используемым графом глоссария. На нулевом уровне тематической классификации выбираются метафакторы, на первом – факторы, на втором – подфакторы (рис. 14).

6.4. Граф классификатора

Данный раздел позволяет узнать частоту использования терминов в публикациях выбранного автора. Запрашиваемая информация отображается в виде графа: его вершина соответствует термину,

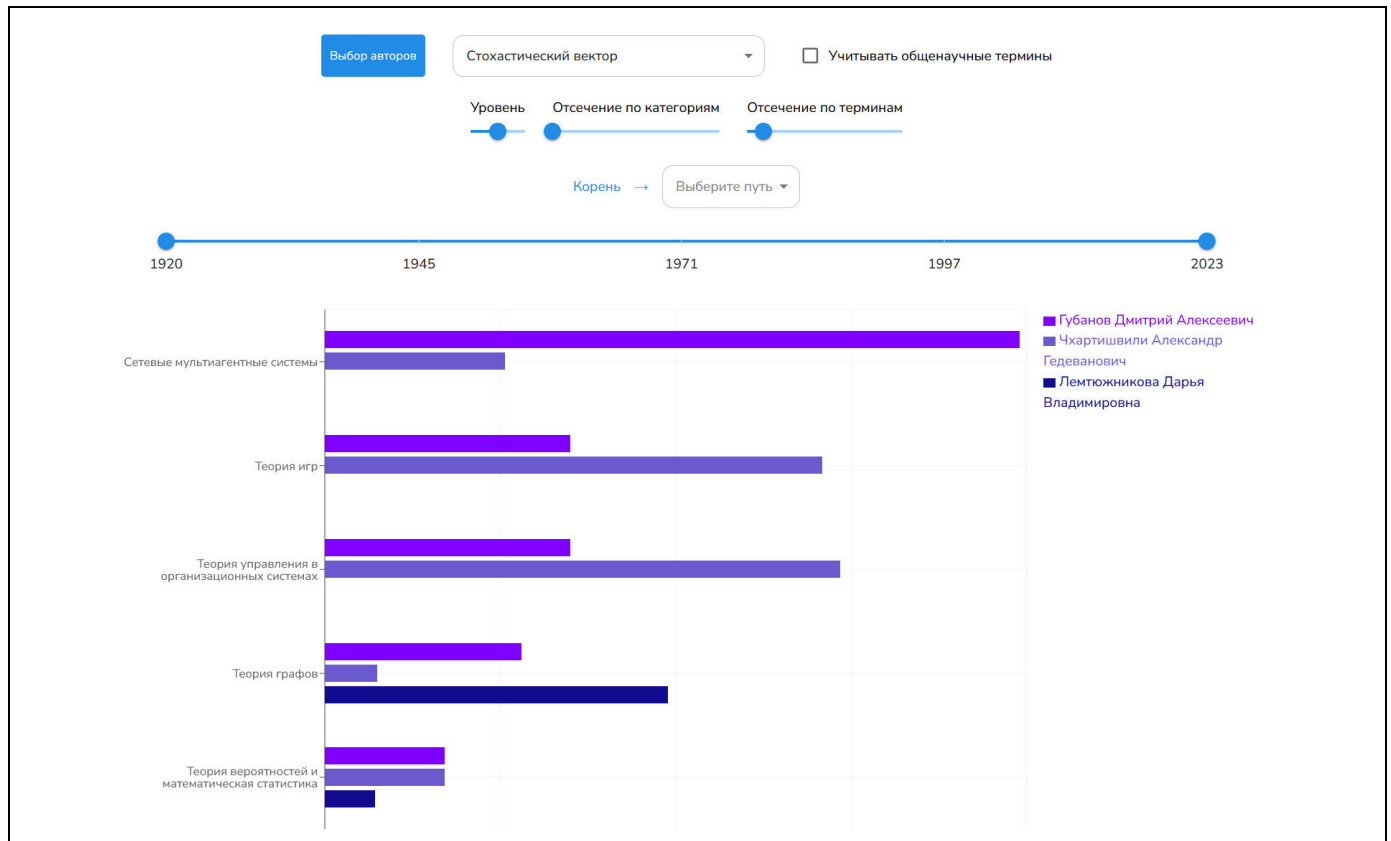


Рис. 13. Сравнение профилей ученых по подфакторам

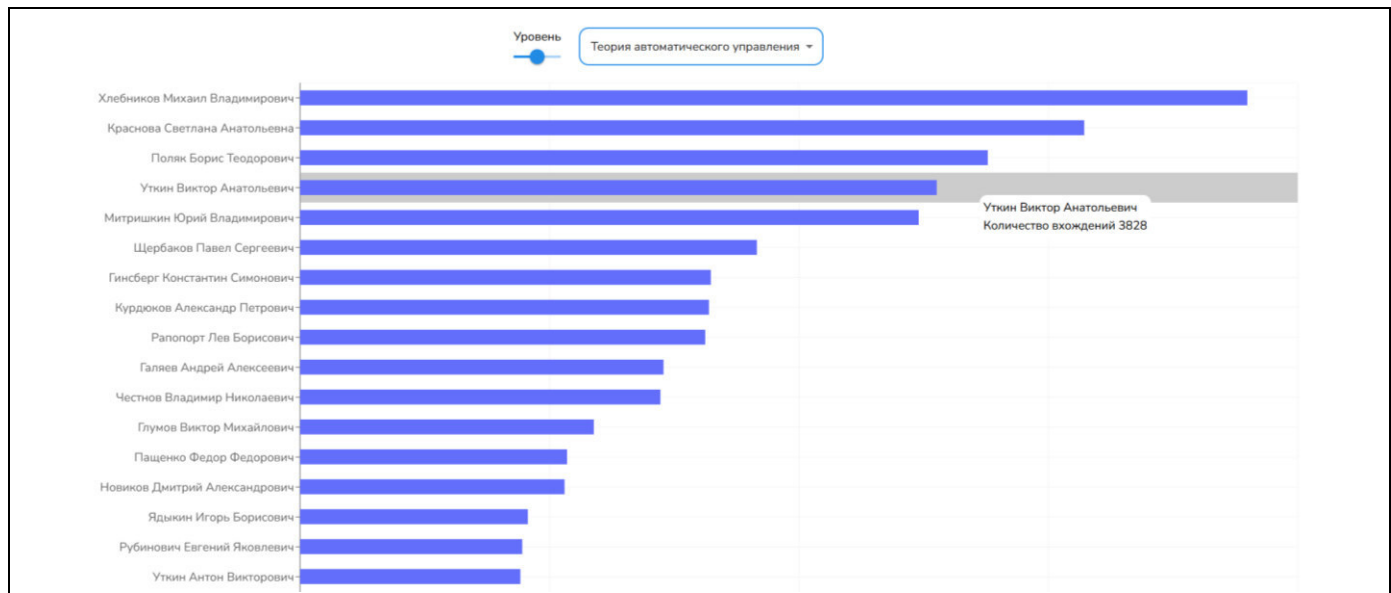


Рис. 14. Тематическое ранжирование

а ребро – совместному употреблению терминов в одной публикации.

Построение графов связности терминов производится по автору, выбор которого расположен в верхнем поле интерфейса. Применение бегунка «Отсечение по частоте» позволяет выводить толь-

ко высокочастотные термины при увеличении значения и отсекают низкочастотные. Уровень терминов означает используемый уровень графа глоссария, по которому производится анализ.

На графе классификатора выводятся термины, откалиброванные по частоте использования, к ним

может быть применено два вида значимой расцветки: по количеству вхождений и по количеству связей. Шкала значений расцветки размещается справа от области графа.

Отображение ребер и названий влияет на внешний вид графа и добавляет названия и ребра к вершинам терминов.

Включение общенаучных терминов добавляет точки общенаучных терминов на граф (рис. 15).

6.5. Граф глоссария

Данный раздел является наглядным инструментом отображения используемых терминов теории управления для выбранного ученого. Он предоставляет возможность исследовать окрестность терминов разных порядков. Достигается это путем построения ориентированного графа взаимосвязи терминов на основании глоссария. При этом вершина графа a соответствует термину a , ориентированное ребро (a, b) – использованию термина a в определении термина b .

Граф глоссария – это граф, содержащий термины и связи типа «Определяется через». Если в определении термина b встречается термин a , то термин a соединен с термином b направленным ребром.

Первым шагом выбирается автор в верхнем поле, и на графе подсвечиваются все термины, которые автор использовал в работах, а также связи между ними.

Поле «Наследовать от» позволяет выбрать термин, через который будут определены другие термины. Глубина проработки наследования задается в соседнем поле с числовой шкалой.

Режим расцветки реализован в соответствии с определяющей силой термина – отношением количества терминов, которые определены через данный термин, к количеству терминов, через которые данный термин определен.

Если выбрать функцию «Подсветить термин», то будет подсвечен выбранный термин с исходящими стрелками к терминам, которые определены

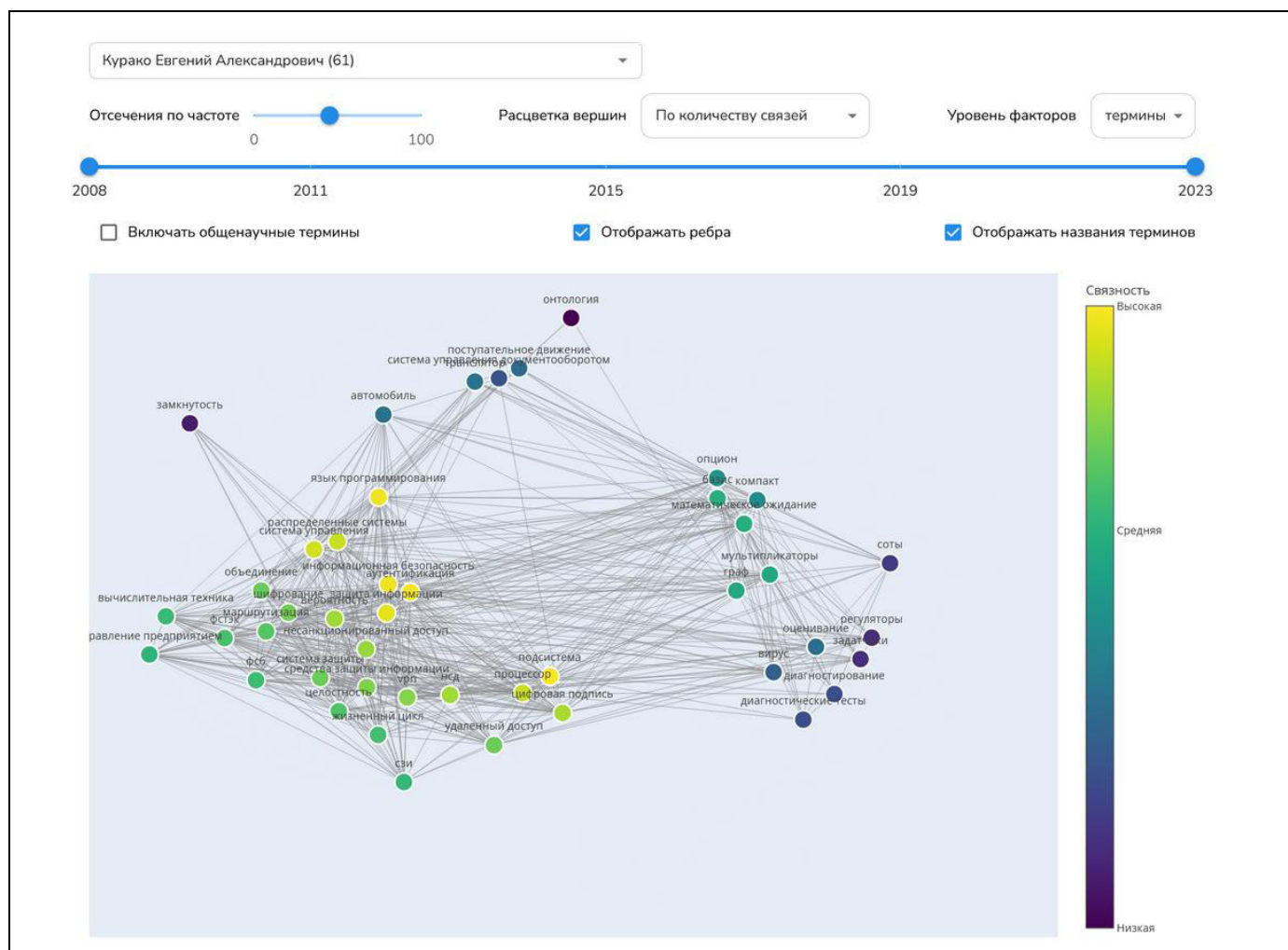


Рис. 15. Построение графа классификатора

через него, и входящими стрелками от тех терминов, через которые определен выбранный термин.

Режим «Всегда отображать названия терминов» позволяет видеть названия терминов на графе (рис. 16).

6.6. Глоссарий

Глоссарий представляет собой сборник терминов теории управления и их описаний (рис. 17, см. также <https://www.ipu.ru/education/glossary>).

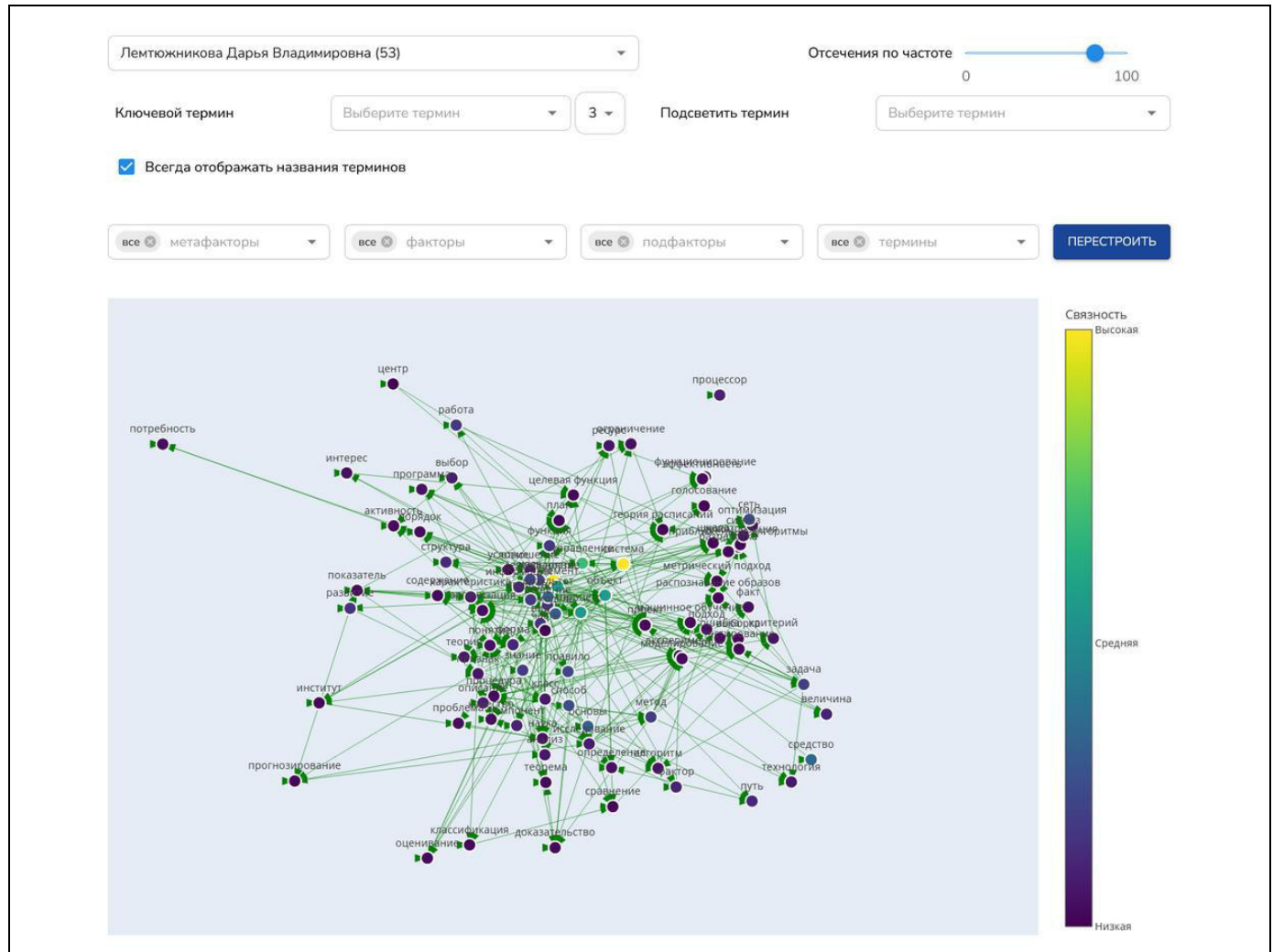


Рис. 16. Термины автора в графе глоссария

Глоссарий	
Термин	Описание
Абдукция (abduction)	вид рассуждения, использующий абдуктивный вывод, т. е. вывод от следствия к причине. Правила абдуктивного вывода имеют следующий вид: из А следует В; В имеет место; следовательно, причиной В является А. Поскольку причин явления В может быть много, заключение абдуктивного вывода является всего лишь гипотезой, а сам вывод – правдоподобным выводом. Поэтому абдуктивные выводы называют порождением гипотез.
Абсолютная устойчивость (absolute stability)	свойство нелинейного объекта сохранять асимптотическую устойчивость в целом для любых значений параметров нелинейной характеристики объекта из заданного класса нелинейных характеристик.
Абстрагирование (abstracting, abstraction)	процесс формирования образов реальности (представлений, понятий, суждений) посредством отвлечения и пополнения, т. е. путем использования (или усвоения) лишь части из множества соответствующих данных и прибавления к этой части новой информации, не вытекающей из этих данных.
Аварийный отказ (emergency failure)	переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное.
Автоколебания (self-oscillations)	незатухающие колебания в нелинейной динамической системе, амплитуда и частота которых в течение длительного промежутка времени могут оставаться постоянными, не зависят в широких пределах от начальных условий и определяются свойствами самой системы.

Рис. 17. Глоссарий



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средства системы ИСАНД позволяют впервые автоматизировать решение научно-организационных задач в области теории управления, связанных с подбором экспертов и рецензентов с определенными компетенциями, поиском публикаций по определенной тематике, анализом тематики научного коллектива и ее эволюции и т. д. Кроме того, в перспективе ИСАНД предоставляет широкие возможности для наукометрических исследований, проводимых с целью установления близостью публикаций, авторов и коллективов, построения сети соавторства и цитирования, тематических трендов. По мере расширения базы публикаций и пополнения словаря терминов (нижнего уровня онтологии научного знания) эти возможности будут совершенствоваться. Разумеется, эти возможности относятся только к теории управления, однако в структурном плане система ИСАНД могла бы стать прототипом для аналогичных систем в других областях науки.

Авторы статьи выражают благодарность коллегам, которые приняли активное участие в проекте: Авдеевой З.К., Агаеву Р.П., Алчинову А.И., Антипину С.И., Арутюнову А.В., Барабанову И.Н., Батову А.В., Бахтадзе Н.Н., Богачевой Д.Н., Буркову В.Н., Васильеву С.Н., Вишнеvesкому В.М., Владимировой С.С., Выотову К.А., Гаврилову М.С., Галяеву А.А., Голеву А.В., Гребенкову Д.И., Дранко О.И., Дранову Е.М., Жиляковой Л.Ю., Калашиникову А.О., Калугину К.А., Калянову Г.Н., Караваю М.Ф., Карпухиной Д.Р., Каршакову Е.В., Кирьянову П.А., Козловой А.А., Красновой С.А., Красоткину С.А., Кудинову И.Д., Кульбе В.В., Лазареву А.А., Латипову А.Р., Лебедеву В.Г., Лычагину В.Г., Макаренко А.В., Мельничуку В.С., Мешкову Д.О., Мещерякову Р.В., Михальскому А.И., Назину А.В., Нижегородцеву Р.М., Осолкову Н.С., Рапопорту Л.Б., Роцину А.А., Рубиновичу Е.Я., Сальникову А.М., Сергееву В.А., Сокольскому К.А., Стрыгину Д.Д., Суховерову В.С., Сычу В.В., Толоку А.В., Уткину В.А., Фархадову М.П., Федянину Д.Н., Хлебникову М.В., Хриуну С.П., Шарафиеву А.Ф., Шекунову М.А., Щепкину А.В., Ядыкину И.Б.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 7.90–2007. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Универсальная десятичная классификация. Структура, правила введения и индексирования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 26 с. [GOST 7.90 2007. Sistema standartov po informacii, bib-liotechnomu i izdatel'skomu delu. Universal'naja desjatic-naja klassifikacija. Struktura, pravila vvedeniya i indeksirovaniya. – M.: Standartinform, 2010. – 26 p. (In Russian)]
- Revised Field of Science and Technology (FOS) Classification in the Frascati Manual. – Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2007. – 12 p.
- Классификатор Российского научного фонда (РНФ). – URL: <https://rscf.ru/contests/classification> (дата обращения: 24.04.2024). [Klassifikator Rossijskogo nauchnogo fonda (RNF). – URL: <https://rscf.ru/contests/classification> (accessed April 24, 2024). (In Russian)]
- Государственный рубрикатор научно-технической информации. – URL: <https://grnti.ru> (дата обращения: 24.04.2024). – [Gosudarstvennyj rubrikator nauchno-tehnicheskoy informacii. – URL: <https://grnti.ru> (accessed April 24, 2024). (In Russian)]
- Кузнецов О.П., Суховеров В.С. Онтологический подход к оценке тематики научного текста // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 1. – С. 55–66. [Kuznetsov, O.P., Sukhoverov, V.S. Ontologicheskii podkhod k otsenke tematiki nauchnogo teksta // Ontologiya proektirovaniya. – 2016. – Vol. 6, no. 1. – P. 55–66. (In Russian)]
- Gruber, T.R. A translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5, no. 2. – P. 199–220.
- Borst, W.N. Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse: PhD Thesis. – Enschede: Centre for Telematics and Information Technology (CTIT), 1997.
- OWL 2 Web Ontology Language: Primer (Second Edition). Ed. by P. Hitzler, M. Krötzsch, B. Parsia, P.F. Patel-Schneider, S. Rudolph. – W3C, 2012. – URL: <http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-primer-20121211/>.
- Sengupta, K., Hitzler, P. Web Ontology Language (OWL) // Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining. – 2014. – P. 2374–2378.
- Губанов Д.А., Кузнецов О.П., Суховеров В.С., Чхартшвили А.Г. О построении профилей в тематическом пространстве теории управления // Материалы 9-й Международной конференции «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-2023). – Новосибирск, 2023. – С. 89–94. [Gubanov, D.A., Kuznetsov, O.P., Sukhoverov, V.S., Chkhartishvili, A.G. O postroenii profilei v tematicheskom pro-stranstve teorii upravleniya // Materialy 9-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Znaniya-Ontologii-Teorii» (ZONT-2023). – Novosibirsk, 2023. – P. 89–94. (In Russian)]
- Теория управления: словарь системы основных понятий. – М.: ЛЕНАНД, 2024. – 128 с. [Teoriya upravleniya: slovar' sistemy osnovnykh ponyatii. – M.: LENAND, 2024. – 128 p. (In Russian)]
- Губанов Д.А., Новиков Д.А. Анализ терминологической структуры теории управления // Управление большими системами. – 2024. (в печати) [Gubanov, D.A., Novikov, D.A. Analiz terminologicheskoi struktury teorii upravleniya // Large-Scale Systems Control. – 2024. (In Russian, in print)]
- Теория управления. Терминология. Вып. 107. – М.: Наука, 1988. – 56 с. [Teoriya upravleniya. Terminologiya. – Vol. 107. – M.: Nauka, 1988. – 56 p. (In Russian)]
- Karba, R., Kocijan, J., Bajd, T., et al. Terminological Dictionary of Automatic Control, Systems and Robotics. – Heidelberg: Springer, 2024. – 249 p.
- Glossary of Control Engineering Terms. – URL: www.act-control.com/glossary.
- Новиков Д.А., Новиков А.М. Методология научного исследования. – М.: Либроком, 2010. – 280 с. [Novikov, D.A., Novikov, A.M. Metodologiya nauchnogo issledovaniya. – M.: Librokom, 2010. – 280 p. (In Russian)]
- Gomes Junior, A. de A., Schramm, V.B. Problem Structuring Methods: A Review of Advances over the Last Decade // Syst. Pract. Action. Res. – 2022. – Vol. 35. – P. 55–88.

18. Tkaczyk, D., Szostek, P., Fedoryszak, M., et al. CERMINE: Automatic Extraction of Structured Metadata from Scientific Literature // *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*. – 2015. – Vol. 18, no. 4. – P. 317–335.
19. Krause, J., Shapiro, I., Saier, T., Farbe, M. Bootstrapping Multilingual Metadata Extraction: A Showcase in Cyrillic // *Proceedings of the Second Workshop on Scholarly Document Processing*. – Mexico, 2021. – P. 66–72.
20. Lopez, P. GROBID: Combining Automatic Bibliographic Data Recognition and Term Extraction for Scholarship Publications // *Research and Advanced Technology for Digital Libraries: 13th European Conference, ECDL*. – Corfu, 2009. – P. 473–474.
21. Wen, Y., Fan, C., Chen, G., et al. A Survey on Named Entity Recognition // *Communications, Signal Processing, and Systems*. – Singapore: Springer, 2020. – P. 1803–1810.
22. Mielke, S.J., Alyafeai, Z., Salesky, E., et al. Between Words and Characters: A Brief History of Open-Vocabulary Modeling and Tokenization in NLP // *arXiv:2112.10508*. – 2021. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.10508>.
23. Acs, J., Kadar, A., Kornai, A. Subword pooling makes a difference // *arXiv:2102.10864*. – 2021. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.10864>.
24. Liu, R., Mao, R., Luu, A.T., Cambria, E. A Brief Survey on Recent Advances in Coreference Resolution // *Artificial Intelligence Review*. – 2023. – Vol. 56. – P. 14439–14481.
25. Joshi, M., Levy, O., Weld, D.S., Zettlemoyer, L. BERT for coreference resolution: Baselines and analysis // *arXiv:1908.09091*. – 2019. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.09091>.

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

*Поступила в редакцию 14.05.2024,
после доработки 10.06.2024.
Принята к публикации 10.06.2024.*

Губанов Дмитрий Алексеевич – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ dmitry.a.g@gmail.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0099-3386>

Кузнецов Олег Петрович – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ olpkuz@yandex.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5061-3855>

Курако Евгений Александрович – канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ kea@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-4746-1943>

Лемтюжникова Дарья Владимировна – канд. физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН; МАИ (национальный исследовательский университет), г. Москва, ✉ darabbt@gmail.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5311-5552>

Новиков Дмитрий Александрович – д-р техн. наук, академик РАН, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ novikov@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9314-3304>

Чхартишвили Александр Гедеванович – д-р физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ sandro_ch@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2970-1244>

© 2024 г. Губанов Д. А., Кузнецов О. П., Курако Е. А., Лемтюжникова Д. В., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.



ISAND: AN INFORMATION SYSTEM FOR SCIENTIFIC ACTIVITY ANALYSIS (IN THE FIELD OF CONTROL THEORY AND ITS APPLICATIONS)

D. A. Gubanov*, O. P. Kuznetsov**, E. A. Kurako***, D. V. Lemtyuzhnikova****,
D. A. Novikov*****, and A. G. Chkhartishvili*****

*-*****Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
****Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*✉ dmitry.a.g@gmail.com, **✉ olpkuz@yandex.ru, ***✉ kea@ipu.ru, ****✉ darabtb@gmail.com,
*****✉ novikov@ipu.ru, *****✉ sandro_ch@mail.ru

Abstract. This paper describes the approaches underlying ISAND, an information system for scientific activity analysis in the field of control theory and its applications. ISAND is being developed at the Trapeznikov Institute of Control Sciences, the Russian Academy of Sciences. The ISAND ontology is oriented toward the representation and collection of knowledge in the field of control theory and its applications, namely, scientific knowledge (the ontology of control theory) and knowledge related to the scientific activity of agents (organizations, journals, conferences, and individual researchers) in this field. Based on this ontology, the ISAND architecture is a complex program system to collect, store, and analyze publications and their metadata from external sources. The ISAND algorithm for building the thematic profiles of scientific objects (publications, researchers, organizations, journals, and conferences), as well as ISAND text processing and network analysis capabilities, are presented. Finally, the main possibilities of using ISAND are considered.

Keywords: scientific activity analysis, control theory and its applications, information system, classification, ontology, thematic profile, thematic space, term, text processing, network analysis.

Acknowledgments. The authors are grateful to the following colleagues for their active participation in the project: Z.K. Avdeeva, R.P. Agaev, A.I. Alchinov, S.I. Antipin, A.V. Arutyunov, I.N. Barabanov, A.V. Batov, N.N. Bakhtadze, D.N. Bogacheva, V.N. Burkov, S.N. Vassilyev, V.M. Vishnevsky, S.S. Vladimirova, K.A. Vytovtov, M.S. Gavrilov, A.A. Galyaev, A.V. Golev, D.I. Grebenkov, O.I. Dranko, E.M. Dranov, L.Yu. Zhilyakova, A.O. Kalashnikov, K.A. Kalugin, G.N. Kalyanov, M.F. Karavay, D.R. Karpukhina, E.V. Karshakov, P.A. Kiryanov, A.A. Kozlova, S.A. Krasnova, S.A. Krasotkin, I.D. Kudinov, V.V. Kul'ba, A.A. Lazarev, A.R. Latipov, V.G. Lebedev, V.G. Lychagin, A.V. Makarenko, V.S. Melnichuk, D.O. Meshkov, R.V. Meshcheryakov, A.I. Mikhalsky, A.V. Nazin, R.M. Nizhegorodtsev, N.S. Oskolkov, L.B. Rapoport, A.A. Roshchin, E.Ya. Rubinovich, A.M. Salnikov, V.A. Sergeev, K.A. Sokolsky, D.D. Strygin, V.S. Sukhoverov, V.V. Sych, A.V. Tolok, V.A. Utkin, M.P. Farkhadov, D.N. Fedyanin, M.V. Khlebnikov, S.P. Khripunov, A.F. Sharafiev, M.A. Shekunov, A.V. Shchepkin, and I.B. Yadykin.

АЛГОРИТМ ЛОКАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ ДЛЯ ОБЪЕЗДА ПРЕПЯТСТВИЙ В ПУТЕВЫХ КООРДИНАТАХ

М. И. Макаров

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

✉ maxim.i.makarov@gmail.com

Аннотация. Представлен алгоритм локального планирования пути в системе координат дорожного полотна. Он основан на варьировании точек исходной траектории с применением метода потенциального поля и обеспечения гладкости получаемого пути относительно новой системы координат. Реализация алгоритма основывается на решении задачи минимизации целевого функционала. Рассматривается решение задачи применительно к планированию пути беспилотной транспортной платформы, для чего требуется изменять участки заранее подготовленной гладкой траектории движения транспортного средства в режиме реального времени с учетом возникающих препятствий и с сохранением гладкости. Использование новой системы координат дает преимущество во времени выполнения алгоритма по сравнению с его работой в декартовой системе координат. Алгоритм реализован на языке Python. Выделение горизонта планирования позволяет сочетать предложенный подход с различными алгоритмами следования по пути, которые сами по себе не реализуют методы объезда препятствий. Численное моделирование выполнено для характерных примеров, по которым можно оценить эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: планирование пути, система координат Френе, беспилотный транспорт.

ВВЕДЕНИЕ

С учетом последних достижений в области лидарной техники, высокопроизводительных графических процессоров и машинного обучения автономные технологии претерпевают революционные изменения, которые позволяют реализовать новые возможности. Особенно много внимания уделяется беспилотным транспортным платформам, для создания которых необходимо решить целый ряд как фундаментальных, так и прикладных задач, одной из которых является планирование пути. Задача состоит в том, чтобы, имея данные об окружающей среде, полученные с различных датчиков, построить локально оптимальный путь объезда препятствий в реальном времени, оставаясь в границах дорожного полотна и не сходя с исходного маршрута.

В робототехнике активно применяются подходы только глобального планирования пути, когда

заранее строится целевой маршрут, по линии которого робот должен двигаться. В таких случаях за объезд препятствий отвечают законы управления, работающие на борту робота [1]. В работе с крупными транспортными средствами (ТС), например автомобилями, и при появлении новых условий (таких, как ограничение на ширину полосы движения, динамические препятствия и высокая скорость движения) данные подходы становятся неприменимы в силу их вычислительной сложности. Современным подходом к преодолению описанных недостатков является декомпозиция задачи отдельно на локальное планирование пути и управление движением по этому пути. Локальное планирование учитывает данные об окружающей среде, полученные с датчиков, и строит локально оптимальный путь объезда препятствий с соблюдением всех требуемых ограничений. Решение же задачи управления должно обеспечить следование по этому локальному пути с минимальными отклонениями.

Планирование локального пути в декартовой системе координат (СК) оказывается не очень удобным в связи с трудностями описания взаимного расположения ТС, дороги и возникающих препятствий. В статье [2] вводится понятие системы координат Френе (путевой СК), в которой положение ТС задается как путь, пройденный вдоль заранее заданной гладкой кривой (опорной), и поперечное смещение относительно нее, что лучше и нагляднее описывает возможности маневров ТС в пределах дорожного полотна. Там же предлагается варьировать поперечное смещение с дискретным шагом, что отлично подходит для решения задач управления движением по автомобильным дорогам, так как оно может осуществляться только по заранее выделенным полосам. В случаях, когда полосы отсутствуют и движение возможно в любом месте дорожного полотна, задача локального планирования становится вычислительно сложной, так как шаг смещения становится мал и генерируется множество возможных траекторий для каждого из них. Другие подходы, лишенные этого недостатка, например те, что опираются на управление с прогнозирующими моделями (УПМ) [3], требуют как можно точнее воссоздать цифровую модель ТС, которым нужно управлять, что не всегда просто сделать на практике, особенно если предполагается использовать различные ТС. К тому же, громоздкий процесс перерасчета постоянно перезапускается, чтобы обеспечить точное следование по траектории, даже если на пути не появляются новые объекты.

В данной работе предполагается подход к решению задачи локального планирования пути в системе координат Френе, который лишен перечисленных выше недостатков. Решение задачи оптимизации с применением функции штрафа позволяет обеспечить объезд препятствий, сохранив гладкость получаемого пути, и свести шаг дискретности поперечного смещения к требуемой точности, обеспечив время работы алгоритма, применимое в реальном времени.

1. ПЕРЕХОДЫ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ

1.1. Путевая система координат

Система Френе (путевая СК) – это один из способов задать положение объекта на плоскости относительно опорной кривой с помощью двух ко-

ординат (s, d) , где s – длина дуги, отсчитываемая от начала опорной кривой (продольное смещение), а d – поперечное смещение относительно этой же кривой (рис. 1). Иными словами, происходит переход в систему координат, привязанную к дорожному полотну, где s – это длина дорожного полотна от начальной точки до текущей, а d – смещение относительно её центра. На рисунке положение автомобиля в системе Френе задается координатами $(2, 1)$. При движении по пути a_1 координата d на всем пути будет неизменной: $d = 1$.

Для перехода в систему Френе сначала нужно задать опорную кривую, которая и будет определять эту СК. Пусть имеется гладкая, трижды непрерывно дифференцируемая кривая в декартовой системе координат с натуральной параметризацией $p = p(s)$. Тогда существует отображение f , задающее преобразование радиус-вектора точек кривой декартовой системы координат в параметр s .

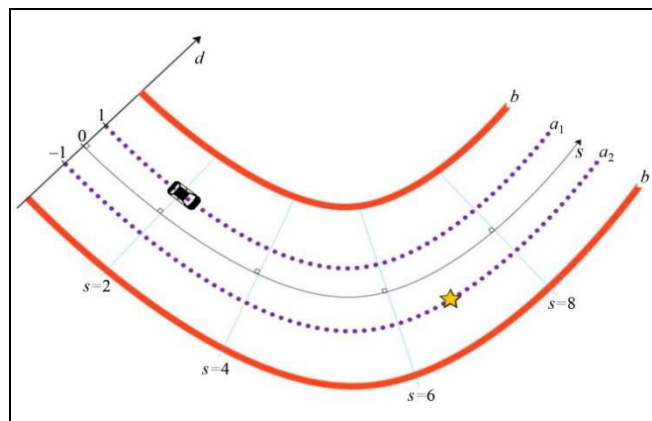


Рис. 1. Расположение объекта на дороге в системе координат Френе: s – опорная кривая, формирующая одну из осей, d – ось поперечного смещения относительно опорной кривой; b – границы дорожного полотна; a_1, a_2 – пути с постоянными координатами $d = 1$ и $d = -1$

1.2. Переход из декартовой системы в систему Френе

В декартовой системе координат положение любой точки исходной кривой определяется радиус-вектором $\vec{R}_p$ как это отображено на рис. 2. Положение точки кривой восстанавливается по параметру s .

Произвольная точка P с радиус-вектором $\vec{r}$ получается из сложения векторов $\vec{R}_p$ и $\vec{d}_p$, где $\vec{d}_p$ перпендикулярен касательной к опорной кривой в точке s_p , являющейся ближайшей к точке P .

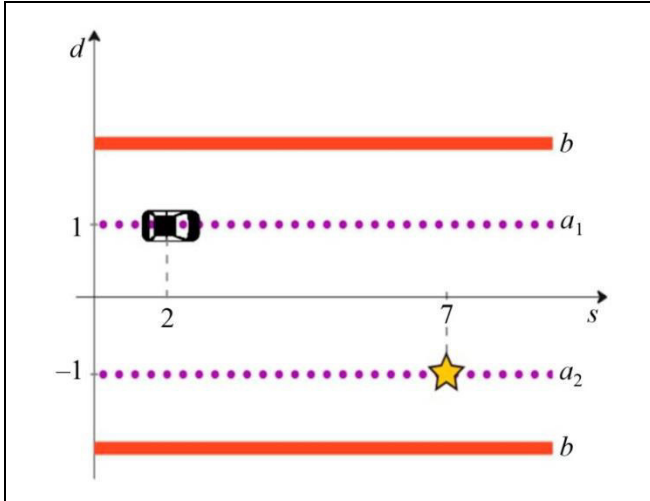


Рис. 2. Представление дороги, изображенной на рис. 1, в системе координат Френе: s – опорная кривая, задающая новую ось координат, d – нормаль к опорной кривой, формирующая вторую ось; b – границы дорожного полотна; a_1 , a_2 – пути с постоянными координатами $d = 1$ и $d = -1$

Введем $\theta_s(\vec{R}_p)$ – угол наклона касательной к опорной кривой в декартовой СК в точке S_p (рис. 3), θ_d – угол наклона вектора $\vec{d}_p$, тогда переход в путевую систему координат выглядит следующим образом:

$$s_p = f(\vec{R}_p),$$

$$d_p = \text{sign}(\theta_s - \theta_d) |\vec{d}|.$$

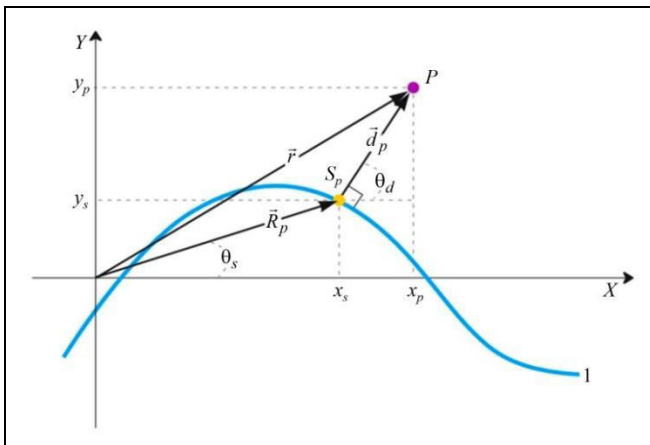


Рис. 3. Переход между декартовой СК и СК Френе: P – произвольная точка в пространстве, 1 – опорная кривая, S_p – ближайшая точка к P на опорной кривой

1.3. Переход из системы координат Френе в декартову систему координат

Поскольку итоговый путь должен быть представлен в декартовой системе координат, рассмот-

рим и обратный переход. Он получается путем определения координат точки опорной кривой в декартовой системе координат из параметризованного уравнения кривой и добавления поперечного смещения $\vec{d}$:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + |\vec{d}_p| \begin{bmatrix} -\sin \theta_d \\ \cos \theta_d \end{bmatrix}.$$

2. ПОСТРОЕНИЕ ГОРИЗОНТА В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ФРЕНЕ

Горизонтом будем называть упорядоченный набор координат фиксированного размера, являющийся частью глобального пути, для которого в данный момент времени выполняется локальное планирование. Длина горизонта определяется дальностью действия внешних сенсоров, передающих данные о внешних объектах, и вычислительными мощностями ЭВМ. Система координат Френе оказывается удобной для расчета горизонта. В данной СК все объекты задаются их положением на дорожном полотне, а значит, намного проще определять, лежит ли препятствие на текущей траектории движения, в том числе на искривленных участках траектории. В новой ортогональной СК горизонт аппроксимируется кубическими В-сплайнами.

Требуется построить горизонт таким образом, чтобы он обеспечивал объезд статических препятствий. В работе [4] рассматривается обход препятствий и сглаживание В-сплайновой кривой путем вариации точек в произвольном направлении в исходном декартовом пространстве. Воспользовавшись этими результатами, будем варьировать точки сплайна в полученной новой СК. Причем для уменьшения количества варьируемых переменных достаточно ограничиться вариацией только по оси d . Положение i -й точки в системе координат Френе будет иметь вид $q_i = (s_i, d_i^0 + d_i) = (s_i, \tilde{d}_i)$, где d_i – вариация поперечного смещения i -й координаты относительно опорной кривой.

Из результатов работ [4, 5] следует, что для уменьшения кривизны кривой относительно новой СК следует минимизировать сумму квадратов норм векторов $\tilde{d}_i - \tilde{d}_{i-1}$ и $\tilde{d}_{i-1} - 2\tilde{d}_i + \tilde{d}_{i+1}$, задающих соответственно первую и вторую производные функции, которой описывается кривая. Эта сумма записывается как

$$S(\tilde{d}_h) = \tilde{d}_h^T (H_1 + H_2) \tilde{d}_h, \quad (1)$$



где

$$H_1 = C_1^T C_1, H_1 \in R^{n \times n}, H_2 = C_2^T C_2, H_2 \in R^{n \times n},$$

$$\tilde{d}_h = \tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_n,$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, C_1 \in R^{(n-1) \times n},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, C_2 \in R^{(n-2) \times n}.$$

Для контроля подвижности отдельных точек вводится функционал штрафа за вариацию точек, определяемый формулой

$$P(d_h) = d_h^T D d_h, D \in R^{n \times n}, \quad (2)$$

где $d_h = d_1, d_2, \dots, d_n$ – поперечная вариация точек горизонта и D – диагональная матрица, элементы которой пропорциональны штрафу за вариацию соответствующей точки.

3. ОТТАЛКИВАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ

В данной работе рассматриваются только точечные препятствия, их объезд обеспечивается путем создания потенциального поля вокруг объекта в путевой СК. Каждый объект O_j в этой СК задается двумя координатами $(s^{(j)}, d^{(j)})$. Каждая точка планируемого горизонта h при этом тоже задается двумя координатами (s_i, d_i) ($s_h = s_1, s_2, \dots, s_n$). Тогда потенциал по всем объектам от всех точек горизонта имеет вид

$$U_{\text{hor}}(s_h, \tilde{d}_h) = \frac{1}{2} \eta \sum_{j=1}^{n_{\text{obj}}} \sum_{i=1}^n \exp(-(s^{(j)} - s_i)^2 + (d^{(j)} - \tilde{d}_i)^2), \quad (3)$$

где $\eta > 0$, n_{obj} – количество обнаруженных препятствий.

Таким образом, чем дальше точки горизонта находятся от обнаруженных препятствий, тем меньше величина потенциального поля.

4. ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИОНАЛ

Ранее уже были введены функции, задающие штрафы за кривизну и длину пути и сближение ТС с препятствием. В большинстве прикладных задач

также необходимо учитывать края дорожного полотна, что достигается ограничением допустимого диапазона вариации параметра d , причем для каждой точки можно указать свои границы, что особенно актуально в условиях разной ширины дорожного полотна. В тех случаях, когда границы дороги неизвестны, вводится штраф за отклонения от опорной кривой, что обеспечивает движение вблизи исходного глобального пути:

$$M(d_h) = d_h d_h^T. \quad (4)$$

С учетом выражений (1–4) целевой функционал будет иметь вид

$$\Phi_{\text{hor}}(s_h, d_h) = \frac{1}{2} S(d_h^0 + d_h) + \frac{1}{2} P(d_h) + U_{\text{hor}}(s_h, d_h^0 + d_h) + \gamma M(d_h^0 + d_h), \quad (5)$$

где $\gamma \geq 0$, $d_h^0 = d_1^0, d_2^0, \dots, d_n^0$ – начальные смещения выделенного горизонта относительно опорной кривой. В случае совпадения точек горизонта и опорной кривой $d_j^0 = 0 \quad \forall j \in 1, \dots, n$.

Отыскание горизонта сводится к задаче оптимизации (поиску минимума)

$$d_h^* = \operatorname{argmin}_{\{d_1, \dots, d_n\}} \Phi_{\text{hor}}(s_h, d_h),$$

$$D_i^l \leq (d_i^0 + d_i) \leq D_i^r, d_h^* \in R^n, \quad (6)$$

где $D_i^r \in R^n$ и $D_i^l \in R^n$ – матрицы расстояний от каждой точки опорной кривой до ближайшей к ней точки на правой и левой границе дорожного полотна соответственно.

Решение задачи минимизации функционала (5) может потребовать знания градиента этого функционала. Поскольку варьируются только поперечные смещения, соответствующие градиенты имеют вид

$$\nabla S(\tilde{d}_h) = 2(H_1 + H_2) \tilde{d}_h,$$

$$\nabla P(d_h) = 2P d_h,$$

$$\nabla M(\tilde{d}_h) = 2\tilde{d}_h,$$

$$\nabla U_{\text{hor}}(s_h, \tilde{d}_h) = - \sum_{j=1}^{n_{\text{obj}}} \sum_{i=1}^n \eta (d^{(j)} - d_i) \times \exp(-(s^{(j)} - s_i)^2 + (d^{(j)} - \tilde{d}_i)^2).$$

5. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГОРИЗОНТА

Основная идея алгоритма заключается в использовании в качестве начального приближения

горизонта, полученного на предыдущей итерации выполнения алгоритма, с перенесением начальных координат в текущее местоположение и последующим продлением пути до нужной длины (рис. 4). Под горизонтом H будем понимать упорядоченный набор векторов $h_i = (s_i, \tilde{d}_i)$:

$$H = \begin{bmatrix} h_1^T & h_2^T & \dots & h_N^T \end{bmatrix}^T \in R^{2 \times n}.$$

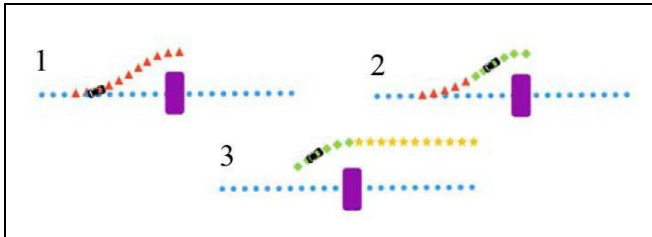


Рис. 4. Процесс формирования начального приближения для горизонта: круглые точки – опорная траектория; треугольные – горизонт, полученный на предыдущем этапе алгоритма; ромбы – точки, перенесенные в начало горизонта; звездочки – точки, дополняющие его до нужной длины

Инициализация. На вход подается заранее подготовленный массив из N точек, формирующий гладкую опорную кривую с равным расстоянием между соседними точками Δs [4]. Смещение вдоль опорной кривой для i -й точки массива будет таким: $s = i \Delta s$.

Шаг 1. Получаем местоположение ТС в декартовой системе координат.

Шаг 2. Обходя все точки опорной кривой, находим номер p ближайшей к положению ТС точки и расстояние d_p до нее $(s_p, d_p) = (p \Delta s, d_p)$.

Шаг 3. Инициализируем горизонт следующим образом:

$$H = \begin{bmatrix} s_p & s_p + \Delta s & \dots & s_p + (n-1) \Delta s \\ d_p & d_p & \dots & d_p \end{bmatrix}^T \in R^{2 \times n},$$

что характеризует движение вдоль опорной кривой с сохранением исходного поперечного отклонения.

Шаг 4. Повторяем шаги 1 и 2.

Шаг 5. Рассмотрим две возможные ситуации:

- Смещение вдоль опорной кривой оказалось вне текущего горизонта т. е. текущее смещение s_p не содержится в матрице H . Повторяем шаг 3.

- Положение ТС находится внутри текущего горизонта, т. е. текущее смещение s_p содержится в матрице H .

Введем индекс m координаты s в горизонте, соответствующий смещению s_p . Уберем все первые строки горизонта до $(m-1)$ -й включительно, переместив таким образом начало массива в строку, соответствующую координате s_p . Дополним горизонт до нужной длины, добавив в конец необходимые координаты s , продолжая оставшийся ряд с заданным шагом Δs и ставя в пару последнее известное поперечное смещение.

Шаг 6. Решаем поставленную задачу минимизации (6), используя алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS).

Шаг 7. Переводим полученные координаты горизонта H обратно в декартову систему координат. Передаем их на вход алгоритма следования по траектории.

Шаг 8. Повторяем шаги 4–7 алгоритма до тех пор, пока не достигнем конца опорной кривой. Для экономии вычислительных ресурсов запуск новой итерации алгоритма производится при появлении нового препятствия или уже при приближении к концу текущего горизонта за $0,1n$ точек до конца.

6. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Для тестирования предлагаемого алгоритма планирования будем использовать сторонний алгоритм следования по сгенерированному горизонту [6]. В качестве опорной кривой используется набор точек, полученных из прореженного набора координат GNSS-приемника, записанных в процессе движения ТС, переведенных в систему UTM и сглаженных методом, представленным в работе [4]. Здесь $D \in R^{n \times n}$ – диагональная матрица со значениями $\{25, 25, 0, 0\}$ на главной диагонали.

На рис. 5 показан путь, построенный с использованием значений параметров $\gamma = 0,5$, $\eta = 2$ и штрафа за отклонения от опорной кривой [3], поэтому траектория [1] все время стремится вернуться к опорной; ограничения на ширину дорожного полотна не учитывались.

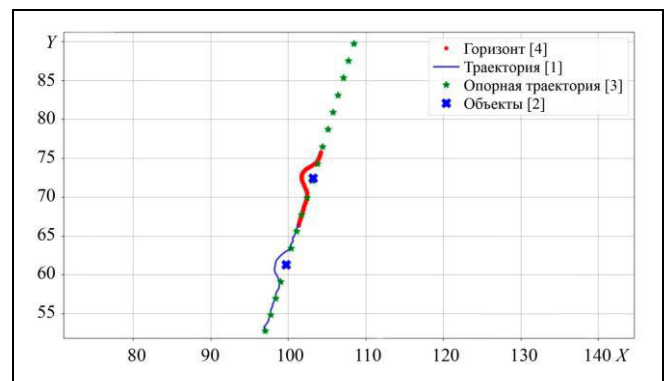


Рис. 5. Путь, пройденный ТС [1] по исходным точкам маршрута [3], с объездом точечных препятствий [2] и дальнейшим планируемым горизонтом [4] в UTM-координатах

На рис. 6 приведен случай, в котором снижено значение коэффициента, отвечающего за сближение с целевой траекторией, и введено ограничение на ширину дороги $\gamma = 0,001$, $\eta = 2$; $D \in R^{n \times n}$ – диагональная матрица со значениями $\{25, 25, 0, 0\}$ на главной диагонали. В этом случае было совершено перестроение для объезда препятствий и движение продолжилось на некотором удалении от исходной траектории.

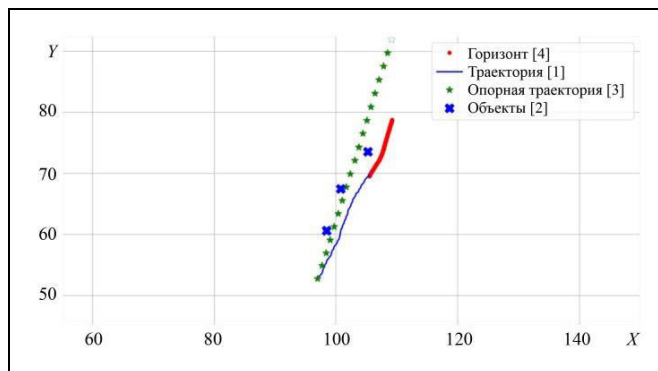


Рис. 6. Путь, пройденный ТС [1] по исходным точкам маршрута [3], с объездом точечных препятствий [2] и дальнейшим планируемым горизонтом [4] в UTM-координатах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача локального планирования пути для беспилотных транспортных средств в системе координат дорожного полотна с учетом точечных препятствий. Существующие методы локального планирования, такие как методы на основе потенциального поля и подходы, использующие прогнозирующие модели управления (УПМ), либо не обеспечивают достаточной гибкости при маневрах, либо требуют значительных вычислительных ресурсов для точного предсказания траектории. Существующие методы локального планирования никак не учитывают гладкость строящейся кривой.

Предложен алгоритм локального планирования горизонта в путевой системе координат, который позволяет эффективно обходить точечные препятствия. В отличие от традиционных методов, использующих декартову систему координат, данный алгоритм варьирует поперечное смещение вдоль опорной кривой в системе координат Френе, что улучшает вычислительную эффективность и упрощает обработку маневров.

На основе численных примеров показано, что алгоритм обеспечивает построение гладкого пути при наличии нескольких препятствий в реальном времени, эффективно демонстрируя точность и вычислительную простоту. Алгоритм также инте-

грируется с различными методами следования по траектории, которые не реализуют методы объезда препятствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гилимьянов Р.Ф., Рапопорт Л.Б. Метод деформации пути в задачах планирования движения роботов при наличии препятствий // Проблемы управления. – 2012. – № 1. – С. 70–76. [Rapoport, L.B., Gilimyanov, R.F. Path Deformation Method for Robot Motion Planning Problems in the Presence of Obstacles // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, no. 12. – P. 2163–2172.]
2. Basavanna, M., Shivakumar, M. An Overview of Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms in Mobile Robots // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2019. – Vol. 08, iss. 12.
3. Lu, B., Li, G., Yu, H., et al. Adaptive Potential Field-Based Path Planning for Complex Autonomous Driving Scenarios // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 225294–225305. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3044909.
4. Werling, M., Ziegler, J., Kammel, S., Thrun, S. Optimal Trajectory Generation for Dynamic Street Scenarios in a Frenet Frame. Proceedings // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Anchorage, 2010. – P. 987–993. – DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509799.
5. Гилимьянов Р.Ф., Пестерев А.В., Рапопорт Л.Б. Сглаживание кривизны траекторий, построенных по зашумленным измерениям в задачах планирования пути для колесных роботов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 5. – С. 148–156. [Gilimyanov, R.F., Pesterev, A.V., Rapoport, L.B. Smoothing Curvature of Trajectories Constructed by Noisy Measurements in Path Planning Problems for Wheeled Robots // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2008. – Vol. 47, no. 5. – P. 812–819.]
6. Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., et al. Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge // In: The 2005 DARPA Grand Challenge. Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol 36. Ed. by M. Buehler, K. Iagnemma, S. Singh. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – P. 1–43.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.Б. Рапопортом.

Поступила в редакцию 17.04.2023,
после доработки 13.05.2024.
Принята к публикации 21.05.2024.

Макаров Максим Игоревич – инженер, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва,
✉ maxim.i.makarov@gmail.com.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4854-5910>.

© 2024 г. Макаров М. И.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

A LOCAL PATH PLANNING ALGORITHM FOR AVOIDING OBSTACLES IN THE FRENET FRAME

M. I. Makarov

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

✉ maxim.i.makarov@gmail.com

Abstract. This paper presents a local path planning algorithm in the coordinate system of the roadbed. The algorithm is based on varying initial trajectory points using the potential field method and ensuring the smooth resulting path in a new coordinate system. This algorithm is executed by minimizing an objective functional. The problem is solved with application to path planning for an unmanned transport platform: it is necessary to change the vehicle's global smooth trajectory points in real time while maintaining smoothness and avoiding emerging obstacles. Compared to the Cartesian coordinate system, the new coordinate system is advantageous in terms of the execution time of the algorithm. The algorithm is implemented in Python. With a planning horizon being specified, this approach can be combined with various path-following algorithms that have no obstacle avoidance methods. Computer simulation results are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: path planning, Frenet coordinate system, unmanned vehicles.