

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1/2023

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф. Т. Алескеров, д-р техн. наук,
В. Н. Афанасьев, д-р техн. наук,
Н. Н. Бахтадзе, д-р техн. наук,
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,
В. М. Вишнеvский, д-р техн. наук,
А. О. Калашников, д-р техн. наук,
В. В. Клочков, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
Н. В. Кузнецов, д-р физ.-мат. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
В. В. Кульба, д-р техн. наук,
А. 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. Пашченко, д-р техн. наук
(зам. гл. редактора),
Л. Б. Рапопорт, д-р физ.-мат. наук,
С. В. Ратнер, д-р экон. наук,
Е. Я. Рубинович, д-р техн. наук,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. наук,
П. Ю. Чеботарёв, д-р физ.-мат. наук,
И. Б. Ядыкин, д-р техн. наук

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ

Владивосток – О. В. Абрамов, д-р техн. наук,
Волгоград – А. А. Воронин, д-р физ.-мат. наук,
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,
д-р техн. наук,
Самара – М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
Саратов – В. А. 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, Academician of RAS¹,
I. A. Kalyaev, Academician of RAS,
V. A. Levin, Academician of RAS,
N. A. Makhutov, Corr. Member of RAS,
A. F. Rezchikov, Corr. Member of RAS,
S. N. Vassilyev, Academician of RAS

EDITORIAL BOARD

V. N. Afanas'ev, Dr. Sci. (Tech.),
F. T. Aleskerov, Dr. Sci. (Tech.),
N. N. Bakhtadze, Dr. Sci. (Tech.),
V. N. Burkov, Dr. Sci. (Tech.),
P. Yu. Chebotarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
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.),
N. V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
O. P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Tech.),
A. A. Lazarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, Dr. Sci. (Tech.),
V. E. Lepskiy, 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, Academician of RAS,
Editor-in-Chief,
F. F. Pashchenko, Dr. Sci. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
B. V. Pavlov, Dr. Sci. (Tech.),
L. B. Rapoport, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. V. Ratner, Dr. Sci. (Econ.),
E. Ya. Rubinovich, Dr. Sci. (Tech.),
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: 28 февраля 2023 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

1.2023

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

- Кулида Е.Л., Лебедев В.Г.** Методы решения задач
планирования и регулирования потоков воздушного движения.
Ч. 1. Стратегическое планирование четырехмерных
траекторий 3

Управление в социально-экономических системах

- Варнавский В.Г.** Трансграничное углеродное регулирование
ЕС как инструмент глобального управления 15

Управление в медико-биологических системах

- Михальский А.И., Новосельцева Ж.А., Шестакова Т.П.**
Персонализация автоматической системы управления
уровнем глюкозы по реальным данным 26

- Давыдова Е.А., Бельская Е.Н., Постникова У.С., Тасейко О.В.**
Оценка рисков возникновения болезней системы
кровообращения от шумового воздействия на урбанизированных
территориях 36

Управление техническими системами и технологическими процессами

- Алхелу М., Вассуф Я., Коржуков М.В. и др.** Управление
активной подвеской автомобиля для обеспечения компромисса
между степенью демпфирования и управляемости 45

Хроника

- XXX Международная конференция «Проблемы управления
безопасностью сложных систем» 59**



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: February 28, 2023

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

1.2023

CONTENTS

Surveys

Kulida, E.L. and Lebedev, V.G. Methods for Solving Some
Problems of Air Traffic Planning and Regulation. Part I: Strategic
Planning of 4D Trajectories 3

Control in Social and Economic Systems

Varnavskii, V.G. European Union's Carbon Border Adjustment
Mechanism as a Global Governance Tool 15

Control in Medical and Biological Systems

Mikhalskii, A.I., Novoseltseva, J.A., and Shestakova, T.P.
Real Data-Based Personalization of an Automatic Glucose Control
System 26

**Davydova, E.A., Belskaia, E.N., Postnikova, U.S.,
and Taseiko, O.V.** Assessing the Risks of Circulatory Diseases
due to Noise Exposure in Urban Areas 36

Control of Technical Systems and Industrial Processes

Alhelou, M., Wassouf, Y., Korzhukov, M.V., et al. Managing
the Handling-Comfort Trade-off in the Full Car Model by Active
Suspension Control 45

Chronicle

30th International Conference on Problems of Complex Systems
Security Control 59

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ.

Ч. 1. Стратегическое планирование четырехмерных траекторий

Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев

Аннотация. Рассмотрены задачи повышения безопасности и эффективности организации воздушного движения. Особое внимание уделено перспективным методам обнаружения и разрешения конфликтов между воздушными судами. Приведена классификация этих методов. Рассмотрена задача минимизации числа потенциальных конфликтов при использовании перспективной технологии управления воздушным движением – стратегическом планировании четырехмерных траекторий. Представлена математическая модель учета неопределенности при стратегическом планировании четырехмерных траекторий, формальная постановка в виде задачи смешанного целочисленного программирования и подходы к ее решению. Для оценки целевой функции необходим подсчет числа потенциальных конфликтов между воздушными судами, который, при учете неопределенностей, требует особенно больших объемов вычислений. Рассмотрен альтернативный подход к оценке пропускной способности воздушного пространства, связанный со сложностью воздушного движения, зависящей от структуры трафика и геометрии воздушного пространства.

Ключевые слова: управление воздушным движением, стратегическое планирование четырехмерных траекторий, обнаружение и разрешение конфликтов воздушных судов.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозируемый рост объемов воздушного движения требует совершенствования системы управления воздушным движением (УВД). С целью разработки и внедрения новых концепций УВД реализуются проекты NextGen [1] в США и SESAR [2] в Европе. Основой новой организации УВД призваны стать стратегическое планирование четырехмерных траекторий (три пространственных координаты и время) и выдерживание назначенных четырехмерных траекторий с большой точностью при помощи автоматизированных систем управления полетами. Ожидается, что такой подход позволит увеличить пропускную способность воздушного пространства и повысить уровень автоматизации труда авиадиспетчеров при сохранении высокого уровня безопасности полетов.

Основной функцией систем УВД является разделение воздушных судов (ВС) с целью обеспече-

ния безопасности воздушного движения, обнаружение и разрешение конфликтов между ВС. Между ВС должны соблюдаться предписанные расстояния: N_v – для вертикального разделения, N_h – для горизонтального разделения за пределами зон аэропортов. В воздушном пространстве, ограниченном цилиндром вокруг ВС (рис. 1), не должны находиться другие ВС, в противном случае ВС считаются потенциально конфликтными, поскольку не обеспечивается необходимое минимальное расстояние разделения между ними.

В процессе разработки проектов автоматизации УВД была предложена концепция спецификации траекторий [3]. Основная идея спецификации траекторий заключается в ограничении положения ВС в любой момент полета точно определенным объемом воздушного пространства. Это пространство определяется допустимыми отклонениями от заданной опорной четырехмерной траектории. Допуски являются динамическими и зависят от летно-технических характеристик ВС и полетной си-

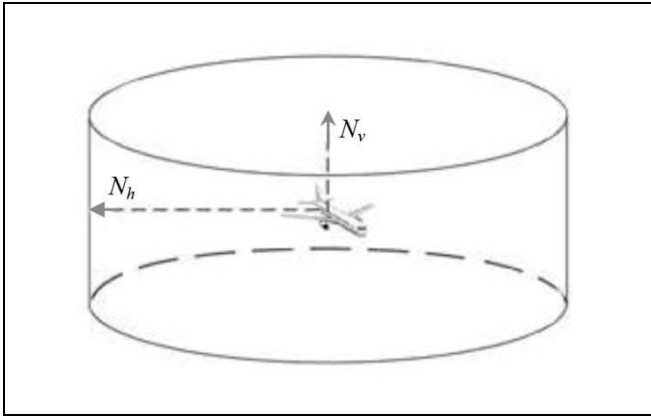


Рис. 1. Ограниченное пространство вокруг ВС, в котором не должны находиться другие ВС

туации. До тех пор, пока все ВС находятся в границах допустимых отклонений от опорной траектории, гарантировано безопасное разделение между ВС даже в случае отказа системы УВД или системы передачи данных в течение рассчитанного бесконфликтного временного горизонта. Этот бесконфликтный временной горизонт составляет порядка 10–15 мин.

Концепция спецификации траекторий должна опираться на совокупность наземного компонента системы УВД и бортового компонента управления полетами. Бортовой компонент предназначен для прогнозирования бесконфликтной траектории с учетом параметров полета ВС и траекторий окружающих ВС. Прогнозируемая траектория передается в наземный компонент, где она проверяется на наличие конфликтов с текущими назначенными траекториями других рейсов и при необходимости изменяется для устранения конфликтов и затем передается обратно в бортовой компонент в качестве назначенной траектории [4].

При стратегическом планировании потенциальные конфликты между ВС должны разрешаться заранее, чтобы тактическое управление в режиме реального времени, вызванное непредвиденным отклонением от назначенной траектории на маршруте, требовалось редко.

В настоящем обзоре приводится классификация методов обнаружения и разрешения конфликтов, применяемых в существующих системах автоматизации УВД. Рассматриваются различные подходы к решению задачи минимизации числа потенциальных конфликтов между ВС, в том числе с учетом неопределенности положения ВС. Для задачи больших масштабов стратегического планирования траекторий в европейском воздушном пространстве с целью уменьшения вычислитель-

ной сложности вместо подсчета количества ВС и числа потенциальных конфликтов между ними предлагается решать задачу снижения сложности воздушного движения. Одним из наиболее узких мест УВД является пропускная способность крупных аэропортов. В этой связи актуальна задача оптимизации последовательности ВС на посадку, решение которой позволит повысить эффективность использования имеющейся инфраструктуры. Во второй части обзора особое внимание уделяется работам, предлагающим применение нового перспективного подхода к решению этих задач, основанного на использовании глубокого обучения с подкреплением.

1. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ

В пилотируемой авиации предотвращение потери безопасного разделения между ВС обеспечивается авиадиспетчерами. На борту для предотвращения опасных ситуаций используется система предупреждения столкновений самолетов в воздухе TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System), а для предупреждения пилотов об угрозе столкновения с землей или с иным препятствием – система предупреждения о близости земли GPWS (Ground Proximity Warning System).

Большое количество научных работ посвящено методам решения задачи автоматизации обеспечения безопасного разделения между ВС. Одной из центральных проблем в этих методах является необходимость предсказания траекторий дальнейшего движения ВС. Поскольку при прогнозировании потенциальных конфликтов ВС необходимо учитывать случайные факторы, предлагались методы обнаружения конфликтов пары ВС на основе случайных процессов [5, 6]. Для более сложных сценариев воздушного движения предлагался алгоритм системы взаимодействующих частиц [7]. В работе [8] проблема обнаружения конфликтов ВС рассматривается как проблема бинарной классификации для обнаружения конфликта нескольких ВС, находящихся в свободном полете, т. е. имеющих свободу выбора своей траектории и скорости. Предлагается метод прогнозирования конфликтов в течение краткосрочного и среднесрочного времени с помощью метода распознавания образов.

В работе [9] сравниваются более ста методов обнаружения и разрешения конфликтов для пилотируемой и беспилотной авиации. Вводятся категории методов обнаружения конфликтов (табл. 1).



Таблица 1

Категории методов обнаружения конфликтов

Наблюдение	Централизованное зависимое Распределенное зависимое Независимое
Распространение траекторий	На основе текущего состояния ВС С учетом номинальных траекторий
Гипотеза прогнозирования	Номинальная Наихудший случай Вероятностная

Наблюдение за окружающими ВС может быть централизованным – через системы УВД с земли – или распределенным. При распределенном зависимом наблюдении ВС обмениваются параметрами о своем местоположении, высоте, идентификационных данных посредством канала передачи данных ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) без какого-либо вмешательства со стороны наземных систем. Беспилотной авиацией для обнаружения статических и динамических препятствий используется независимое наблюдение – бортовые системы/датчики, не взаимодействующие друг с другом.

Распространение траектории ВС может быть спрогнозировано на основе их текущего состояния или с учетом их номинальных траекторий. Распространение траектории на основе текущего состояния предполагает прямолинейную проекцию текущего положения ВС и вектора скорости. Однако, если будущие изменения траектории всех задействованных ВС не принимаются во внимание, могут возникать ложные тревоги, а возможные конфликты могут быть упущены из виду.

Оценка будущих положений ВС может быть номинальной, оценкой наихудшего случая и вероятностной. Номинальная оценка не учитывает неопределенности (т. е. поведение других ВС, ветер),

такую оценку формируют на короткий отрезок времени. Оценка наихудшего случая учитывает все возможные изменения траектории в результате неопределенностей. Однако это непрактично в реальной среде, поскольку приводит к большим вычислениям, большому количеству сигналов ложной тревоги и сокращает пространство для маневрирования. Чаще всего используется вероятностная оценка, которая учитывает вероятность каждого возможного изменения траектории на основе текущего положения, максимальных скоростей разворота и набора высоты.

Категории методов разрешения конфликтов представлены в табл. 2.

Управление разделением ВС может быть централизованным или распределенным. Централизованная система способна обеспечить глобальное решение сложных проблем для многих участников. В пилотируемой авиации УВД осуществляет централизованное обеспечение безопасности движения. В распределенной системе разделение обеспечивается отдельными ВС. Поскольку при распределенной системе предотвращения конфликтов каждое ВС учитывает только соседние ВС, ожидается, что она будет иметь меньшую вычислительную сложность. Рост количества беспилотных ВС также способствует развитию распределенных подходов. Главным недостатком распределенной системы является отсутствие глобальной координации со стороны окружающего трафика, что может отрицательно сказаться на безопасности. Ожидается, что внедрение технологии ADS-B позволит распределенной системе разрешения конфликтов гарантировать безопасное разделение ВС в воздухе.

Централизованные методы разделяются на две основные категории: точные и эвристические (метаэвристические). Для нахождения точного решения обычно используется смешанное целочисленное линейное программирование. Первый точный подход к глобальной оптимизации был представлен в 2002 г. [10], было предложено две модели

Таблица 2

Категории методов разрешения конфликтов

Управление разделением ВС	Категории методов управления	Разрешение конфликтов многих участников
Централизованное	Точный Эвристический	Последовательно Параллельно
Распределенное	Предписанный Реактивный Явное согласование	Последовательно попарно Попарно, суммированный Совместное решение

смешанного целочисленного линейного программирования: первая модель основана на управлении скоростью, а вторая – на управлении курсом. В работе [11] предлагается двухэтапный подход, при котором максимальное количество конфликтов сначала устраняется только с помощью контроля скорости, а неразрешенные конфликты устраняются с помощью контроля направления. В монографии [12] приводится обзор литературы по точным подходам к разрешению конфликтов. Этот обзор свидетельствует о том, что «...математическое программирование может сыграть существенную роль при разработке инструментов поддержки принятия решений для организации воздушного движения и, в частности, для устранения конфликтов с ВС. Однако после нескольких десятилетий усилий современным подходам все еще свойственны существенные ограничения, когда дело доходит до их реального применения... Будущие подходы, помимо удовлетворения вычислительных требований из-за необходимости решать задачи в режиме реального времени, должны будут учитывать более широкий набор характеристик, чем существующие модели. К ним относятся, среди прочего, способность справляться с неопределенностью, точное моделирование таких целей, как потребление энергии, устойчивость решения к сбоям и интеграция с погодными условиями.»

Точный алгоритм требует слишком большого объема вычислений, что обычно делает его неприменимым в реальной жизни. Эвристические (метаэвристические) алгоритмы, хотя и не гарантируют оптимального решения, часто используются для сокращения времени выполнения. Обычно применяются такие эвристические (метаэвристические) подходы, как поиск по переменной окрестности [13], оптимизация муравьиной колонии [14], эволюционные алгоритмы [15].

Распределенные подходы разделяются на три основные категории: предписанные, реактивные и разрешение путем согласования. В предписанных методах движение регулируется в соответствии с заранее определенным набором правил. В реактивных методах стратегия маневрирования определяется геометрией конфликта. Методы разрешения путем согласования устраняют конфликты с помощью явной связи между ВС [16]. Однако в любых переговорах существует риск тупика, когда ВС общаются бесконечно, не достигая соглашения. Количество взаимодействий должно быть ограничено, чтобы ВС не могло слишком долго вести переговоры или бесконечно ожидать данных от другого ВС.

В табл. 3 представлены основные особенности маневров разрешения конфликтов между ВС.

Таблица 3

Категории маневров разрешения конфликтов

Планирование уклонения	Стратегическое Тактическое Отвод
Маневр уклонения	Курс Скорость По вертикали План полета
Тип препятствия	Статические Динамические Все
Оптимизация	Траектория полета Время полета Потребление топлива/энергии

В зависимости от времени, на которое планируется маневр уклонения, прогнозирование может быть:

- стратегическое – это действие на большие расстояния, которое значительно изменяет траекторию полета;

- тактическое – это действие на средние расстояния, которое изменяет небольшую часть траектории полета;

- отвод – это краткосрочный маневр, который выводит ВС в безопасное место без дополнительного учета траектории полета.

Маневры для сохранения необходимого разделения между ВС могут быть основаны на изменении текущего курса, скорости, высоты полета, плана полета. Желательно чтобы количество выполняемых маневров и отклонение от первоначальной траектории было минимальным, при этом решение должно быть найдено в течение времени, имеющегося до потери минимального разделения между ВС.

В работе [9] утверждается, что в настоящее время большинство моделей включают тактическое планирование, распределенное управление и фокусируются на номинальном распространении траекторий на основе текущего состояния всех задействованных ВС. Отмечено, что для определения дальнейших путей улучшения методов необходимо получить более полное представление о том, как существующие методы работают в конкретных сценариях трафика.



2. ЗАДАЧА МИНИМИЗАЦИИ ЧИСЛА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОНФЛИКТОВ

2.1. Модель неопределенности положения воздушного судна

Рассматриваются дискретизированные четырехмерные траектории – последовательности четырехмерных координат, по которым проходит траектория ВС: (x, y, z, t) , где x – широта; y – долгота; z – высота; t – время.

На траекторию ВС может влиять большое количество случайных причин, таких как ветер, а также ошибки слежения, навигации и управления.

Для решения задачи стратегического планирования траекторий в работе [17] предлагается положение ВС рассматривать с учетом неопределенности в горизонтальной плоскости вдоль траектории. В дополнение к неопределенности в горизонтальной плоскости в работе [18] рассматривается неопределенность высоты полета и неопределенность времени прибытия в заданную точку.

Математическая модель неопределенности положения ВС вводится следующим образом (рис. 2).

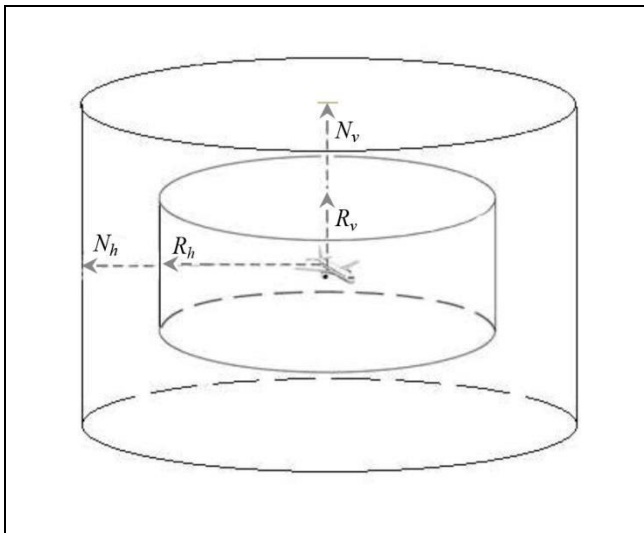


Рис. 2. Ограниченное пространство вокруг ВС с учетом неопределенности

Из-за неопределенности в момент времени t в горизонтальной плоскости ВС может находиться в круге установленного радиуса R_h с центром (x, y) :

$$\{(x^r, y^r) : (x^r - x)^2 + (y^r - y)^2 \leq R_h^2\}.$$

Вследствие этого радиус надежного минимального разделения ВС в горизонтальной плоскости

увеличивается на величину радиуса неопределенности:

$$N_h^r = N_h + R_h.$$

Аналогично неопределенность положения ВС в вертикальной плоскости определяется установленным радиусом неопределенности R_v :

$$|z - z^r| \leq R_v.$$

Таким образом, расстояние надежного минимального разделения в вертикальной плоскости с учетом величины неопределенности

$$N_v^r = N_v + R_v.$$

Неопределенность времени прибытия определяет t_E – максимальная временная ошибка.

Реальное время прибытия с учетом неопределенности

$$t^r \in [t - t_E, t + t_E].$$

Потенциальный конфликт между траекториями α и β с учетом неопределенности может возникнуть, если в точках P с координатами (x_P, y_P, z_P, t_P) и Q с координатами (x_Q, y_Q, z_Q, t_Q) на этих траекториях выполнены три условия:

- $\sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2} < N_h^r$,
- $|z_P - z_Q| < N_v^r$,
- $|t_P - t_Q| < 2t_E$.

На рис. 3 представлено пересечение траекторий в горизонтальной плоскости.

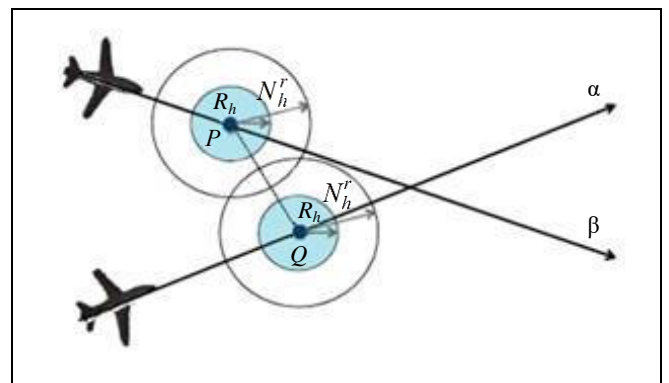


Рис. 3. Пересечение траекторий в горизонтальной плоскости

На рис. 4 представлены возможные сценарии пересечения траекторий самолетов α и β по времени. На верхней временной оси отражено время прибытия самолета α в точку P . Ниже представлено четыре возможных положения на временной оси времени прибытия самолета β в точку Q .

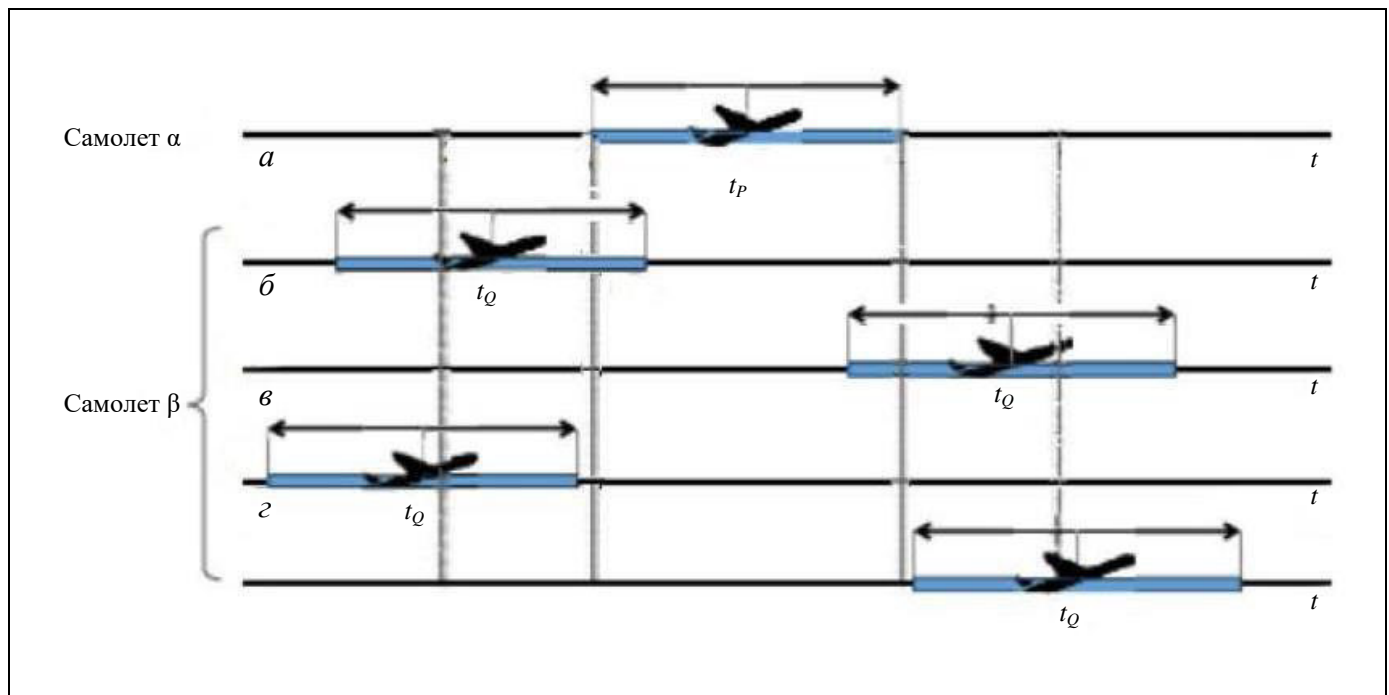


Рис. 4. Возможные сценарии пересечения траекторий по времени

В случаях *a*) и *б*) потенциальный конфликт возможен, в случаях *в*) и *z*) – нет.

Набор неопределенностей неявно описывает все возможные сценарии взаимодействия между ВС (подход наихудшего случая).

Задача минимизации числа потенциальных конфликтов при стратегическом планировании траекторий заключается в следующем: рассматривается набор всех четырехмерных траекторий полетов на определенный день в масштабах страны или континента. Для каждого полета предполагаются известными:

- набор возможных маршрутов в горизонтальной плоскости,
- набор возможных уровней высоты,
- набор возможных времен отправления,
- параметры неопределенности положения ВС и времени прибытия.

Потенциальные конфликты между ВС могут быть разрешены различными способами: с помощью изменения времен вылета, скоростей, высоты полетов или горизонтальных траекторий ВС, вовлеченных в конфликт, или комбинации этих способов.

Цель заключается в том, чтобы найти альтернативный набор четырехмерных траекторий с минимальным числом потенциальных конфликтов.

Предлагались формализации задачи минимизации числа потенциальных конфликтов в виде задачи смешанно-целочисленного линейного и нелинейного программирования. Однако высокие тре-

бования к памяти и времени вычислений из-за большого количества конфликтов, числа переменных и ограничений не позволяют получить оптимальные решения. Это породило большое количество различных подходов и эвристических методов приближенного решения задачи.

2.2. Минимизация числа потенциальных конфликтов в воздушном пространстве на основе изменения времени вылета

При организации воздушного движения должны удовлетворяться ограничения пропускной способности секторов воздушного пространства по маршруту – максимальное количество ВС, входящих в сектор за определенный период времени.

Одним из самых простых способов снижения нагрузки на систему УВД является отсрочка вылета рейсов, если превышены ограничения пропускной способности секторов воздушного пространства на маршруте. Однако отсрочки вылета могут привести к проблемам для авиакомпаний, поэтому их необходимо минимизировать.

В работе [19] предлагается подход к корректировке времен вылета на основе моделирования возможных конфликтных ситуаций между любыми двумя ВС и разрешения всех конфликтов вместо удовлетворения ограничений пропускной способности секторов. Однако необходимое разделение между ВС сохранится только в случае, если



ВС смогут точно следовать запланированным четырехмерным траекториям. При введении параметра неопределенности времени вылета и навигации количество необходимых задержек быстро возрастает, поэтому требуется дополнительно применять другие методы минимизации числа потенциальных конфликтов.

2.3. Минимизация числа потенциальных конфликтов регулированием скорости

В работе [20] исследуется возможность минимизации числа потенциальных конфликтов на основе регулирования скоростей в малом диапазоне (от -6% до $+3\%$ от первоначальной скорости) с сохранением исходных траекторий движения ВС. Предлагаются две модели смешанной целочисленной оптимизации для разрешения потенциальных конфликтов ВС на основе регулирования скорости, обсуждаются результаты решения при помощи решателя общего назначения COUENNE [21]. Однако для больших размерностей задачи высокие требования к памяти и времени не позволяют получить оптимальные решения. Предлагается эвристическая процедура для получения решения удовлетворительного качества, основанная на декомпозиции задачи на подзадачи, включающие небольшое количество самолетов, для которых может быть вычислено оптимальное решение. Понятие кластера, которое базируется на предположении, что в реальных ситуациях среди траекторий большого количества ВС лишь небольшие группы ВС с близкими траекториями потенциально попадают в конфликт, вводится в работе [22]. Затем полученные локальные решения объединяются.

2.4. Минимизация числа потенциальных конфликтов в воздушном пространстве на основе изменения запланированной траектории в горизонтальной плоскости

В работе [23] предлагается способ изменения первоначально запланированных траекторий в горизонтальной плоскости для решения задачи минимизации числа потенциальных конфликтов. Форма траектории ВС с номером $i = 1, \dots, N$ изменяется с помощью добавления дополнительных M равномерно расположенных вдоль первоначальной траектории путевых точек (рис. 5), в которых происходит боковое отклонение от первоначальной траектории:

$$w = \{w_i^j\}; j = 1, \dots, M.$$

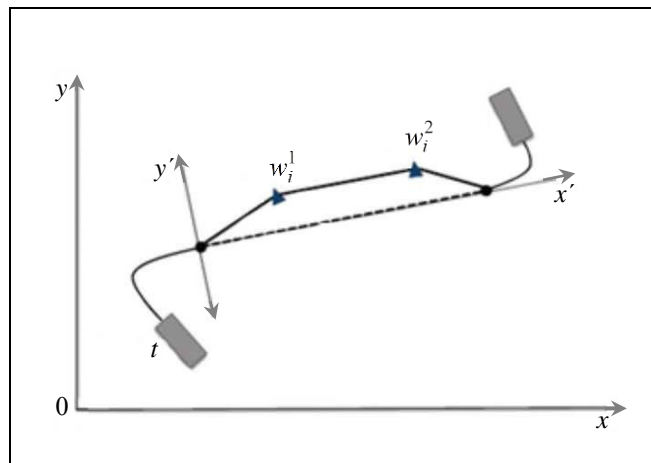


Рис. 5. Дополнительные путевые точки

Чтобы избежать резких поворотов, виртуальные путевые точки не должны располагаться слишком близко друг к другу.

Боковое отклонение ограничивается таким образом, чтобы длина маршрута не превысила заданные ограничения. Например, на рис. 6 при количестве виртуальных путевых точек $M = 2$ и количестве возможных отклонений $K = 7$ возникает $7^2 = 49$ возможных вариантов маршрута.

Максимальное допустимое боковое отклонение ограничивается таким образом, чтобы увеличение длины первоначальной траектории не превысило заданного пользователем значения, в пределах $w_{i,y}^j \in [-a_i, a_i]$, где $w_{i,y}^j$ – координата y j -й виртуальной путевой точки.

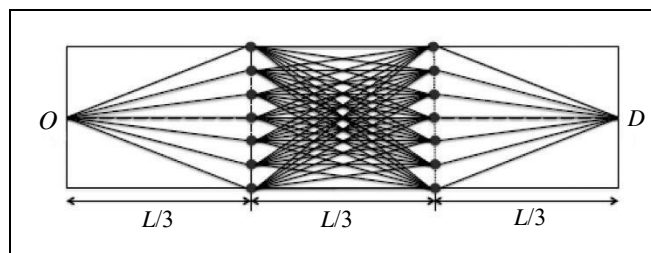


Рис. 6. Возможные варианты маршрута

2.5. Формулировка задачи смешанного целочисленного программирования

Задачу минимизации числа потенциальных конфликтов N дискретизированных четырехмерных траекторий для ВС можно сформулировать в виде задачи смешанного целочисленного программирования [18].

Переменные решения представляются в виде:

$$u = (\delta, \omega, l),$$

где $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N)$, δ_i – сдвиг времени вылета, который выбирается из равномерно дискретизированного интервала $[\delta_{i,\min}, \delta_{i,\max}]$; $t_i = t_{i,0} + \delta_i$ – время вылета i -го ВС, где $t_{i,0}$ – запланированное время вылета; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$, ω_i – координаты дополнительных путевых точек; $l = (l_1, l_2, \dots, l_N)$, l_i – сдвиг высоты полета i -го ВС; $i = \overline{1, N}$.

Пусть $\Phi_i(u)$ – число потенциальных конфликтов, с которыми сталкивается i -е ВС. Задача минимизации числа потенциальных конфликтов заключается в минимизации функции

$$\sum_{i=1}^N \Phi_i(u).$$

Поскольку пространство решений не является непрерывным, время решения экспоненциально растет с ростом размерности задачи N . Кроме того, переменные решения не являются независимыми из-за взаимодействия между рейсами.

Эта задача комбинаторной оптимизации является NP -трудной.

Для оценки целевой функции необходима методика обнаружения потенциальных конфликтов между ВС. Обнаружение конфликтов между траекториями с допусками требует значительно больших вычислений, чем обнаружение конфликтов между траекториями без допусков. При ненулевых допусках в каждый момент времени каждая точка в ограничивающем объеме воздушного пространства для одного рейса должна быть достаточно удалена от каждой точки в ограничивающем объеме воздушного пространства для другого рейса. При этом требуются алгоритмы обнаружения конфликтов почти в реальном времени.

Для реализации эффективного алгоритма обнаружения конфликтов необходимо избегать ненужных вычислений, когда разделение между ВС значительно больше минимально необходимого либо

по вертикали, либо по горизонтали, либо по времени.

Предлагается схема обнаружения конфликта на основе дискретизации воздушного пространства с помощью четырехмерной пространственно-временной сетки, т. е. в виде ряда трехмерных сеток с шагом дискретизации по времени (рис. 7) [23].

Размер ячеек сетки определяется нормами разделения ВС по соответствующим измерениям. Положение самолета связывается с соответствующей ячейкой в четырехмерной сетке. Каждая ячейка в этой сетке имеет $3^3 = 27$ соседних ячеек, включая саму эту ячейку. Потенциальные конфликты могут быть обнаружены путем проверки 27 соседних клеток для каждой непустой клетки в сетке.

Потенциальный конфликт выявляется, если либо одна клетка занята разными ВС, либо соседние клетки заняты разными ВС.

В работе [24] предлагается реализация алгоритма обнаружения конфликтов на графическом процессоре (GPU). Утверждается, что по сравнению с реализацией на процессоре CPU предлагаемый алгоритм сокращает время вычислений на два порядка.

2.6. Оценка сложности воздушного движения

Альтернативный подход к оценке пропускной способности воздушного пространства может быть связан не с количеством ВС и подсчетом конфликтов между ними, а со сложностью воздушного движения, зависящей от структуры трафика и геометрии воздушного пространства [25].

Показатель сложности, основанный на линейной динамической системе, адаптирован для оценки загруженности трафика за полный временной горизонт. Вместо простого подсчета количества ВС сложность движения, связанная с полетной ситуацией, может быть измерена с использованием векторов положения ВС и скорости.

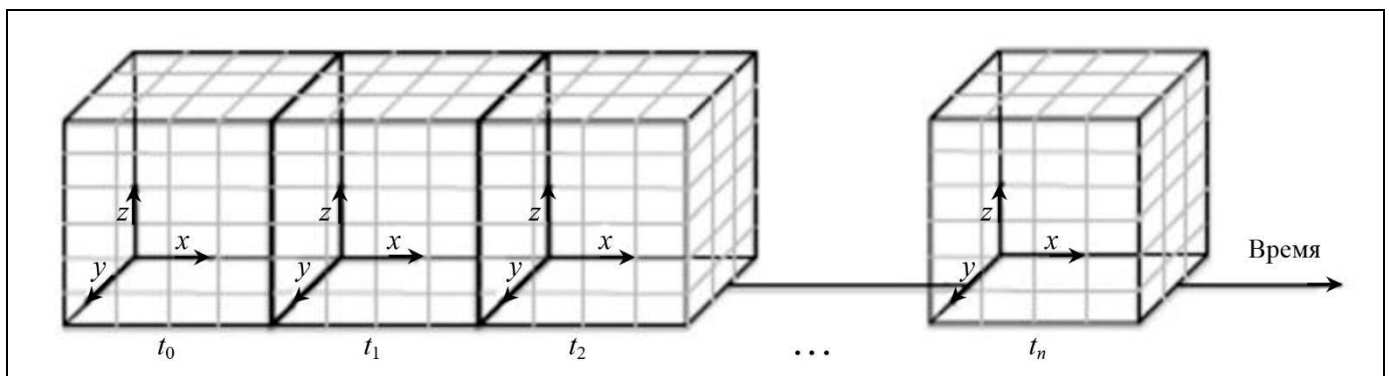


Рис. 7. Дискретизация воздушного пространства



Предположим, что в данный момент времени в данном районе присутствуют несколько ВС. Для каждого самолета мы рассматриваем два вектора наблюдения: измерение положения $X_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ и измерение скорости $V_i = [v_{x_i} \ v_{y_i} \ v_{z_i}]^T$.

Чтобы вычислить локальную сложность, связанную с данной полетной ситуацией, необходимо представить такую ситуацию в виде линейной динамической системы. Уравнение движения будет таким:

$$\dot{X}_i = AX_i + B,$$

где \dot{X}_i – оценочный вектор скорости, связанный с каждой точкой в пространстве состояний; X_i – вектор положения; матрица коэффициентов A – линейное отображение между \dot{X}_i и X_i , а вектор B представляет статическое поведение системы.

Чтобы определить точную модель динамической системы, наилучшим образом подходящую для наблюдений в пространстве состояний, необходимо найти матрицу A и вектор B , которые минимизируют ошибку между наблюдениями скорости и оцененными векторами скорости.

Расчет матрицы A и вектора B подробно описан в работе [26].

На основе матрицы A и ее собственных значений метрика локальной сложности определяется следующим образом:

- метрикой будет сумма в абсолютных значениях отрицательных действительных частей собственных значений;
- если ни одно из собственных значений не обладает отрицательной вещественной частью, метрика будет равна нулю.

С помощью этого определения измеряется интенсивность тенденции к сближению в полетной ситуации в данный момент времени.

Если метрика равна нулю, то сложность равна нулю, расходящиеся ВС не приведут к конфликтам в воздушном движении. Ненулевая метрика означает, что есть риск потенциальных конфликтов, более высокое значение показателя указывает на больший уровень риска.

Для получения метрики локальной сложности $\Psi_{i,k}$ для i -го ВС на k -й выборке траектории процесс начинается с определения дорожной ситуации вокруг i -го ВС путем рассмотрения соседних ВС в горизонтальном и вертикальном измерениях. Скорости и положения соседних ВС учитываются для вычисления метрики локальной сложности.

Обозначим набор собственных значений матрицы A i -го ВС на k -й выборке траектории

$$\Lambda_{i,k} = \{\lambda_{i,k}^{(1)}, \lambda_{i,k}^{(2)}, \dots, \lambda_{i,k}^{(N_e)}\},$$

$$\Psi_{i,k} = \sum_{n \in \mathcal{N}} |\operatorname{Re}\{\lambda_{i,k}^{(n)}\}|, \mathcal{N} = \{n: \operatorname{Re}\{\lambda_{i,k}^{(n)}\} < 0\}.$$

Локальная сложность вдоль траектории i -го ВС вычисляется следующим образом:

$$\Psi_i = \sum_{k=1}^{N_i} \Psi_{i,k},$$

где N_i – число выборок траектории i -го ВС.

Совокупная сложность для всех ВС в воздушном пространстве определяется следующим образом:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Psi_i = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_i} \Psi_{i,k}.$$

2.7. Гибридный метаэвристический подход к решению задачи

В работе [18] для решения задачи минимизации числа потенциальных конфликтов между ВС предложен алгоритм имитации отжига, но его применение требует большого количества оценок целевой функции, что приводит к очень большому количеству вычислений. Для ускорения сходимости в метод имитации отжига интегрирован метод локального эвристического поиска.

Гибридный метаэвристический подход основан на классическом алгоритме имитации отжига и двух различных модулях локального поиска. Локальный поиск позволяет активизировать поиск вокруг потенциального решения-кандидата, имитация отжига обеспечивает исследование пространства решений и позволяет системе избежать локальных минимумов, допуская случайные решения, которые ухудшают значение целевой функции. Предлагаемый гибридный алгоритм объединяет алгоритм имитации отжига и алгоритм локального поиска таким образом, что локальный поиск рассматривается как внутренний цикл алгоритма имитации отжига, который выполняется при определенных условиях.

Алгоритм имитации отжига заключается в следующем. Сначала оценивается целевая функция Φ_C для текущего решения. Затем случайным образом выбирается номер рейса для модификации и для него генерируется новое решение. Если это решение улучшает значение целевой функции, то оно принимается. В противном случае оно принимается с вероятностью $e^{-\Delta\Phi/T}$, где $\Delta\Phi = \Phi_N - \Phi_C$ – разность значений целевой функции для нового

состояния N и текущего состояния C . Когда достигается максимальное количество итераций n_T при заданной температуре T , температура снижается в соответствии с заданным пользователем расписанием, и процесс повторяется до тех пор, пока достигается заранее определенная конечная температура T_{final} .

В качестве модулей локального поиска выступают эвристические методы, новое решение принимается только в том случае, если оно приводит к уменьшению значения целевой функции. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено никаких дальнейших улучшений или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций $n_{T_{loc}}$.

Два модуля локального поиска соответствуют двум стратегиям:

- интенсификации поиска по одной конкретной траектории,
- интенсификации поиска по всем взаимодействующим с выбранной траекториям.

Для генерации нового решения определяется, следует ли изменять местоположение путевых точек или изменять время вылета. В целом, поиск решения с изменением времени вылета предпочтительнее, поскольку это не приводит к дополнительному расходу топлива. Однако эмпирические тесты показывают, что ограничение поиска только изменением времени вылета требует непомерно большого вычислительного времени. Поэтому вводится определяемый пользователем параметр P_w для управления вероятностью изменения местоположения путевых точек, а вероятность изменения времени вылета равна $1 - P_w$.

Ключевым фактором в настройке этого гибридного алгоритма является достижение хорошего компромисса между исследованием и эксплуатацией пространства решений, т. е. компромисса между тонкой сходимостью к локальным минимумам и временем вычислений, затрачиваемым на исследование всего пространства поиска.

2.8. Результаты моделирования

Предложенный алгоритм был протестирован с использованием данных о воздушном трафике в европейском воздушном пространстве [18]. Были исследованы и сопоставлены две стратегии локального поиска. Численные результаты показали, что последовательное использование обеих стратегий, сначала для одной конкретной траектории, а затем для всех взаимодействующих с ней траекто-

рий требует на 40% меньше времени вычислений, чем при использовании каждой стратегии в отдельности.

Исследовалось влияние количества виртуальных путевых точек на время разрешения. Несмотря на увеличение богатства пространства решений, использование большего количества виртуальных путевых точек приводит к увеличению количества вариантов в пространстве поиска, что приводит к увеличению времени вычислений и результирующие траектории включают нежелательные зигзаги.

Численные результаты показали также, что одного использования сдвигов времени вылета недостаточно для получения решений без потенциальных конфликтов. Аналогично, изменение только формы траектории также недостаточно и требует непомерно большого времени вычислений. Когда допускаются изменения как времени вылета, так и формы траектории, то увеличивается богатство пространства решений и оптимальное (без взаимодействия) решение может быть получено за значительно меньшее время вычислений.

Влияние ограничений оптимизации (максимальное смещение времени отправления и максимальное увеличение длины маршрута) было также изучено. Как и ожидалось, при ослаблении таких ограничений проблема может быть решена за меньшее время вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение нескольких десятилетий проводились обширные исследования по проблеме автоматизации поддержки принятия решений в системах УВД. Математические модели, разработанные в связи с этой проблемой, основаны либо на минимизации числа потенциальных конфликтов между четырехмерными траекториями ВС, либо на перераспределении потоков ВС с целью уменьшения перегрузки воздушного пространства. Для уменьшения числа потенциальных конфликтов между ВС в основном используется одно или несколько из следующих действий: задержки вылета рейсов, регулирование скорости в воздухе, изменение траекторий полета, изменение уровня высоты полета.

Было показано, что задача минимизации числа потенциальных конфликтов между ВС является NP -трудной. Это привело к появлению различных метаэвристических алгоритмов для ее решения. Для стратегического планирования потока ВС с учетом неопределенности положения ВС был разработан гибридный метаэвристический подход на основе алгоритма имитации отжига, улучшенный методами локального поиска.



Сложность и масштабность задачи минимизации числа потенциальных конфликтов в воздушном пространстве требует поиска новых подходов к ее решению. В последние годы появились работы, посвященные применению методов глубокого обучения с подкреплением для решения задач, связанных с повышением безопасности и эффективности организации воздушного движения. Подробнее эти работы будут рассмотрены во второй части настоящего обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *The Next Generation Air Transportation System (NextGen). Concept of Operations.* – Washington, DC: Joint Planning & Development Office, 2011.
2. *Sesar Joint Undertake. European ATM Master Plan.* – Brussels, Belgium: SESAR, 2020.
3. *Paielli, R.A. Trajectory Specification for High-Capacity Air Traffic Control // Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication.* – 2005. – Vol. 2, no. 9. – P. 361–385. – DOI: 10.2514/1.12335
4. *Paielli, R.A., Erzberger, H. Trajectory Specification for Terminal Airspace: Conflict Detection and Resolution // Journal of Air Transportation.* – 2019. – Vol. 27, no. 2.
5. *Paielli, R.A., Erzberger H. Conflict Probability Estimation for Free Flight // Journal of Guidance, Control, and Dynamics.* – 1997. – Vol. 20, no. 3. – P. 588–596.
6. *Paielli, R.A., Erzberger H. Conflict Probability Estimation Generalized to Non-level Flight // Air Traffic Control Quarterly.* – 1999. – Vol. 7, no. 3. – P. 195–222.
7. *Jacquemart, D., Morio, J. Adaptive Interacting Particle System Algorithm for Aircraft Conflict Probability Estimation // Aerospace Science and Technology.* – 2016. – Vol. 55. – P. 431–438.
8. *Jiang, X.R., Wen, X.X., Wu, M.G., et al. A SVM Approach of Aircraft Conflict Detection in Free Flight // Journal of Advanced Transportation.* – 2018. – No. 4. – P. 1–9.
9. *Ribeiro, M., Ellerbroek, J., Hoekstra, J. Review of Conflict Resolution Methods for Manned and Unmanned Aviation // Aerospace.* – 2020. – Vol. 7, no. 79. – DOI: 10.3390/aerospace7060079.
10. *Pallottino, L., Feron, E., Bicchi, A. Conflict Resolution Problems for Air Traffic Management Systems Solved with Mixed Integer Programming // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* – 2002. – No. 3. – P. 3–11.
11. *Cafieri, S., Omheni, R. Mixed-Integer Nonlinear Programming for Aircraft Conflict Avoidance by Sequentially Applying Velocity and Heading Angle Changes // European Journal of Operational Research.* – 2017. – Vol. 260. – P. 283–290.
12. *Pelegri, M., d'Ambrosio, C. Airspace Conflict Resolution: A Unifying Mathematical Framework and Review // HAL.* – 2021. – URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02902566/>.
13. *Alonso-Ayuso, A., Escudero, L.F., Martin-Campo, F.J., Mladenovic, N. A VNS Metaheuristic for Solving the Aircraft Conflict Detection and Resolution Problem by Performing Turn Changes // Journal of Global Optimization.* – 2014. – Vol. 63 – P. 583–596.
14. *Liu, H., Liu, F., Zhang, X., et al. Aircraft Conflict Resolution Method Based on Hybrid Ant Colony Optimization and Artificial Potential Field // Science China Information Sciences.* – 2018. – Vol. 61. – Art. no. 129103.
15. *Allignol, C., Barnier, N., Durand, N., Alliot, J.M. A New Framework for Solving En Route Conflicts // Air Traffic Control Quarterly.* – 2013. – Vol. 21, no. 3. – P. 233–253. – DOI: 10.2514/atcg.21.3.233
16. *Sislak, D., Volf, P., Pechoucek, M. Agent-Based Cooperative Decentralized Airplane-Collision Avoidance // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* – 2011. – Vol. 12. – P. 36–46.
17. *Chaimatanan, S., Delahaye, D., Mongeau, M. A Hybrid Metaheuristic Optimization Algorithm for Strategic Planning of 4D Aircraft Trajectories at the Continental Scale // IEEE Computational Intelligence Magazine.* – 2014. – Vol. 9, no. 4. – P. 46–61.
18. *Chaimatanan, S., Delahaye, D., Mongeau, M. Aircraft 4D Trajectories Planning under Uncertainties // Proceedings of 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2015).* – Cape Town, South Africa. – 2015. – P. 51–58.
19. *Barnier, N., Allignol, C. 4D – Trajectory Deconfliction Through Departure Time Adjustment // 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. ATM 2009.* – Napa, USA, 2009.
20. *Cafieri, S., Durand, N. Aircraft Deconfliction with Speed Regulation: New Models from Mixed-Integer Optimization // Journal of Global Optimization.* – 2014. – Vol. 58, no. 4. – P. 613–629.
21. *Belotti, P., Lee, J., Liberti, L., et al. Branching and Bounds Tightening Techniques for Non-convex MINLP // Optimization Methods and Software.* – 2009. – Vol. 24(4). – P. 597–634.
22. *Granger, G., Durand, N. A Traffic Complexity Approach through Cluster Analysis // Proceedings of the 5th ATM Research and Development Seminar.* – Budapest, Hungary, 2003.
23. *Chaimatanan, S., Delahaye, D., Mongeau M. Strategic Deconfliction of Aircraft Trajectories // ISIATM 2013, 2nd International Conference on Interdisciplinary Science for Innovative Air Traffic Management.* – Toulouse, France, 2013.
24. *Alligier, R., Durand, N., Alligier, G. Efficient Conflict Detection for Conflict Resolution // ICRAT 2018, 8th International Conference on Research in Air Transportation.* – Castelldefels, Spain, 2018.
25. *Delahaye, D., Puechmorel, S. New Trends in Air Traffic Complexity // ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC).* – Tokyo, Japan, 2009. – P. 55–60.
26. *Delahaye, D., Paimblanc, P., Puechmorel, S. et al. A New Air Traffic Complexity Metric Based on Dynamical System Modelization // IEEE/AIAA 21st Digital Avionics Systems Conference – Vol. 1. – Inst. of Electrical and Electronics Engineers. – Irvine, USA, 2002.*

Статья представлена к публикации членом редколлегии
А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 10.11.2022,
после доработки 19.12.2022.
Принята к публикации 20.12.2022.

Кулида Елена Львовна – канд. техн. наук,
✉ elena-kulida@yandex.ru,

Лебедев Валентин Григорьевич – д-р техн. наук,
✉ lebedev-valentin@yandex.ru,

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

METHODS FOR SOLVING SOME PROBLEMS OF AIR TRAFFIC PLANNING AND REGULATION.

Part I: Strategic Planning of 4D Trajectories

E.L. Kulida¹ and V.G. Lebedev²

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

¹✉ elena-kulida@yandex.ru, ²✉ lebedev-valentin@yandex.ru

Abstract: This paper considers the problems of improving the safety and efficiency of air traffic flows. Particular attention is paid to promising methods for detecting and resolving aircraft conflicts. These methods are classified. We study the problem of minimizing the number of potential conflicts with a promising air traffic control technology, the strategic deconfliction of 4D trajectories. We present a mathematical model to consider uncertainty in the strategic deconfliction of 4D trajectories, a corresponding formal statement as a mixed integer programming problem, and some approaches to solve this problem. Estimating the objective function requires calculating the number of potential conflicts between aircraft. Under uncertainty, this estimation involves a large amount of computations. We discuss an alternative approach to airspace capacity estimation based on air traffic complexity depending on the traffic structure and geometry of the airspace.

Keywords: air traffic management, strategic deconfliction of 4D trajectories, detection and resolution of aircraft conflicts.

ТРАНСГРАНИЧНОЕ УГЛЕРОДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЕС КАК ИНСТРУМЕНТ ГЛОБАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.Г. Варнавский

Аннотация. Рассматривается система управления выбросами парниковых газов (ПГ), которая включает в себя международную компоненту и предусматривает введение платежей при импорте углеродоемких товаров. В качестве примера проанализирован механизм трансграничного углеродного регулирования Европейского союза (англ. *Carbon Border Adjustment Mechanism*, СВАМ), который должен начать реализовываться в 2023 г. Показан его глобальный охват по числу стран и компаний. Дан подробный обзор имеющейся научной литературы по математическим методам анализа и оценки последствий применения СВАМ для социально-экономического развития. Отмечается, что трансграничное регулирование выбросов ПГ предоставляет широкие возможности для применения математических методов анализа, проведения расчетов и моделирования. Выделены классы моделей для исследования СВАМ, такие как DSGE-модели, межстрановые межотраслевые балансы, игровые модели и пр. Показаны их возможности для проведения экономического анализа. Особое внимание уделено моделям анализа глобальных производственных цепочек. По нормативным документам ЕС составлена блок-схема системы управления в СВАМ, дан анализ ее основных блоков, участников и связей. Представлена и проанализирована математическая модель, которая используется Евросоюзом для проведения расчетов выбросов ПГ. Сделан вывод о том, что с введением СВАМ фундаментальная и прикладная экономическая наука получают новую, широкую предметную область экономико-математических исследований, в том числе и по управлению трансграничными рынками ПГ.

Ключевые слова: трансграничное углеродное регулирование, выбросы парниковых газов, Европейский союз, глобальное управление, модели, математические методы.

ВВЕДЕНИЕ

Экономическая политика по углеродному регулированию и управлению выбросами парниковых газов (ПГ) начала складываться в мире под эгидой ООН еще в 1970-е гг. (Декларация Конференции Организации Объединенных Наций по проблемам окружающей человека среды, 1972 г.; Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, 1979 г.). За прошедшие с тех пор десятилетия были и серьезные прорывы в решении климатической проблемы, и достижения, в частности, в сфере энергосбережения, энергоэффективности, в снижении удельных выбросов ПГ в расчете на одного жителя планеты и на единицу мирового валового внутреннего продукта. Наблюдались и провалы, прежде всего связанные с неоправдавшимися прогнозами Римского клуба в отношении решения глобальных проблем человечества и с

«утечкой углерода» (*carbon leakage*), под которой понимаются два взаимосвязанных процесса. С одной стороны, это вызванный жесткой климатической политикой одних стран перенос производства в другие страны с менее жесткими ограничениями на выбросы. С другой – это увеличение импорта более дешевой продукции, в том числе по причине низкого углеродного налога в зарубежных, чаще всего – развивающихся странах [1, с. 89].

В 2000-е гг. концепция регулирования отношений в сфере хозяйственной деятельности, которая сопровождается выбросами ПГ, получила дальнейшее развитие в форме монетизации выбросов и создания рынков парниковых газов. Первым в мире систему торговли выбросами реализовал Европейский союз (ЕС). Произошло это в 2005 г., когда в странах союза была введена система платежей за выбросы ПГ – The European Union Emissions Trading System (EU ETS). Тем самым, было поло-

жено начало созданию рынка парниковых газов на европейском пространстве. В последующем на основе межправительственных соглашений к этой системе присоединились также Норвегия, Исландия и Лихтенштейн [2, с. 18].

В настоящее время EU ETS покрывает примерно 36 % выбросов парниковых газов в странах-участницах [3, с. 5]. Для нее создана мощная система управления, мониторинга и контроля, которая включает органы государственной власти, структурные подразделения производственных предприятий, ответственных за участие в EU ETS, брокерские, посреднические, аудиторские и иные компании.

Апробированную в течение полутора десятилетий систему EU ETS предполагается распространить на отслеживание выбросов ПГ в процессе производства продукции, включая добычу сырья, использование энергии, материалов, полуфабрикатов и других промежуточных продуктов («углеродного следа») в импортируемых в ЕС товарах в форме трансграничного углеродного регулирования (англ. *Carbon Border Adjustment Mechanism*, СВАМ). Соответствующее предложение направлено Европейской комиссией на согласование в другие руководящие органы союза и в страны-участницы 14 июля 2021 г. [1] (далее – базовый документ). Реализация этого предложения должна начаться в 2023 г.

Механизм СВАМ глобален по своему охвату стран и компаний. География экспортеров в ЕС продукции «грязных» отраслей, подпадающих под его действие уже на первом этапе, т. е. с 2023 г., – это почти весь мир: железо и сталь поставляют в ЕС 160 стран, алюминий – 175, цемент – 86, удобрения – 98 (рассчитано по данным портала Trade Map [4]).

Цель данной статьи состоит в анализе СВАМ как первой и единственной пока в международной практике системы глобального управления выбросами парниковых газов. Автор ставит перед собой следующие конкретные задачи: обоснование глобального характера СВАМ и построение блок-схемы системы управления СВАМ с характеристикой ее основных элементов и связей между ними; обобщение современных подходов к моделированию регулирования трансграничных выбросов; обзор математических методов и моделей, используемых для оценки экономических эффектов от введения СВАМ; анализ математической модели определения выбросов в рамках СВАМ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Концепция использования рынка в сфере выбросов ПГ была предложена и разработана в 1960-е гг. экономистом из США Томасом Крокером и канадцем Джоном Дейлсом [5]. Согласно их подходу, государство выдает разрешения компаниям «грязных» отраслей и производств на определенный объем выбросов. Дж. Дейлс тогда же предложил точный, с точки зрения автора, термин для характеристики нового инструмента регулирования выбросов – «рынки прав на загрязнение», гораздо более корректный и соответствующий действительности, чем используемые сейчас в российской науке понятия «торговля выбросами» или «торговля квотами на выбросы» по одной простой причине – выбросы не являются товаром и, соответственно, торговать ими нельзя. Указанная концепция Т. Крокера и Дж. Дейлса стала одним из важных направлений теории социальных издержек, сформулированной также в начале 1960-х гг. Рональдом Коузом, который получил за нее Нобелевскую премию в 1991 г.

Однако до сих пор вопрос о том, насколько подход, основанный на рыночных правах, может применяться для повышения эффективности экологического регулирования, остается открытым. Пока не доказано, является ли прямое государственное налогообложение загрязняющих экологию компаний менее или более эффективным в сравнении с рынком выбросов.

Идея управления выбросами в международной торговле или трансграничного мониторинга и контроля парниковых газов в импортируемых товарах СВАМ обсуждалась в ЕС и в мире более десяти лет, еще со времен кризиса 2008–2009 гг. Но формально она была заявлена в 2019 г. в составе так называемой «Зеленой сделки» (*The Green Deal*) [6] и сразу вызвала оживленную дискуссию о возможностях и легитимности трансграничного регулирования. Главной темой обсуждения стало установление фактического контроля ЕС в части эмиссии ПГ за предприятиями в третьих странах, т. е. находящихся вне юрисдикции Брюсселя.

В основе торговли выбросами лежит широко применяемый в рыночной экономике принцип «ограничения и торговли» (*cap-and-trade*) [2, с. 5]. Заключается он в том, что правительство устанавливает верхний предел допустимых выбросов ПГ в виде квот, которые бесплатно или за деньги предоставляются компаниям, осуществляющим выбросы



ПГ в атмосферу. Если компания производит выбросов меньше выделенной квоты, она может продавать их излишки на рынке, если больше – приобретать соответствующие сертификаты (разрешения) по рыночным ценам. Теоретически это создает ситуацию, в которой выбросы будут сокращены благодаря тому, что компании проводят оптимальную и наиболее экономически эффективную инвестиционную политику.

Тем самым реализация принципа «ограничения и торговли» и введение системы управления выбросами в международной практике открывает широкие возможности для проведения разнообразных фундаментальных и прикладных исследований с применением математических и численных методов моделирования углеродного рынка, проведения имитационных, оптимизационных, прогнозных расчетов. Цели создаваемых моделей могут быть самыми различными – от оценки эффективности государственной экономической политики в области углеродного регулирования до решения практических задач бизнеса по снижению издержек по уплате трансграничного углеродного налога. Компании, заинтересованные в получении дополнительных доходов, могут разрабатывать оптимальные рыночные стратегии углеродных платежей, позволяющие им не только минимизировать соответствующие расходы, но и зарабатывать на торговле выбросами.

Предпосылки широкого использования математического инструментария в решении задач трансграничного углеродного регулирования просматриваются уже на уровне концептуальных положений трансграничной торговли выбросами. В теории цели международного рынка выбросов заключаются в том, чтобы, прежде всего, добиться снижения выбросов парниковых газов экономически эффективным способом с помощью межстрановой конкуренции и, кроме того, стимулировать инвестиции производственных компаний в технологии, снижающие выбросы ПГ.

Принцип «ограничения и торговли» предопределяет проведение анализа разнообразных игровых, имитационных, оптимизационных ситуаций и широкое использование соответствующих моделей в процессе выработки и принятия компаниями инвестиционных решений. Кроме производственных компаний, участвующих в EU ETS, математические методы и инструментальные средства активно применяются другими субъектами рынка выбросов – брокерами, финансовыми игроками, консалтинговыми фирмами, многочисленными посредника-

ми, которые в большом количестве появились в ходе монетизации выбросов в ЕС.

В последние годы число публикаций по тематике трансграничного углеродного регулирования возрастает по экспоненте. Это статьи в журналах, доклады исследовательских институтов и центров, исследования по заказам правительств, производственных компаний, банков. В то же время вопросам глобального управления в связи с введением СВАМ не уделяется должного внимания ни за рубежом, ни в России. А именно в этой плоскости находится принципиальное отличие механизмов регулирования международной торговли до и после введения СВАМ.

В данной статье анализируется пока единственная в мире, глобальная по своим масштабам система трансграничного углеродного регулирования и контроля за производственными процессами в зарубежных странах, планируемая к созданию в ЕС.

2. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экономической литературе подробно анализируются многие аспекты СВАМ. За рубежом опубликованы крупные обзоры литературы по трансграничному регулированию выбросов ПГ (включающие сотни обработанных источников и десятки проанализированных моделей [7, 8]), по налогам при моделировании трансграничных цепочек поставок (более 70 источников) [9], по другим темам.

Российские исследователи основное внимание уделяют качественному анализу трансграничного углеродного регулирования, раскрытию его содержания (см., например, работу [10]). Дебаты в ЕС по проблемам СВАМ подробно исследованы в отечественной публикации [11]. Активно изучаются также последствия и риски для компаний из России, вывозящих свою продукцию в ЕС (см., например, работы [12, 13]).

Ведущие европейские исследовательские и консалтинговые центры получают оценки главным образом на основе проведения количественного анализа с использованием широкого спектра математических и инструментальных средств – от сложных, многопараметрических расчетно-вычислительных систем типа межстрановых межотраслевых балансов и стохастических уравнений до относительно простых игровых, графических и иных моделей. Как справедливо отмечается в одном из исследований мюнхенского Института Ifo в отношении СВАМ, «затраты и выгоды должны

быть тщательно оценены и, по возможности, определены количественно на основе наилучших доступных методов» [14, с. 23].

Межстрановое регулирование выбросов ПГ при производстве импортируемой продукции, так же, как и национальные системы контроля, предоставляет широкие возможности для применения математических методов анализа, проведения расчетов и моделирования. Так, для оценки воздействия изменений внешнеторговой политики на окружающую среду, а также на производство, потребление, инвестиции, структуру экономики и другие экономические показатели строятся достаточно сложные динамические стохастические модели общего равновесия (англ. *Dynamic Stochastic General Equilibrium*, DSGE-модели) [15–17].

Наиболее широкое распространение из-за своего межотраслевого характера получил класс DSGE-моделей, основанных на межстрановых межотраслевых балансах большой размерности, связывающих национальные таблицы «затраты – выпуск» с экспортно-импортными потоками в двусторонней торговле товарами и услугами. Такие модели позволяют провести имитационные и прогностические расчеты по оценке влияния углеродных платежей в одной стране на внешнюю торговлю, экономическое положение и состояние отраслей в других странах. Так, в статье [15] построена DSGE-модель для США, позволившая авторам сделать вывод, что трансграничное углеродное регулирование является более эффективным механизмом для смягчения «утечки углерода», чем другие направления климатической политики в США.

В статье [16] с использованием расширенной DSGE-модели с помощью таблиц «затраты – выпуск» GTAP¹ [18] оцениваются последствия как применения СВАМ, так и возможных ответных мер со стороны торговых партнеров. Представлены результаты моделирования по четырем сценариям, вызывающим общие изменения в мировой торговле энергоносителями по странам. Модель дает оценки для многих переменных производства и торговли.

В исследовании ЮНКТАД [17] на основе DSGE-модели и базы данных GTAP изучаются воздействие СВАМ на международную торговлю, выбросы углекислого газа (CO₂), доходы и занятость с акцентом на развивающихся странах. Показано, что введение платы за выбросы в сочетании с

¹ База данных GTAP разработана и поддерживается Центром глобального анализа торговли университета Пердью (США). В последней версии от 2017 г. она содержит информацию о двусторонней торговле 140 стран мира по 57 товарным группам и отраслям.

СВАМ помогает сократить эмиссию ПГ как внутри ЕС, так и за его пределами [17, с. 13].

Моделирование рисков для развивающихся стран от введения СВАМ проводится в ряде работ [19–21].

В плане глобального управления наиболее важной изучаемой проблемой является соответствие вводимого механизма СВАМ нормам и правилам ВТО (см., например, работу [22]). Предложения по регулированию трансграничного углеродного следа с участием институтов ООН, ВТО, международных соглашений по климату содержатся в работе [23].

При изучении проблем глобального управления основным инструментом количественного анализа выступают также DSGE-модели. В исследовании [24] с использованием такой модели дана количественная оценка экономических и экологических последствий реализации различных вариантов СВАМ для разрешения дилеммы между соблюдением правил ВТО и приемлемостью нового механизма регулирования. Используя DSGE-модель, включающую несовершенную конкуренцию, глобальные цепочки создания стоимости, выбросы парниковых газов и эндогенную цену квот на выбросы, авторы показали, в частности, что СВАМ должен дать уменьшение «утечки углерода». Но одновременно происходит увеличение цены квот на выбросы на рынке EU ETS.

Широко исследуются с помощью математических моделей и политические аспекты СВАМ. Так, в статье [25] изучается, какие страны с наибольшей вероятностью будут политически противодействовать этому механизму. Инструментальным средством выступает созданная авторами модель многомерного индекса противодействия (оппозиции) СВАМ, построенного с использованием таких показателей, как объем торговли с ЕС, углеродоемкость, тяжбы и споры в ВТО, внутривосточное общественное мнение об изменении климата, способность к инновациям.

Значительное место в спектре публикаций по проблематике СВАМ занимают исследования, посвященные глобальным цепочкам поставок [9, 26, 27].

В статье [26] предложена глобальная модель цепочек поставок с выделением блока выбросов ПГ. На частном примере модели из розничного продавца в стране-импортере с регулируемым выбросами и поставщика в стране-экспортере, в которой выбросы не регулируются, получены равновесные решения и изучено влияние углеродного тарифа на глобальный контроль выбросов. Проведя аналитическое исследование и математические



расчеты, авторы пришли к выводу, что тариф на выбросы углерода при определенных обстоятельствах не обязательно сокращает глобальные выбросы.

При исследовании проблем СВАМ нашли широкое применение игровые модели. Такая модель используется, например, в оценке потенциального эффекта СВАМ для Китая [28]. В исследовании [27] представлена модель стимулирования компаний к сокращению выбросов CO₂ в двухзвенной цепочке поставок в условиях регулирования торговли, в которой есть один продавец и один покупатель. Предложено четыре стратегии стимулирования снижения выбросов. На основе игровых моделей получены равновесные решения по всем стратегиям. Путем сравнений и анализа авторы пришли к выводу, что высокая осведомленность потребителей о низком уровне выбросов углерода может повысить стимул производителя к сокращению выбросов углерода, тем самым увеличивая прибыль обоих участников цепочки поставок.

3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СВАМ

Управление выбросами в современной экономике – это сложный комплекс инструментов: нормативно-правовых (законов, регламентов, стратегий, программ, других нормативных актов) и организационно-институциональных (органов управления, комитетов и комиссий как на национальном, так и на отраслевом уровнях). Он включает обширный набор инструментов по регулированию хозяйственной деятельности всех отраслей и производств. Его основные цели – сокращение выбросов ПГ, развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), повышение энергетической эффективности.

Carbon Border Adjustment Mechanism Европейского союза – не только новый, но и уникальный инструмент глобального управления, мониторинга и контроля за производственными процессами в компаниях, размещенных на территории государств, находящихся вне юрисдикции ЕС (вопрос международно-правовой легитимности управления и контроля со стороны ЕС выбросов в производственных компаниях в третьих по отношению к союзу странах в данной статье не рассматривается; подробнее см., например, работу [23]).

Система управления СВАМ громоздкая, сложная, но в общем логичная, она представлена на рисунке. Основными элементами системы являются:

- Европейская комиссия,
- Комитет СВАМ Европейской комиссии,
- правительства стран – членов ЕС,

- уполномоченные (компетентные) органы правительств стран ЕС,
- таможенные органы,
- компании-импортеры и уполномоченные ими декларанты,
- аккредитованные верификаторы,
- компании – производители/экспортеры в ЕС (в терминологии СВАМ – операторы установок).

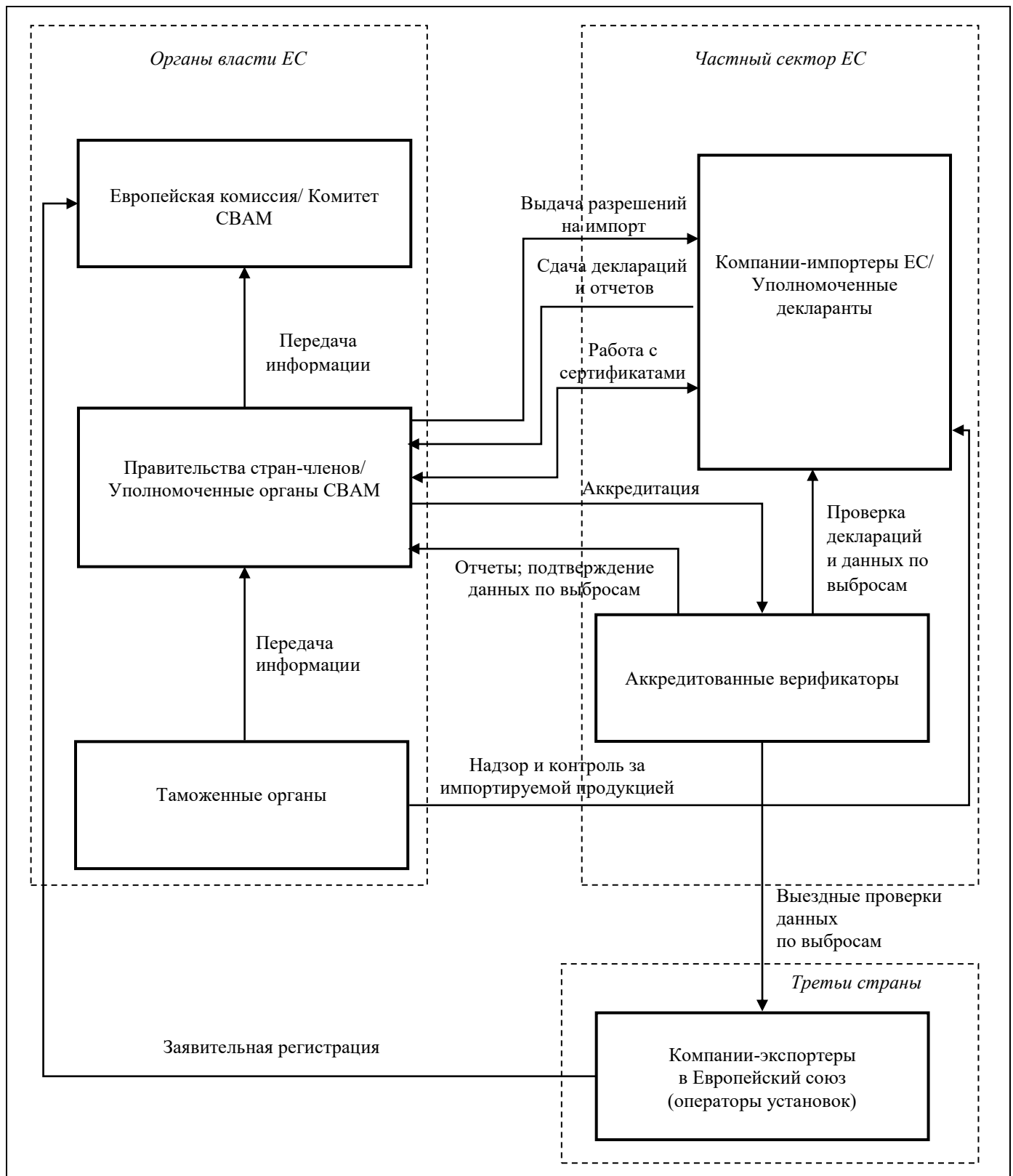
Европейская комиссия выступает главным администратором (*Central administrator*) СВАМ. В ее обязанности входит сопровождение СВАМ, обеспечение координации деятельности соответствующих уполномоченных (компетентных) национальных органов, создание и ведение общедоступной центральной базы данных по СВАМ, содержащей, в частности, наименования, адреса и контактные данные компаний – производителей импортируемой продукции, местоположение их производственных установок, ведение регистрационного журнала транзакций по покупке сертификатов СВАМ и др.

Комитет СВАМ Европейской комиссии создается для осуществления непосредственной работы по СВАМ при общем руководстве Европейской комиссии.

Правительства стран – членов ЕС будут непосредственно заниматься организацией СВАМ на своих территориях. В их ведении находится также контроль и надзор за СВАМ. Они будут иметь право накладывать штрафные санкции на компании-импортеры, принимать решения об административных или уголовных наказаниях за несоблюдение законодательства по СВАМ.

Уполномоченные (компетентные) органы (*Competent authorities*) создаются правительствами стран – членов ЕС. В их ведении находятся следующие вопросы: создание, поддержание национальных баз данных по СВАМ; ведение разнообразных реестров СВАМ, их счетов и решений, касающихся разрешений на импорт; выдача и отзыв таких разрешений; обеспечение жизненного цикла сертификатов СВАМ; аккредитация верификаторов; прием деклараций по СВАМ и работа с ними; передача информации в Комитет СВАМ.

Таможенные органы осуществляют надзор и контроль за импортируемой продукцией, проверку декларантов и документов на ввоз товаров на территорию ЕС, передают информацию о товарах, заявленных для импорта, в компетентный орган государства – члена ЕС. Они не допускают ввоз товаров, если декларант не уполномочен на то компетентным органом, периодически передают подробную информацию о заявленных для импорта товарах компетентному органу.



Блок-схема системы управления СВAM

Уполномоченный декларант (*authorised declarant*, декларант) – лицо, уполномоченное компанией – импортером в ЕС товаров на ведение всей деятельности в рамках СВAM. Декларант работает

с компетентными (уполномоченными), а также с таможенными органами, должен быть зарегистрирован компетентным органом и получить от него разрешение на проведение импортных операций по



задекларированной группе товаров. На декларанта ложатся транзакционные издержки по подаче заявок на получение разрешений на импорт товаров, составлению ежегодных деклараций СВAM, обеспечению проверок выбросов аккредитованными верификаторами, составлению отчетов и т. д. Он должен производить платежи по СВAM от лица компании-импортера, осуществлять мониторинг рынка EU ETS, чтобы по минимальной цене приобретать сертификаты СВAM, цена на которые привязывается к результатам торгов на EU ETS. Данные по выбросам произведенной за рубежом и ввезенной в ЕС продукции должны быть подтверждены аккредитованными верификаторами. Ежеквартально декларант обязан предоставлять компетентному органу отчет по СВAM. Вся эта деятельность ложится дополнительным бременем на импортеров продукции в ЕС и уполномоченных ими декларантов.

Операторы установок (*Operators of installations*) – любые зарубежные лица в третьих (не входящих в ЕС) странах, управляющие производственными установками или контролирующие их ([1], см. 3). По сути – это иностранные компании вне ЕС или уполномоченные ими лица, экспортирующие в союз продукцию, подпадающую под действие СВAM.

Одним из принципиальных положений СВAM является заявительная регистрация операторов установок в Европейской комиссии. Этому вопросу посвящена статья 10 базового документа по СВAM, в которой указано, что такая регистрация производится по заявлению, в котором оператор установки предоставляет информацию о себе, о видах своей деятельности, а также о мощностях (установках, оборудовании, технических единицах), на которых выпускается продукция, подпадающая под действие СВAM. Пункт 1 данной статьи гласит: «Европейская комиссия по просьбе оператора установки, расположенной в третьей стране, регистрирует информацию об этом операторе и его установке в центральной базе данных» [1, с. 32]. Регистрация добровольная и является правом, а не обязанностью иностранного производителя. В любой момент по заявлению оператора информация о нем должна быть удалена из базы данных ЕС.

В то же время п. 5 этой же статьи обязывает оператора определять по товарам, произведенным на зарегистрированной установке, так называемые «встроенные выбросы» (*embedded emissions*, см. ниже), рассчитанные в соответствии с методами, изложенными в нормативных документах ЕС, и обеспечить, чтобы упомянутые «встроенные выбросы» были удостоверены аккредитованными верификаторами.

Перед Европейской комиссией ответственность в рамках СВAM несет декларант, а не оператор. Это и понятно – юрисдикция ЕС не распространяется на компании третьих стран. Но, с другой стороны, декларант не располагает полной и достоверной, подкрепленной технической документацией, информацией по производственным мощностям, установкам и выбросам оператора. Такая информация может быть получена только от компании – производителя продукции, импортируемой декларантом. И не только получена, но и проверена аккредитованным верификатором. Однако, если оператор не регистрируется в Европейской комиссии (поскольку это его право), то каким образом декларант должен получать информацию по производственным установкам компаний третьих стран и производимым на них выбросам, остается пока неясным. Это вопрос не регламентируется в базовом документе СВAM.

Аккредитованные верификаторы (далее – верификаторы). Широкие полномочия в рамках СВAM, в том числе и по отношению к зарубежным операторам установок, имеют аккредитованные верификаторы ЕС. Они проверяют и удостоверяют данные по выбросам, предоставленные декларантами. Но самое важное – им вменяется в обязанность проведение ежегодных проверок выбросов в компаниях-производителях из третьих стран. В пункте 1 (с) Приложения V базового документа, сказано: «посещение установки проверяющим должно быть обязательным, за исключением случаев, когда соблюдены конкретные критерии для отказа от посещения установки» [1, Annex V, 1(c)].

Отчет верификатора о проверке промышленной установки на территории третьей страны должен включать, в частности, следующую информацию [1, Annex V, 2]:

- идентификация установки, на которой были произведены товары;
- контактная информация оператора установки;
- соответствующий отчетный период;
- имя и контактная информация проверяющего;
- идентификационный номер аккредитации, название органа по аккредитации;
- дата посещения установки (если применимо) или причины отказа от посещения установки;
- количество каждого вида заявленных товаров, произведенных за отчетный период;
- прямые выбросы установки за отчетный период;
- описание того, как выбросы установки относятся к различным видам товаров;
- количественная информация о товарах, выбросах и потоках энергии, не связанных с этими товарами;

- в случае сложных товаров:
 - количество использованных исходных материалов (прекурсоров);
 - удельные воплощенные выбросы;
 - в случае использования фактических выбросов: идентификация установки, на которой был произведен исходный материал, и фактические выбросы от производства этого материала;
- заключение по проверке;
- информация о существенных искажениях, обнаруженных и не исправленных (где это применимо);
- информация о несоответствиях правилам расчета, изложенным в Приложении III, где это применимо (*имеется в виду Приложение III базового документа [1]* – прим. авт.).

В итоге, насколько эффективной окажется вся эта громоздкая система управления СВAM, и что будет с «утечкой углерода» из ЕС пока остается неясным. Суммы доходов компетентных органов стран – членов и ЕС от СВAM, содержащиеся в многочисленных исследованиях, проведенных по заказу ЕС и в инициативном порядке, еще ни о чем не говорят, поскольку экономическая эффективность для экономики в целом и интегральные издержки для компаний никем не подсчитаны и не оценены.

4. МОДЕЛЬ

При всей сложности институциональной структуры управления и документооборота расчетная модель определения выбросов проста, линейна и включает всего несколько алгебраических уравнений в зависимости от типа товаров.

Базовой категорией являются выбросы углекислого газа (CO_2) или других парниковых газов в эквиваленте CO_2 . Выбросы делятся на прямые и косвенные. Прямые выбросы (*direct emissions*) – выбросы в результате производственных процессов, над которыми производитель имеет прямой контроль, это его собственные выбросы. Косвенные выбросы (*indirect emissions*) – выбросы при производстве сырья, полуфабрикатов, комплектующих, материалов и т. д., которые использованы при выпуске продукции. Прежде всего, в расчет идет электроэнергия, затраты на отопление и охлаждение, которые потребляются в процессе производства товара и имеют наибольшие удельные выбросы в сравнении с остальной промежуточной продукцией. До 2026 г. косвенные выбросы в регулирование не включаются.

Важной категорией являются также воплощенные (варианты перевода: включенные, встроенные)

в импортируемых товарах выбросы (*embedded emissions*) (см. [13, с. 104]). Это выбросы, выделяемые в процессе производства товаров и рассчитанные в соответствии с методами, изложенными в Приложении III основного документа СВAM [1]. Воплощенные выбросы определяются техническими характеристиками, зафиксированными в паспортах производственных установок.

Удельные воплощенные выбросы (*specific embedded emissions*) – воплощенные выбросы в расчете на 1 т произведенной продукции.

Фактические выбросы (*actual emissions*) – выбросы, рассчитанные на основе первичных данных, полученных в процессе производства товаров [1, с. 27].

В целях учета выбросов товары делятся на простые и сложные. Наиболее распространенным типом товаров является группа простых товаров. Именно они подпадают под действие СВAM на начальном этапе.

Простые товары (*simple goods*) – это товары, производство которых требует исходных материалов и топлива с нулевыми встроенными выбросами. В документе [1] принято пять таких товаров: цемент, удобрения, железо и сталь, алюминий и электроэнергия.

Сложные товары (*complex goods*) – товары, при производстве которых используются другие простые товары. На них действие механизма СВAM будет распространено на последующих этапах.

Для определения удельных воплощенных выбросов простых товаров учитываются только прямые выбросы. Формула их расчета такова:

$$SEE_g = \frac{AttrEm_g}{AL_g},$$

где SEE_g – удельные воплощенные выбросы парниковых газов в эквиваленте CO_2 в расчете на 1 т простого товара g ; $AttrEm_g$ – выделяемые при производстве товара g прямые выбросы парниковых газов в тоннах эквивалента CO_2 ; AL_g – объем производства товара g в тоннах (здесь и далее в статье сохранены обозначения показателей из источника [1]).

Для определения фактических воплощенных выбросов сложных товаров SEE_g в расчете на 1 т также учитываются только прямые выбросы. Для их вычисления применяется уравнение

$$SEE_g = \frac{AttrEm_g + EE_{InpMat}}{AL_g},$$

где EE_{InpMat} – воплощенные выбросы исходных материалов (*embedded emissions of the input materials*),



потребленных в процессе производства, которые рассчитываются по формуле

$$EE_{ImpMat} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot SSE_i,$$

где M_i – масса исходного материала i , которая использована в производственном процессе; SSE_i – удельные воплощенные выбросы при производстве исходного материала i ; n – число исходных материалов.

Компания-экспортер (оператор установки) в своей декларации должна использовать величину выбросов, полученную на установке, на которой был произведен исходный материал, при условии, что данные по этой установке могут быть надлежащим образом измерены.

Таким образом, общая формула для определения воплощенных выбросов EE_p продукта p в цепочке создания стоимости в восходящем потоке, где индекс i указывает на исходные материалы, может быть выражена следующим образом:

$$EE_p = EM_p + IE_p + \sum_{i=1}^n MC_i (EM_i + IE_i),$$

где EM_p – прямые выбросы в процессе производства продукта p ; IE_p – косвенные выбросы; MC_i – масса исходного материала i , которая использована для продукта p ; EM_i – прямые выбросы и IE_i – косвенные выбросы при производстве 1 т материала i ; n – число исходных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно сделать вывод, что с введением трансграничного углеродного регулирования исследовательская и прикладная наука получают новую, широкую предметную область исследований, в том числе и по управлению трансграничными рынками ПГ.

Система управления СВМ в основном работоспособна и целесообразна. Она служит целям принятой ООН международной климатической политики. Модель расчета выбросов для различных товаров также является корректной. В системе управления не просматриваются недостаточные или избыточные по функциям управляющие звенья. Ее аналог – система EU ETS – функционирует в течение 15-ти лет и апробирована на практике.

Однако реализация системы управления СВМ может столкнуться с рядом серьезных проблем, обусловленных международно-правовой природой возникающих отношений:

- Введение тарифов (сертификатов) на выбросы парниковых газов в импортируемых в ЕС товарах

напрямую затрагивает иностранных производителей и является политическим шагом. Применение СВМ станет первым случаем, когда жесткие фискальные меры будут приниматься одним субъектом международных отношений (Евросоюзом) по отношению к другим участникам таких отношений – компаниям третьих стран. А это реально представляет собой инструмент глобального управления, поскольку объектом отношений станут практически все страны мира.

- Ввиду того, что СВМ является первой попыткой налаживания мониторинга, контроля и в этом плане – регулирования производственных процессов в странах-экспортерах, возникнет проблема допуска верификаторов на территорию третьих по отношению к ЕС стран для проведения ими проверок, мониторинга и контроля. На каких основаниях верификаторы ЕС будут осуществлять такие проверки, остается неясным.

- Верификаторы ЕС, обязанность которых будет состоять в проверке правильности задекларированных и представленных в уполномоченные органы данных по выбросам – не прихоть бюрократии ЕС, а необходимое и неизбежное звено системы управления: кто-то должен проводить экспертную проверку и удостоверить правильность расчетов выбросов. Но для этого нужен международный мандат и международная организация при ООН, как это сделано, например, для проверки национальных объектов ядерной энергетики в форме МАГАТЭ, а не единоличная инициатива одного из субъектов международных отношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism*. European Commission, 14.7.2021, COM(2021) 564 final, 2021/0214 (COD). – Brussels. European Commission, 2021. – 291 p.
2. *EU ETS Handbook*. – Brussels, European Commission, 2015. 138 p.
3. *Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the Functioning of the European Carbon Market in 2020*, 26.10.2021, COM(2021) 962 final. – Brussels, European Commission, 2021. – 44 p.
4. *Trade statistics for international business development*. – URL: <https://www.trademap.org/Index.aspx> (дата обращения 01.11.2022). [Accessed: 01.11.2022.]
5. *Dales, J.H.* Pollution, Property & Prices: An Essay in Policy-making and Economics. – Toronto: University of Toronto Press, 1968. – 111 p.
6. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal*, 11.12.2019, COM(2019) 640 final. – Brussels, European Commission, 2019. – 24 p.

7. *Zhong, J., Pei, J.* Border Carbon Adjustment: A Systematic Literature Review of Latest Developments. – SSRN, 2022. – 23 p.
8. *Cosbey, A., Droege, S., Fischer, C., Munnings, C.* Developing Guidance for Implementing Border Carbon Adjustments: Lessons, Cautions, and Research Needs from the Literature // *Review of Environmental Economics and Policy*. – 2019. – Vol. 13, no. 1. – P. 3–22.
9. *Mu, D., Ren, H., Wang, C.* A Literature Review of Taxes in Cross-Border Supply Chain Modeling: Themes, Tax Types and New Trade-Offs // *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*. – 2022. – Vol. 17, no. 1. – P. 20–46.
10. *Европейский механизм пограничной углеродной корректировки – ключевые вопросы и влияние на Россию.* – М.: Центр энергетики Московской школы управления SKOLKOVO, 2021. – 50 с. [*Evropejskij mekhanizm pogranichnoj uglerodnoj kor-rektirovki – klyuchevye voprosy i vliyanie na Rossiyu. Carbon Border Adjustment Mechanism – key issues and impact on Russia.* – М.: Centr energetiki Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO, 2021. – 50 s. (In Russian)]
11. *Белов В.Б.* Дебаты в ЕС о Механизме трансграничного углеродного регулирования // *Европейский союз: факты и комментарии.* – 2021. – № 103. – С. 53–58. [*Belov, V.B. Debaty v ES o Mekhanizme transgranichnogo uglerodnogo regulirovaniya // Evropejskij soyuz: fakty i komentarii.* – 2021. – No. 103. – P. 53–58. (In Russian)]
12. *Трансграничное углеродное регулирование в ЕС: как не допустить дискриминации российских экспортёров.* Аналитический доклад. – М.: ИПЕМ, 2021. – 52 с. [*Transgranichnoe uglerodnoe regulirovanie v ES: kak ne dopustit' diskriminacii rossijskih eksportyorov. Analiticheskij доклад.* – М.: IPEM, 2021. – 52 s. (In Russian)]
13. *CBAM. Последствия для российской экономики.* – М.: Центр энергоэффективности – XXI век (ЦЭНЭФ-XXI), 2021. – 140 с. [*CBAM. Posledstviya dlya rossijskoj ehkonomiki.* – М.: Tsentr ehnergoehffektivnosti – XXI vek (TSEHNEHF-XXI), 2021. – 140 s. (In Russian)]
14. *Mörsdorf, G.* A simple fix for carbon leakage? Assessing the environmental effectiveness of the EU carbon border adjustment // *Ifo Working Papers*. – 2021. – No. 350. – 33 p.
15. *Zhang, K.U.N., Liang, Q.-M., Liu, L.-J., et al.* Impacts of mechanisms to promote participation in climate mitigation: Border carbon adjustments versus uniform tariff measures // *Climate Change Economics*. – 2020. – Vol. 11, no. 03. – Art. no. 2041007.
16. *Lim, B., Hong, K., Yoon, J., et al.* Pitfalls of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, Iss. 21. – Art. no. 7303.
17. *A European Union Carbon Border Adjustment Mechanism: Implications for developing countries.* – UNCTAD. – 2021. – 30 p.
18. *GTAP: Global Trade Analysis Project, Current GTAP Model.* – 2017. – URL: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/models/current.asp> (дата обращения 01.11.2022). [Accessed: 01.11.2022.]
19. *Eicke, L., Weko, S., Apergia, M., Mariana, A.* Pulling up the carbon ladder? Decarbonization, dependence, and third-country risks from the European carbon border adjustment mechanism // *Energy Research & Social Science*. – 2021. – Vol. 80. – Art. no. 102240.
20. *Zachmann, G., McWilliams, B.* A European carbon border tax: much pain, little gain. – Bruegel: Policy Contribution. – 2020. – Iss. 05. – 19 p.
21. *Franzen, A., Mader, S.* Consumption-based versus production-based accounting of CO2 emissions: is there evidence for carbon leakage? // *Environmental Science & Policy*. – 2018. – Vol. 84. – P. 34–40.
22. *Hufbauer, G., Kim, J., Schott, J.* Can EU Carbon Border Adjustment Measures Propel WTO Climate Talks? – Peterson Institute for International Economics, 2021. – 14 p. – URL: <https://www.piie.com/publications/policy-briefs/can-eu-carbon-border-adjustment-measures-propel-wto-climate-talks>
23. *Zhang, T.* Climate Change – Our Most Global Challenge. – IMF, 2021. – URL: <https://www.imf.org/en/News/Articles/2021/06/02/sp060221-dmd-zhang-green-swan-conference?cid=em-COM-123-43175>
24. *Bellora, C., Fontagné, L.* EU in Search of a WTO – Compatible Carbon Border Adjustment Mechanism. CEPII Working Paper. – 2022. – No. 2022-01. – 44 p.
25. *Overland, I., Sabyrbekov, R.* Know your opponent: Which countries might fight the European carbon border adjustment mechanism? // *Energy Policy*. – 2022. – Vol. 169. – Art. no. 113175.
26. *Fang, Y., Yu, Y., Shi, Y., Liu, J.* The effect of carbon tariffs on global emission control: A global supply chain model // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2020. – Vol. 133 (C). – Art. no. 101818.
27. *Xue, K., Sun, G., Yao, T.* Incentive Mechanisms for Carbon Emission Abatement Considering Consumers' Low-Carbon Awareness under Cap-and-Trade Regulation // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – Vol. 19. – Art. no. 4104.
28. *Huang, T., Liu, Z., Zhao, T.* Evolutionary Game Analysis of Responding to the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, iss. 2. – Art. no. 427.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
С.В. Ратнер.

Поступила в редакцию 3.11.2022,
после доработки 5.01.2023.
Принята к публикации 14.02.2023.

Варнавский Владимир Гаврилович – д-р экон. наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, ✉ varnavsky@imemo.ru.



EUROPEAN UNION'S CARBON BORDER ADJUSTMENT MECHANISM AS A GLOBAL GOVERNANCE TOOL

V.G. Varnavskii

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

✉ varnavsky@imemo.ru

Abstract. This paper considers a greenhouse gas (GHG) emissions management system with an international component and taxation of imported carbon-intensive goods. As an example, we discuss European Union's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). CBAM is expected to be introduced in 2023. It will have global coverage by countries and companies. We overview the available scientific literature on mathematical methods for analysis and assessment of CBAM for socio-economic development. As noted, carbon border adjustment provides ample opportunities for mathematical analysis, calculations, and modeling. We outline some classes of models to investigate CBAM: DSGE models, Inter-Country Input-Output Tables, game-theoretic models, and others. Their capabilities for conducting economic analysis are described. Special attention is paid to the analysis models of Global Value Chains. We compile the block diagram of the CBAM management system based on the EU regulatory documents. Its main blocks, participants, and connections are studied. We present and analyze the generic formulas for determining GHG emissions in the European Union. As concluded, CBAM introduction will form a new and broad area of studies on fundamental and applied economics, including management of international carbon border trading markets.

Keywords: Carbon Border Adjustment Mechanism, greenhouse gas (GHG) emissions, European Union, global governance, models, mathematical methods.

ПЕРСОНАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ГЛЮКОЗЫ ПО РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

А.И. Михальский, Ж.А. Новосельцева, Т.П. Шестакова

Аннотация. Приведен обзор применения методов машинного обучения и анализа данных в медицине. Рассмотрена проблема построения замкнутой персонализированной системы автоматического управления уровнем глюкозы в крови человека, ориентированной на конкретного больного, с использованием измерений сенсором уровня глюкозы в интерстициальном пространстве. Описаны модификация модели регулирования уровня глюкозы в крови больного диабетом 1 типа при поступлении глюкозы с принятием пищи и подачи экзогенного инсулина в кровоток, а также методика выделения группы персонализированных параметров модели, требующих индивидуальной идентификации. Приведен пример идентификации параметров модели по реальным данным больного диабетом 1 типа и расчета результата применения оптимального ПД-управления подачей экзогенного инсулина в идентифицированной модели. Результат сравнен с реальным поведением гликемической кривой после однократного введения пациенту инсулина по рекомендации врача. Показано, что оптимальное ПД-управление эффективно стабилизирует уровень глюкозы в крови, помогая избежать развития гипогликемии. Полученные результаты могут использоваться при проектировании систем автоматического управления уровнем глюкозы в крови человека – инсулиновых помп.

Ключевые слова: управление уровнем глюкозы в крови, непрерывная гликемическая кривая, «упрощенная» математическая модель, персонализированные параметры модели, ПД-регулятор.

ВВЕДЕНИЕ

В XXI в. роль автоматизированных систем поддержки принятия решений в медицине многократно возросла [1]. Это явилось результатом двух процессов: резкого повышения производительности систем автоматической обработки информации и экспоненциально растущего объема доступной медицинской и биологической информации, результатов научных экспериментов, а также данных о диагностике и лечении различных заболеваний среди больших групп пациентов. Накопление эмпирических данных позволяет применять обучающиеся алгоритмы, широко используемые в различных областях науки и техники для поддержки принятия решений, такие как алгоритмы классификации, анализа зависимостей и вероятностные прогностические модели для решения медицинских задач диагностики, выделения ведущих факторов риска здоровью, прогноза результата лечения.

Считается, что применение формальных систем поддержки принятия решений в медицине нача-

лось в 1976 г. с публикации экспертной системы MYCIN [2], предназначенной для диагностики патогенных бактерий, назначения антибиотиков и расчета их дозировки. В то же время появились первые работы по применению методов распознавания при дифференциальной диагностике рака [3], экспертного подхода при назначении лекарств [4], лингвистического метода в кардиологии [5]. Эти задачи понимались как задачи распознавания альтернатив на основании данных лабораторных анализов и результатов опроса пациентов и построения прогностических моделей. В дальнейшем, по мере развития теории распознавания образов и анализа данных точные методы получили широкое распространение в медицинских приложениях.

В настоящее время автоматизированные системы поддержки принятия решений используются при постановке диагноза, формировании прогноза результата лечения, обработке и обобщении больших объемов информации и эмпирических данных для установления связей условий жизни, работы, индивидуальных привычек, наследственности и



других важных для сохранения здоровья и лечения патологий факторов с состоянием организма, заболеваемостью [1, 6].

По мере проникновения таких систем в здравоохранение вскрылись новые методологические проблемы, требующие развития новых методологических подходов. Многие авторы пытаются строить «подробные» математические описания изучаемых патологий, привлекая все более детальное описание заболевания на физиологическом, молекулярном и генетическом уровне. При этом предполагается, что для человека с определенными значениями используемых в модели факторов полученная модель воспроизведет присущее этому человеку развитие заболевания. Однако построенная математическая модель отражает не индивидуального человека, а группу людей, данные которых использовались. При этом значимость разных факторов, определенная для группы людей, может не совпадать со значимостью этих факторов для конкретного индивидуума. В статистике такое явление известно как парадокс Симпсона (парадокс объединения) [7] и является следствием случайного распределения факторов в исследуемой группе. Для корректного принятия индивидуализированного решения необходимо применять модели и процедуры, использующие доступную индивидуальную информацию.

Весь спектр методов машинного обучения и анализа данных применяется и в области профилактики, диагностики и лечения сахарного диабета – группы эндокринных заболеваний, связанных с нарушением усвоения глюкозы и развивающихся вследствие абсолютной или относительной недостаточности гормона инсулина, вырабатываемого поджелудочной железой, в результате чего развивается стойкое увеличение содержания глюкозы в крови – гипергликемия [8].

В работах [9–14] рассматривались различные методы отбора признаков для выделения биомаркеров и других признаков, важных при применении современных методов классификации для диагностики и прогноза развития сахарного диабета. В работе [11] предложено вычислять апостериорную вероятность ансамбля моделей (гипотез), используя байесовское усреднение апостериорной вероятности модели из ансамбля при имеющихся данных. В статье [13] рассматривался метод линейного дискриминантного анализа в сочетании с SVM (Support Vector Machines) при использовании вэйвлетов. В работе [14] для прогноза уровня глюкозы строилась многомерная регрессия SVR (Support Vector Regression). В статье [15] классифика-

ция с помощью SVM дополняется ансамблевым обучением, что позволяет получать легко интерпретируемые решающие правила. Методы машинного обучения и анализа данных применяются и для прогноза осложнений при сахарном диабете и, в частности, гипогликемии – понижения концентрации глюкозы в крови в результате приема противодиабетических средств. При этом широко применяются алгоритм случайного леса, метод k ближайших соседей, SVM, наивный байесовский классификатор, регрессия SVR [16–18].

По мере совершенствования элементной базы стало возможным создание миниатюрных электронных устройств (носимая электроника), выполняющих задачи стабилизации работы органов человека (слуховые аппараты, кардиостимуляторы); измерения и визуализации основных параметров организма – кровяного давления, пульса, температуры тела (смарт-часы); регулирования жизненно важных параметров организма – таких, как, например, уровень сахара в крови (инсулиновые помпы). Они сочетают в себе измерительные средства, устройства отображения результатов измерения и электронные элементы для реализации простейших алгоритмов терапевтического воздействия (стабилизация сердечного ритма, лечение апноэ сна, заживление хронических ран).

Следующий этап развития носимых электронных устройств медицинского назначения – разработка и реализация математических алгоритмов, в реальном времени управляющих дозировкой лекарств и их введением в организм больного для стабилизации его состояния. Современный уровень развития микроэлектроники позволяет реализовать сложные математические алгоритмы в виде миниатюрных электронных схем и размещать их в носимых устройствах.

Работы по автоматизации процесса введения инсулина больным диабетом 1 типа активно ведутся в настоящее время [19]. Существенным элементом таких автоматизированных систем является математическая модель, служащая для прогнозирования изменения уровня глюкозы в крови и выработки оптимального режима медикаментозного воздействия. Подробный обзор математических моделей, применяемых в системе регуляции концентрации глюкозы в плазме крови содержится в работе [20]. Для управления уровнем глюкозы разработаны алгоритмы линейного ПИД-управления, предсказательного управления, управления с использованием машинного обучения [21–23].

При практической реализации алгоритмов управления возникает вопрос о точности иденти-

фикации параметров используемой модели. При идентификации модели для конкретного человека на практике приходится использовать данные большого числа людей, не учитывая многих факторов, влияющих на изучаемый процесс, таких, например, как генетические особенности, история болезни, влияние окружающей среды, вредные привычки и т. д. Набрать группу людей, похожих по изучаемым параметрам на конкретного больного, практически невозможно [24]. В то же время построение математических моделей для конкретного пациента актуально в рамках современной концепции 4П-медицины (предиктивная, превентивная, персонализированная, парситипативная) [25, 26].

Чтобы повысить достоверность оценки параметров математической модели, можно идти по пути снижения числа параметров – разрабатывать модели для описания наиболее важных для конкретного применения процессов [26–29] и разделять параметры на «индивидуальные», в наибольшей степени влияющие на результат работы модели, и на «популяционные», значения которых допустимо брать из научной литературы [30, 31]. При идентификации модели необходимо оценивать лишь индивидуальные параметры, для чего потребуются существенно меньший объем данных, которые необходимо получить из результатов наблюдения конкретного пациента. Результирующую модель будем называть «персонализированной моделью пациента». При построении автоматизированной системы управления замыкание персонализированной модели пациента автоматическим регулятором уровня глюкозы приводит к необходимости выделения «индивидуальных» параметров как для исходной математической модели, так и для регулятора. Результатом является «персонализированная система автоматического управления», учитывающая индивидуальные характеристики пациента.

1. ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ БОЛЬНОГО ДИАБЕТОМ 1 ТИПА

С самого начала внедрения математических методов в медицину разрабатывались математические модели метаболизма глюкозы с целью управления лечением диабета [32, 33], а также модели метаболизма глюкозы, детально описывающие физиологические изменения в организме при диабете [20, 34], но в то же время велись работы по созданию «упрощенных» моделей, содержащих не большое число коэффициентов, подлежащих оце-

ниванию, например, с помощью метода оценивания главной динамической моды [35]. Сложную нелинейную модель метаболизма глюкозы удалось свести к упрощенной квадратичной модели [27] и затем к «минимальной модели», описывающей метаболические эффекты влияния введения инсулина на уровень глюкозы в крови [28]. Исходная модель описывала 22 состояния и включала 44 параметра. Минимальная модель описывает 5 состояний и содержит 11 параметров.

Аналогичная проблема «упрощения» модели данных известна в машинном обучении и решается путем уменьшения числа подлежащих оцениванию параметров, ввода дополнительных априорных ограничений, детерминированных связей или решения задачи оптимизации вспомогательных функционалов [36]. Многие подходы схожи с подходами, используемыми при анализе нелинейных динамических систем. Например, метод главных компонент, широко применяемый при анализе эмпирических данных, схож с методом выделения главных динамических мод, позволяющим разложить передаточную функцию системы высокой степени нелинейности на совокупность передаточных функций нелинейности меньшей степени [37]. Другой подход использует оценки матрицы коэффициентов корреляций между значениями переменных и целевой переменной. Этот подход схож с анализом чувствительности выхода системы при вариации входных сигналов.

В настоящей работе в качестве «упрощенной» модели больного диабетом 1 типа была принята с небольшими модификациями модель регулирования уровня глюкозы в крови больного диабетом 1 типа при поступлении глюкозы с принятием пищи и подачи экзогенного инсулина в кровотоки [28]. Оттуда же взяты и параметры модели. Уравнения модели представлены в Приложении.

Влияние малых изменений параметров «упрощенной» модели на форму полученной непрерывной гликемической кривой рассмотрено в работе [31]. Из 11-ти найдены пять параметров, оказывающих существенное влияние на форму гликемической кривой: p_2 , p_3 , p_4 , p_m и a . Именно эти параметры характеризуют индивидуальность пациента и требуют оценки по индивидуальным наблюдениям. В качестве значений остальных параметров модели можно использовать значения из научных публикаций. В таблице приведены смысловые значения индивидуальных параметров.

Оценку параметров персонализированной модели больного диабетом 1 типа проводили с использованием фрагмента реальной гликемической

кривой длиной 165 мин от момента приема пищи, сопровождавшегося болюсом инсулина ультракороткого действия, и дневниковых записей, из которых брались значения переменных $input$ и $meal_{inp}$ в системе, приведенной в Приложении.

Индивидуальные параметры

Наименование параметра, единица измерения	Описание параметра
p_2 , 1/(МЕД/л)/мин	Коэффициент интенсивности влияния концентрации инсулина на его действие
p_3 , 1/мин	Величина, обратная постоянной времени снижения концентрации глюкозы под действием инсулина
p_4 , 1/мин	Величина, обратная постоянной времени изменения концентрации глюкозы под действием пищи и глюкагона
p_m , 1/мин	Обратная постоянная времени усвоения пищи в ЖКТ
a , б/р	Коэффициент интенсивности влияния пищи на концентрацию глюкозы

На рис. 1 приведена запись гликемической кривой на длительном интервале. Здесь и на других рисунках по оси ординат отложен уровень глюкозы, измеренный сенсором в интерстициальном (межклеточном) пространстве. Фрагмент кривой

длительностью в 300 мин, использованный для идентификации параметров и проверки качества полученного результата, отмечен красным. На фрагменте наблюдается подъем концентрации глюкозы, измеряемой сенсором, после приема пищи и затем спад в результате действия инсулина ультракороткого действия, который был введен перед приемом пищи. Оценивались параметры p_2 , p_3 , p_4 , p_m и a . Значения остальных параметров, входящих в модель (П1), были взяты из работ [28, 29]. Оценка параметров проводилась путем численной минимизации среднеквадратичной ошибки расчетной и реальной гликемической кривых нелинейным методом наименьших квадратов. Найденные значения параметров использовались для расчета гликемической кривой после 165-й минуты, когда больной принял небольшое количество пищи без введения инсулина.

На рис. 2 приведен рассматриваемый фрагмент гликемической кривой (красные круги) и результат ее моделирования с использованием модели (П1) с пятью оцененными по первой половине фрагмента параметрами. Сравнение кривых на интервале от 165 до 300 мин показывает, что оценка пяти параметров на части интервала наблюдения (синяя линия) позволяет спрогнозировать будущее поведение гликемической кривой на интервале, не участвовавшем в оценке параметров (зеленая линия). Рассогласование между реальной гликемической кривой и результатом моделирования в первые 60 мин возможно, связан с влиянием терапии, проведенной раньше, действие которой не учтено при моделировании.

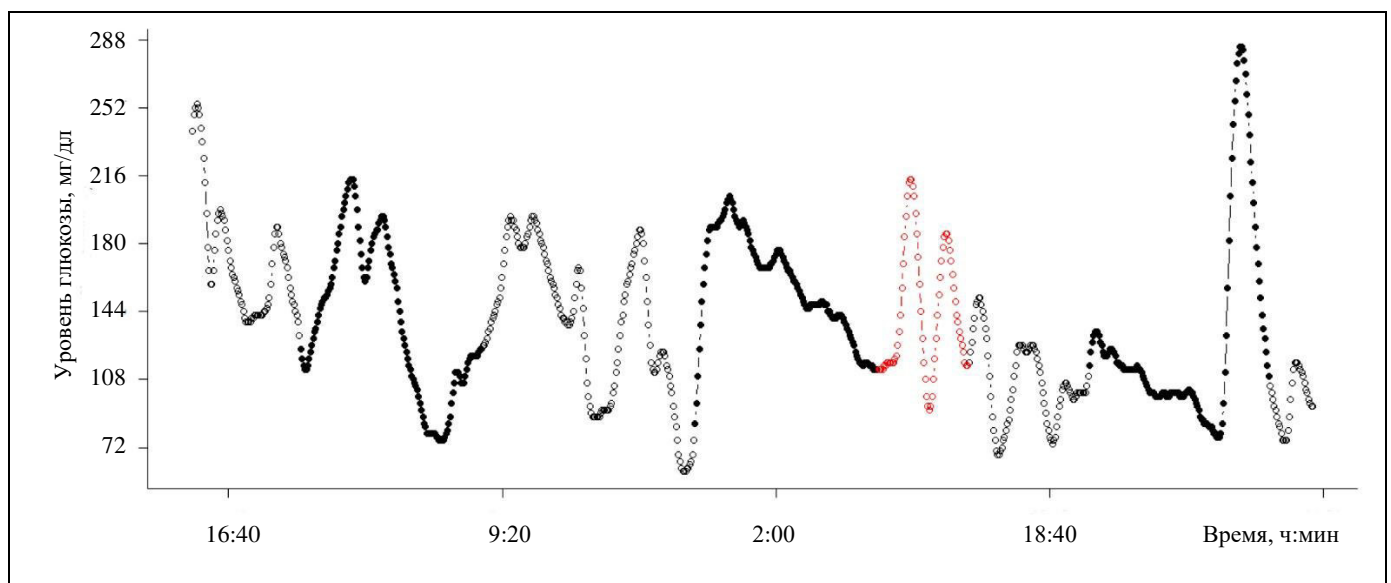


Рис. 1. Реальная гликемическая кривая и фрагмент, по которому производилась идентификация модели (красные круги)

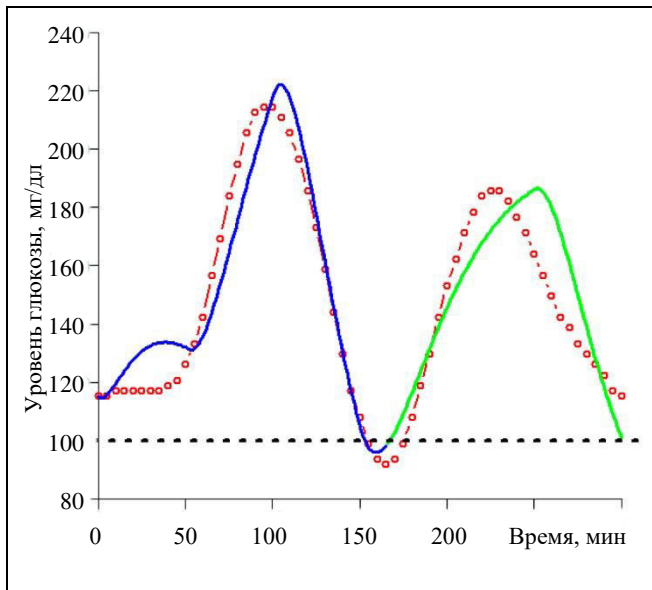


Рис. 2. Фрагмент гликемической кривой (красные круги) и результаты моделирования с использованием модели (П1) с пятью персонализированными по первой половине фрагмента параметрами (синяя линия) и будущее поведение гликемической кривой (зеленая линия)

2. ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ГЛЮКОЗЫ В КРОВИ БОЛЬНОГО ДИАБЕТОМ 1 ТИПА

При построении системы автоматического управления уровнем концентрации глюкозы в крови больного сахарным диабетом 1 типа модель (П1) замыкалась контуром обратной связи, формирующим управляющее воздействие – экзогенный инсулин. На вход управляющего устройства поступает измеренная сенсором концентрация глюкозы в крови. Возмущающее воздействие (переменная $meal_{inp}$) задавалось в виде прямоугольных импульсов длительностью 100 мин с амплитудой 9,6 во время завтрака при $t = 0$ и 5,3 при $t = 150$, соответствующем перекусу. Амплитуды импульсов соответствовали дневниковым записям. За критерий качества управления принималась разность максимального и минимального значений концентрации глюкозы $M = G_{max} - G_{min}$ на интервале $[0, 300]$. Рассматривался закон управления, соответствующий ПД-регулятору с пропорциональной и дифференциальной компонентами, описываемый уравнением (1). В работе [31] было показано, что включение в алгоритм управления только дифференциальной и пропорциональной составляющих достаточно для обеспечения управления уровнем глюкозы, в частности для устранения гипергликемического эффекта, возникающего

при приеме пищи, и опасности гипогликемического эффекта – сильного падения уровня глюкозы относительно базального уровня, возникающего вследствие перерегулирования:

$$input = \max\left(0, (x_6 - n_1) K + \frac{dx_6}{dt} K_d\right). \quad (1)$$

Здесь переменная $input$ обозначает поступление экзогенного инсулина в кровоток; переменная x_6 – измеренная сенсором концентрация глюкозы в интерстициальном пространстве; n_1 – базальное значение концентрации глюкозы в крови; K и K_d – коэффициенты при пропорциональной и дифференциальной части алгоритма ПД-управления.

С медицинской точки зрения сильное понижение концентрации глюкозы в крови может привести к осложнениям, сравнимым по тяжести с теми, которые возникают при ее сильном повышении, или к более серьезным [38]. Экспериментально было обнаружено, что при линейном критерии качества управления с помощью ПД-регулятора не удается снизить максимальный уровень глюкозы без существенного уменьшения его минимального значения на интервале регулирования [31]. Эффективное уменьшение гипогликемического эффекта при управлении уровнем глюкозы достигается путем применения нелинейного критерия качества, который учитывает не только диапазон гликемической кривой, но и ее положение относительно базального уровня. К таким критериям относятся логарифмический критерий качества [39], а также кусочно-линейный критерий качества управления, задаваемый соотношением (2), в котором достаточно большому штрафу подвергается снижение концентрации глюкозы ниже минимально допустимого гипогликемического уровня $n_h = 70$ мг/дл:

$$M = (G_{max} - n_h) - K_c (G_{min} - n_h), \quad (2)$$

где $K_c = 1$ если $(G_{min} - n_h) > 0$ и $K_c = m > 1$ в противном случае; m – параметр алгоритма, выбираемый из практических медицинских соображений. При $K_c = 1$ кусочно-линейный критерий совпадает с критерием, учитывающим только величину изменения уровня глюкозы.

Идея логарифмического критерия качества управления связана с упрощением формулы показателя риска, предложенной Б.П. Ковачевым с соавторами [39]. Логарифмическое преобразование

$$f(x) = m \ln(x/n_h) + n_h;$$

где $m = -n_h(1 - \gamma) / \ln \gamma$, $0 < \gamma \leq 1$, определенное на интервале $[\gamma n_h, n_h / \gamma]$, обладает следующими дву-

мя свойствами: $f(\gamma n_h) = \gamma n_h$, $f(n_h) = n_h$, $f(n_h/\gamma) = (2 - \gamma)n_h$. Таким образом, интервал $[f(\gamma n_h), f(n_h/\gamma)]$ оказывается симметризованным относительно базального значения n_h , и при $x > n_h$ происходит уменьшение масштаба значений функции $f(x)$. Логарифмический критерий качества управления имеет вид

$$M_{\ln} = f(G_{\max}) - f(G_{\min}) = m \ln \frac{G_{\max}}{G_{\min}}.$$

Графики изменения концентрации глюкозы в крови, соответствующие режиму введения инсулина, использованному врачом – терапевтическому лечению (красные круги), и оптимальному ПД-управлению с применением критерия качества управления (2) (сплошная линия), показаны на рис. 3. Разница между кривыми на рисунке объясняется принципиально различными характеристиками использованного управления. При терапевтическом управлении в начальный момент времени врач ввел пациенту дозу инсулина длительного действия и болус инсулина короткого действия. Другого воздействия в течение 300 мин не было. При автоматическом управлении поступление инсулина ультракороткого действия производится непрерывно во времени, что отражается на непрерывной гликемической кривой. В результате оптимальное ПД-управление в сочетании с персонализированной моделью пациента позволяет существенно уменьшить максимальный уровень глюкозы в сравнении с «терапевтическим управлением»

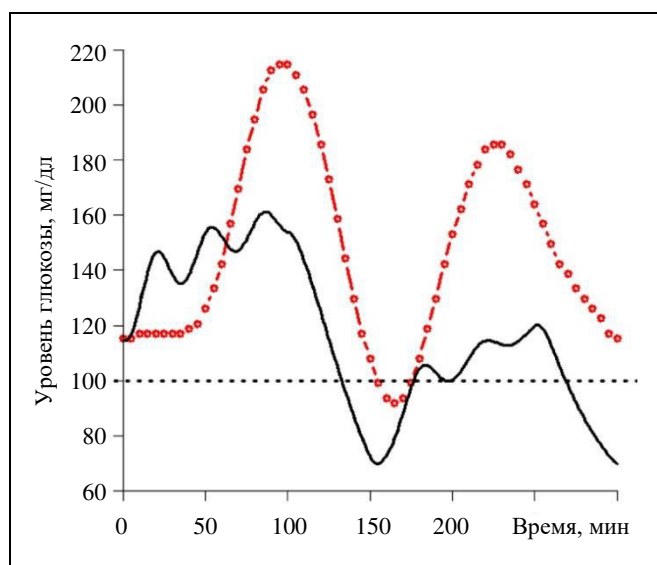


Рис. 3. Кривые изменения уровня глюкозы при терапевтическом управлении (красные круги) и при оптимальном ПД-управлении (сплошная линия)

и избежать сильного снижения уровня глюкозы относительно базального уровня в 100 мг/дл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкое внедрение в медицину средств хранения больших объемов информации, методов машинного обучения и анализа данных создало не только новые возможности повышения эффективности в области медицины и здравоохранения, но и выдвинуло новые требования к разработчикам автоматизированных систем. Миниатюризация электронных схем и увеличение скорости обработки информации позволило создавать как индивидуальные носимые медицинские многофункциональные измерительные приборы (умные часы), так и приборы лечебного назначения (инсулиновые помпы). Их высокая вычислительная мощность позволяет реализовать сложные алгоритмы лечения, опираясь на математические модели и современные алгоритмы оценивания наблюдений и прогноза состояния систем. Однако большое число уравнений в математических физиологических моделях обеспечивает детальное отображение процессов в организме, для определения значений параметров в таких моделях требуется и большое количество однородных данных, которые можно рассматривать как представителей одной и той же генеральной совокупности. Такое требование возможно обеспечить только при проведении строго контролируемых исследований, для которых сложно набрать число участников, достаточное для получения статистически надежных оценок. Особенно такая ситуация критична при создании индивидуализированных медицинских систем, в которых применяемая модель и алгоритм управления должны соответствовать особенностям конкретного человека, а подобрать группу людей, максимально схожих с данным человеком, невозможно.

В статье для решения этой проблемы предложено использовать упрощенную математическую модель и выделять группу ее параметров, изменение которых в наибольшей степени влияет на результат моделирования и на критерий качества управления. Анализ чувствительности критерия качества управления позволил существенно уменьшить число оцениваемых параметров при построении персонализированной модели пациента, полагая параметры, изменение которых мало влияет на результат моделирования, равными их

популяционным оценкам. На примере анализа фрагмента реальной непрерывной гликемической кривой показано, что оценка персонализированных параметров может проводиться по части кривой, давая хорошее согласие прогноза с кривой на интервале, на котором оценка параметров не проводилась. Исследование управления персонализированной моделью пациента с помощью линейного ПД-регулятора продемонстрировало эффективность автоматического управления по сравнению с «терапевтическим». Особенности поведения расчетной гликемической кривой при идентификации модели (см. рис. 2) и уровня глюкозы при оптимальном ПД-управлении (см. рис. 3) в первые 60 мин, по-видимому, являются следствием того, что начальные значения, использованные при расчетах, не соответствовали реальному состоянию пациента, отражающему влияние ранее проведенной терапии. Но из рисунков видно, что по истечении 60-минутного интервала влияние этого рассогласования снижается. Расширение описанной методологии построения персонализированной системы автоматического управления во врачебной практике моделирования позволит создавать персонализированные модели и алгоритмы управления, отражающие индивидуальные свойства пациентов. Такие модели будут эффективны при апробировании на новых подходах к лечению, при настройке медицинского оборудования, в частности носимого, с учетом особенностей пациентов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В уравнениях использованы следующие обозначения констант и переменных:

x_1 – отклонение концентрации глюкозы в крови от базального значения под действием инсулина (мг/дл),

x_2 – отклонение концентрации глюкозы в крови от базального значения под действием пищи и глюкагона (мг/дл),

x_3 – концентрации глюкагона в крови (нг/л),

x_4 – действие инсулина (1/мин),

x_5 – концентрации инсулина в крови (мЕД/л),

x_6 – измеренная сенсором концентрация глюкозы в интерстициальном пространстве,

G – концентрация глюкозы в крови (мг/дл),

$meal$ – поступление глюкозы с пищей (мг/дл/мин),

$meal_{inp}$ – прямоугольный импульс длительностью 100 мин,

$input$ – поступление экзогенного инсулина в кровоток (мЕД/л/мин),

n_1 – базальное значение концентрации глюкозы в крови (100 мг/дл),

t – время (мин).

Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -p_3 x_1 - x_4 G, \\ \frac{dx_2}{dt} &= -p_4 x_2 + p_5 x_3 + a \times meal, \\ \frac{dx_3}{dt} &= -g_3 x_3 + alpha \times \max(0, (c_3 - G)), \\ \frac{dx_4}{dt} &= -p_1 x_4 + p_2 x_5, \\ \frac{dx_5}{dt} &= -g_5 x_5 + beta \times \max(0, (G - c_5)) + input, \\ \frac{dx_6}{dt} &= -p_6 (x_6 - G), \\ \frac{dmeal}{dt} &= -p_m (meal - meal_{inp}), \\ G &= n_1 + x_1 + x_2. \end{aligned} \quad (П1)$$

Параметры в модели имеют следующий смысл:

p_1 – величина, обратная постоянной времени снижения действия инсулина (мин⁻¹),

p_2 – коэффициент интенсивности влияния концентрации инсулина на его действие (1/(мЕД/л)/мин),

p_3, p_4 – величины, обратные постоянным времени изменения концентрации глюкозы (мин⁻¹),

p_5 – коэффициент интенсивности влияния концентрации глюкагона на концентрацию глюкозы ((мг/дл)/(нг/л)/мин),

p_6 – обратная постоянная времени запаздывания измерения (0,075 мин⁻¹),

p_m – обратная постоянная времени усвоения пищи в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ),

a – коэффициент интенсивности влияния пищи на концентрацию глюкозы (б/р),

g_3 – величина, обратная постоянной времени снижения концентрации глюкагона (мин⁻¹),

g_5 – величина, обратная постоянной времени снижения концентрации инсулина (мин⁻¹),

$alpha$ – коэффициент интенсивности влияния снижения концентрации глюкозы относительно заданного уровня на концентрацию глюкагона ((нг/л)/(мг/дл)/мин),

$beta$ – коэффициент интенсивности влияния превышения концентрации глюкозы относительно заданного уровня на концентрацию инсулина ((мЕД/л)/(мг/дл)/мин),

c_3, c_5 – заданные уровни концентрации глюкозы в процессе выработки глюкагона и эндогенного инсулина соответственно (мг/дл).

ЛИТЕРАТУРА

1. Amisha F., Malik P., Pathania M., Rathaur V.K. Overview of Artificial Intelligence in Medicine // J. Family Med. Prim. Care. – 2019. – Vol. 8, no. 7. – P. 2328–2331.
2. Shortliffe, E.H. Computer-Based Medical Consultations: MYCIN. – New York: Elsevier, 1976. – 286 p.
3. Глазкова Т.Г., Гурарий К.Н., Даниленко С.И. и др. Возможности применения ЭВМ для клинико-рентгенологической



- дифференциальной диагностики рака и доброкачественного поражения пищевода // Вестник радиологии и рентгенологии. – 1971. – № 2. – С. 15–21. [Glazkova, T.G., Gurarii, K.N., Danilenko, S.I., et al. Vozmozhnosti primeneniya EHVМ dlya kliniko-rentgenologicheskoi differentsial'noi diagnostiki raka i dobrokachestvennogo porazheniya pishchevoda // Vestnik radiologii i rentgenologii. – 1971. – No. 2. – P. 15–21. (In Russian)]
4. Захарова Л.М., Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Использование методов коллективной экспертизы для анализа характеристик сложных объектов на примере лекарственных препаратов // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 2. – С. 135–142. [Zakharova, L.M., Pankova, L.A., Petrovskii, A.M., Shneiderman, M.V. Ispol'zovanie metodov kollektivnoi ehkspertizy dlya analiza kharakteristik slozhnykh ob'ektov na primere lekarstvennykh preparatov // Avtomatika i Telemekhanika. – 1980. – No. 2. – P. 135–142. (In Russian)]
 5. Захарова Л.М., Киселева Н.Е., Мучник И.Б. и др. Анализ развития гипертонической болезни по эмпирическим данным // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 9. – С. 114–122. [Zakharova, L.M., Kiseleva, N.E., Muchnik, I.B., et al. Analyzing the course of the hypertonic disease from empirical data // Avtomatika i Telemekhanika. – 1977. – No. 9. – P. 114–122. (In Russian)]
 6. Hamlet, P., Tremblay, J. Artificial Intelligence in Medicine // Metabolism. – 2017. – Vol. 69S. – P. S36–S40.
 7. Blyth, C.R. On Simpson's Paradox and the Sure-Thing Principle // Journal of the American Statistical Association. – 1972. – Vol. 67. – P. 364–366.
 8. Дедов И.И., Шестакова М.В. Сахарный диабет типа 1: реалии и перспективы. – МИА, 2016. – 504 с. [Dedov, I.I., Shestakova, M.V. Sakharnyi diabet tipa 1: realii i perspektivy. – MIA, 2016. – 504 s.]
 9. Georga, E.I., Protopappas, V.C., Polyzos, D., Fotiadis, D.I. Evaluation of Short-Term Predictors of Glucose Concentration in Type 1 Diabetes Combining Feature Ranking with Regression Models // Med. Biol. Eng. Comput. – 2015. – Vol. 53, no. 12. – P. 1305–1318.
 10. Meng, X.H., Huang, Y.X., Rao, D.P., et al. Comparison of three data mining models for predicting diabetes or prediabetes by risk factors // Kaohsiung J. Med. Sci. – 2013. – Vol. 29, no. 2. – P. 93–99.
 11. Anderson, J.P., Parikh, J.R., Shenfeld, D.K., et al. Reverse Engineering and Evaluation of Prediction Models for Progression to Type 2 Diabetes: An Application of Machine Learning Using Electronic Health Records // J. Diabetes. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 10, no. 1. – P. 6–18.
 12. Choi, S.B., Kim, W.J., Yoo, T.K., et al. Screening for Prediabetes Using Machine Learning Models // Comput. Math. Methods Med. – 2014. – Vol. 2014. – Art. ID 618976.
 13. Çalisir, D., Dogantekin, E. An Automatic Diabetes Diagnosis System Based on LDA Wavelet Support Vector Machine Classifier // Expert Syst. Appl. – 2011. – Vol. 38, no. 7. – P. 8311–8315.
 14. Georga, E.I., Protopappas, V.C., Ardigò, D., et al. Multivariate Prediction of Subcutaneous Glucose Concentration in Type 1 Diabetes Patients Based on Support Vector Regression // IEEE J. Biomed. Health Inform. – 2013. – Vol. 17, no. 1. – P. 71–81.
 15. Han, L., Luo, S., Yu, J., et al. Rule Extraction from Support Vector Machines Using Ensemble Learning Approach: An Application for Diagnosis of Diabetes // IEEE J Biomed Health Inform. – 2015. – Vol. 19, no. 2. – P. 728–734.
 16. Sudharsan, B., Peeples, M., Shomali, M. Hypoglycemia Prediction Using Machine Learning Models for Patients with Type 2 Diabetes // J. Diabetes Sci. Technol. – 2015. – Vol. 9, no. 1. – P. 86–90.
 17. Georga, E.I., Protopappas, V.C., Ardigò, D., et al. A Glucose Model Based on Support Vector Regression for the Prediction of Hypoglycemic Events under Free Living Conditions // Diabetes Technol. Ther. – 2013. – Vol. 15, no. 8. – P. 634–643.
 18. Jensen, M.H., Mahmoudi, Z., Christensen, T.F., et al. Evaluation of an Algorithm for Retrospective Hypoglycemia Detection Using Professional Continuous Glucose Monitoring Data // J. Diabetes Sci. Technol. – 2014. – Vol. 8, no. 1. – P. 117–122.
 19. Nallicheri, A., Mahoney, K.M., Gutow, H.A., et al. Review of Automated Insulin Delivery Systems for Type 1 Diabetes and Associated Time in Range Outcomes // touchREV Endocrinol. – 2022. – Vol. 18, no. 1. – P. 27–34.
 20. Карпельев В.А., Филиппов Ю.И., Тарасов Ю.В. и др. Математическое моделирование системы регуляции гликемии у пациентов с сахарным диабетом // Вестник РАМН. – 2015. – Т. 70, № 5. – P. 549–560. [Karpel'ev, V.A., Filippov, Yu.I., Tarasov, Yu.V., et al. Mathematical Modeling of the Blood Glucose Regulation System in Diabetes Mellitus Patients // Annals of the Russian Academy of Medical Sciences. – 2015. – Vol. 70, no. 5. – P. 549–560. (In Russian)]
 21. Soyly, S., Danisman, K. Comparison of PID based Control Algorithms for Daily Blood Glucose Control // Proceedings of the 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). – Budapest, Hungary, 2016. – DOI: 10.11159/eee16.130.
 22. Ortmann, L., Shi, D., Dassau, E., et al. Gaussian Process-Based Model Predictive Control of Blood Glucose for Patients with Type 1 Diabetes Mellitus // 11th Asian Control Conference (ASCC). – Gold Coast, Australia, 2017. – P. 1092–1097.
 23. Tuppad, A., Patil, S.D. Machine Learning for Diabetes Clinical Decision Support: A Review // Adv. in Comp. Int. – 2022. – Vol. 2. – Art. no. 22. – DOI: 10.1007/s43674-022-00034-y.
 24. Meng, X.H. Statistical Paradises and Paradoxes in Big Data (i): Law of Large Populations, Big Data Paradox, and the 2016 US Presidential Election // The Annals of Applied Statistics. – 2018. – Vol. 12, no. 2. – P. 685–726.
 25. Auffray, C., Charron, D., Hood, L. Predictive, Preventive, Personalized and Participatory Medicine: Back to the Future // Genome Medicine. – 2010. – Vol. 2. – Art. no. 57.
 26. Пальцев М.А., Белушкина Н.Н., Чабан Е.А. 4П-медицина как новая модель здравоохранения в российской федерации // ОРГЗДРАВ: новости, мнения, обучение. – 2015. – № 2. – С. 48–54. [Pal'tsev, M.A., Belushkina, N.N., Chaban, E.A. 4P-meditsina kak novaya model' zdravookhraneniya v rossiiskoi federatsii // ORGZDRAV: novosti, mneniya, obuchenie. – 2015. – No. 2. – P. 48–54. (In Russian)]
 27. Sorensen, J. A Physiological Model of Glucose Metabolism in Man and Its Use to Design and Assess Improved Insulin Therapies for Diabetes: Thesis (Sc. D.). – Boston: MIT, 1985. – 556 p.
 28. Markakis, M.G., Mitsis, G.D., Marmarelis, V.Z. Computational Study of an Augmented Minimal Model for Glycaemia Control // Proceedings of the 30-th IEEE EMBS Annual International Conference. – Vancouver, Canada, 2008. – P. 5445–5448.
 29. Древаль А.В., Шестакова Т.П., Древаль О.А. и др. Сложная математическая модель регулирования гликемии, включающая данные непрерывного мониторингирования гликемии и предназначенная для оптимизации помповой инсулиноте-

- рапии. В сб. «Помповая инсулиноterapia и непрерывное мониторингирование гдикемии» (Ред. А.В. Древаль). – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. – С. 255–265. [Dreval', A.V., Shestakova, T.P., Dreval', O.A., et al. Slozhnaya matematicheskaya model' regulirovaniya glikemii, vkluchayu-shchaya dannye nepreryvnogo monitorirovaniya gdikemii i prednaznachennaya dlya optimizatsii pompovoi insulinoterapii. V sb. «Pomповая insulinoterapiya i nepreryvnoe monitorirovanie gdikemii» (Red. A.V. Dreval'). – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. – P. 255–265. (In Russian)]
30. Михальский А.И., Новосельцева Ж.А. Моделирование непрерывной гликемической кривой // Труды 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2019). – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 1161–1166. [Mikhail'skii, A.I., Novosel'tseva, Zh.A. Modelirovanie nepreryvnoi glikemicheskoi krivoi // Trudy 12-i Mezhduna-rodnoi konferentsii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sisteM» (MLSD-2019). – М.: IPU RAN, 2019. – P. 1161–1166. (In Russian)]
31. Михальский А.И., Новосельцева Ж.А. Построение замкнутой системы управления уровнем глюкозы в крови с выделением персонализированных параметров модели объекта // Тр. 14-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2021). – М.: ИПУ РАН. – 2021. – P. 1733–1740. [Mikhail'skii, A.I., Novosel'tseva, Zh.A. Postroenie zamknutoi sistemy upravleniya urovнем glyukozy v krovi s vydeleniem personalizirovannykh parametrov modeli ob'ekta // Trudy 14-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» (MLSD-2021). – М.: IPU RAN, 2021. – S. 1733–1740. (In Russian)]
32. Древаль А.В., Новосельцев В.Н., Оркина Е.Л. Сложная математическая модель сахарного диабета в оценке различных механизмов патогенеза гипергликемии и подбора оптимальной помповой инсулиноterapia // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 11. – С. 174–176. [Dreval', A.V., Novosel'tsev, V.N., Orkina, E.L. Slozhnaya matematicheskaya model' sakharnogo diabeta v otsenke razlichnykh mekhanizmov patogeneza giperglikemii i podbora optimal'noi pompovoi insulinoterapii // Avtomatika i Telemekhanika. – 1982. – No. 11. – P. 174–176. (In Russian)]
33. Древаль А.В., Маколкин В.И., Новосельцев В.Н. и др. Проверка некоторых гипотез о патогенезе диабета методом математического моделирования // Биофизика. – 1983. – Т. 28, № 5. – С. 866–872. [Dreval', A.V., Makolkin, V.I., Novosel'tsev, V.N., et al. Proverka nekotorykh gipotez o patogeneze diabeta metodom matematicheskogo modelirovaniya // Biofizika. – 1983. – Vol. 28, no. 5. – P. 866–872. (In Russian)]
34. Shirin, A., Della Rossa, F., Klickstein, I., et al. Optimal Regulation of Blood Glucose Level in Type 1 Diabetes Using Insulin and Glucagon // PloS ONE. – 2019. – Vol. 14, no. 3. – e0213665, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213665>.
35. Marmarelis, V. Modeling Methodology for Nonlinear Physiological Systems // Ann. Biomed. Eng. – 1997. – Vol. 25. – P. 239–251.
36. Мерков А.Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения. – М.: Едиториал УРСС, 2011. – 256 с. [Merkov, A.B. Raspoznavanie obrazov. Vvedenie v metody statisticheskogo obucheniya. – М.: Editorial URSS, 2011. – 256 s. (In Russian)]
37. Marmarelis, V. Identification of Nonlinear Biological Systems Using Laguerre Expansions of Kernels // Ann. Biomed. Eng. – 1993. – Vol. 21. – P. 573–589.
38. Дедов И.И., Шестакова М.В., Майоров А.Ю. и др. Сахарный диабет 1 типа у взрослых // Сахарный диабет. – 2020. – Т. 23. – № 1S. – С. 42–114. [Dedov, I.I., Shestakova, M.V., Mayorov, A.Y., et al. Diabetes Mellitus Type 1 in Adults. // Diabetes Mellitus. – 2020. – Vol. 23, no. 1S. – P. 42–114. (In Russian)]
39. Covachev, B.P., Cox, D.J., Kumar, A.L., et al. Algorithmic Evaluation of Metabolic Control and Risk of Severe Hypoglycemia in Type 1 and Type 2 Diabetes Using Self-Monitoring Blood Glucose Data // Diabetes Technol. Ther. – 2003. – Vol. 5. – P. 817–828.
40. Nallicheri, A., Mahoney, K.M., Gutow, H.A., et al. Review of Automated Insulin Delivery Systems for Type 1 Diabetes and Associated Time in Range Outcomes // touchREV Endocrinol. – 2022. – Vol. 18, no. 1. – P. 27–34.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Б. Ядыкиным.

Поступила в редакцию 12.12.2022.
Принята к публикации 30.01.2023.

Михальский Анатолий Иванович – д-р биол. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ ipuran@yandex.ru,

Новосельцева Жанна Анатольевна – канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ novoselc.janna@yandex.ru,

Шестакова Татьяна Петровна – канд. мед. наук, ФУВ ГБУЗ МО МОНИКИ, г. Москва, ✉ t240169@yandex.ru.



REAL DATA-BASED PERSONALIZATION OF AN AUTOMATIC GLUCOSE CONTROL SYSTEM

A.I. Mikhalskii¹, J.A. Novoseltseva², and T.P. Shestakova³

^{1,2}Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Vladimirskii Moscow Regional Research Clinical Institute (MONIKI), Moscow, Russia

¹✉ ipuran@yandex.ru, ²✉ novoselc.janna@yandex.ru, ³✉ t240169@yandex.ru

Abstract. This paper overviews the application of machine learning and data analysis methods in medicine. The problem of constructing a closed personalized automatic control system for blood glucose level is considered. Such a system focuses on a particular patient and involves glucose level measurements in the interstitial space by a sensor. We describe a modification of the glucose level regulation model for the blood of a patient during the intake of glucose with meals and the supply of exogenous insulin into the bloodstream. Also, we propose an isolating search method for a group of personalized model parameters to be identified individually. As an example, model parameters are identified for a patient with type 1 diabetes based on real data, and the optimal PD control law of exogenous insulin supply is applied in the identified model. The result is compared with the actual glycemic curve after a single administration of insulin to the patient as recommended by a physician. As shown, the optimal PD control law effectively stabilizes blood glucose level to avoid the development of hypoglycemia. The results of this paper can be used to design automatic glucose control systems for humans (insulin pumps).

Keywords: blood glucose control, continuous glycemic curve, simplified mathematical model, personalized model parameters, PD controller.

ОЦЕНКА РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БОЛЕЗНЕЙ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ ОТ ШУМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Е.А. Давыдова, Е.Н. Бельская, У.С. Постникова, О.В. Тасейко

Аннотация. Приведены результаты обзора основных источников шумовых воздействий как одного из наиболее значимых физических факторов, оказывающих негативное влияние на человека в условиях городской среды. Показан удельный вес источников шумовых воздействий, не соответствующих гигиеническим нормативам, за 2012–2021 гг. Проведены измерения уровней шумового загрязнения для шести районов г. Красноярска, выявлены территории с наибольшими уровнями шума. Показано пространственное распределение уровней шума на территории Красноярска в вечернее время. Определены эквивалентные уровни средневзвешенного суточного шума в Центральном и Октябрьском районах Красноярска. Проведена оценка рисков здоровью населения от влияния шума с использованием показателей относительного риска возникновения болезней системы кровообращения. Отмечено, что обеспечение шумовой безопасности во многом зависит от оперативного установления уровней нагрузки и получения характеристик распределения шума на различных функциональных территориях с учетом многочисленности, разнообразия и комплексности воздействия источников. Полученные результаты могут быть использованы для изучения закономерностей воздействия факторов среды на здоровье человека, проведения гигиенической диагностики, разработки и внедрения комплекса мероприятий по снижению уровня воздействий и получения достоверной информации о характере и видах воздействий на здоровье населения.

Ключевые слова: шумовая безопасность, риск для здоровья населения, урбанизированные территории, измерение уровней шума, пространственное распределение, шумовое воздействие транспорта, эквивалентный уровень шума, относительный риск, риск болезней системы кровообращения, защита от транспортного шума.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается существенный рост негативного влияния на здоровье населения большого спектра техногенных и антропогенных факторов, среди которых факторы физической природы являются лидирующими по интенсивности воздействия на урбанизированных территориях. Антропогенное действие шума как одного из физических факторов существенно возросло в последние годы [1–3] вследствие роста технического оснащения, интенсификации использования городских территорий и развития сети транспортного комплекса. Шумовая безопасность на урбанизированных территориях безусловно является крайне актуальной задачей.

Характер производимого шума зависит от вида его источника. На урбанизированных территориях наиболее значимыми источниками шума являются:

- транспорт (автомобильный, рельсовый, воздушный и др.),
- предприятия (промышленные, сферы услуг, торговли и т. п.),
- строительные и ремонтные работы,
- спортивные и культурно-развлекательные объекты, в том числе звукоусилительные рекламные устройства,
- системы вентиляции и кондиционирования,
- объекты питания,
- внутриквартальные источники (хозяйственные дворы и т. п.),
- погрузочно-разгрузочные работы.



По данным государственного доклада «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году» [3], по шуму не соответствует гигиеническим нормативам 12,6 % объектов. В табл. 1 приведены данные по удельному весу промышленных предприятий и обследованных транспортных средств, не соответствующих гигиеническим нормативам по уровню шумовых воздействий.

В целом наблюдается тенденция к снижению уровня шумовых воздействий, которые носят долговременный, систематический и комплексный характер, но они по-прежнему высоки. Доля измерений шума на территории жилой застройки, не соответствующих гигиеническим нормативам, в 2021 г. составила 17,0 % [3]. Действие шума в условиях плотной застройки населенных пунктов является одним из наиболее значимых физических факторов, оказывающих влияние на среду обитания человека и, как следствие, на здоровье населения.

По данным различных исследователей, акустические загрязнения от транспортных магистралей составляют около 80 % всех внешних шумов города [1–3], вызывают раздражение и влияют на психологическое состояние, включая тревогу [4], усталость и напряжение [5, 6].

Продолжительность воздействия составляет 15–18 ч/сут. [1, 2]. В результате длительного воздействия шума нарушается нормальная деятель-

ность сердечно-сосудистой и нервной систем, пищеварительных и кроветворных органов, развивается профессиональная тугоухость, прогрессирование которой может привести к полной потере слуха. Шум в городах сокращает продолжительность жизни человека. Чрезмерный шум может стать причиной нервного истощения, психической угнетённости, вегетативного невроза, язвенной болезни, расстройства эндокринной и сердечно-сосудистой систем [7]. Шум в ночное время приводит к нарушению сна, что может быть причиной особого беспокойства. Нарушенный сон может оказывать негативное влияние на многие аспекты здоровья и благополучия, вызывая ухудшение внимания, консолидации памяти, нейроэндокринных и метаболических функций, настроения и общего качества жизни. Ночной шум также влияет на вегетативные функции: эпидемиологические исследования показали, что длительное воздействие ночного шума окружающей среды может повысить риск развития сердечно-сосудистых заболеваний [8].

В структуре общей заболеваемости населения Красноярского края болезни системы кровообращения (БСК) занимают второе место [9, 10]. В табл. 2 представлены данные о заболеваемости БСК, в том числе впервые диагностированных случаев. Прирост показателя общей заболеваемости наблюдался до 2019 г., в 2020–2021 гг. общая заболеваемость снизилась.

Таблица 1

Удельный вес промышленных предприятий и обследованных транспортных средств, не соответствующих гигиеническим нормативам по уровню шумовых воздействий

Годы	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Удельный вес промышленных предприятий, не соответствующих гигиеническим нормативам по уровню шумовых воздействий, %	35,9	33,9	33,1	31,5	32,7	32,4	31	26,8	23,6	26,1
Удельный вес обследованных транспортных средств, не соответствующих гигиеническим нормативам по уровню шумовых воздействий, %	24,9	23,8	21,8	19,3	20,5	15,8	10,8	88,8	66,6	77,6

Таблица 2

Данные о заболеваемости и смертности от БСК по Красноярскому краю [3, 10]

Наименование показателя	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Население Красноярского края, тыс. чел.	2 876	2 877	2 874	2 866	2 856
Численность страдающих БСК по Красноярскому краю, тыс. чел.	716	719	725	679	675
Численность заболевших БСК по Красноярскому краю с впервые установленным диагнозом, тыс. чел.	106	108	96	84	83
Смертность от БСК по Красноярскому краю на 100 000 чел. населения	574,2	587,6	589,4	657,2	688,0

Основная доля (54,3 %) в суммарной распространенности БСК приходится на болезни, характеризующиеся повышенным кровяным давлением, первичная заболеваемость по этой группе также растет. Доля остальных видов БСК значительно меньше. Исследования показывают, что воздействие высоких уровней шума увеличивает кровяное давление у человека [7].

Общая заболеваемость взрослого населения Красноярского края БСК за последние пять лет уменьшилась на 3,3 %, первичная – на 16,7 %. В пожилом возрасте, когда возникают необратимые изменения в сосудах, в значительной степени ограничивающие их адаптационные возможности, БСК встречаются значительно чаще.

Целью исследования являлось изучение уровней шумового действия автотранспорта на здоровье населения г. Красноярска. Построение карт шумового загрязнения и оценка рисков возникновения болезней системы кровообращения в условиях акустических воздействий выполнялись на основе измеренных в различных районах Красноярска уровней шума.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения уровней шумовых воздействий проводились в период с апреля по май 2021 г. с использованием шумомера «СЕМ DT-815» (диапазон 30–130 дБ; динамический диапазон 50 Дб; диапазон измерений: Low 30–80 дБ, Med 50–100 дБ, High 80–130 дБ, Auto 30–130 дБ; частотный диапазон: 31,5–8000 Гц; скорость измерения – 2 изм./с) в Центральном, Октябрьском, Кировском, Железнодорожном, Свердловском районах и в микрорайоне Взлётка Советского района г. Красноярска на высоте $1,5 \pm 0,1$ м от уровня покрытия проезжей части, на обочине на расстоянии $7,5 \pm 0,2$ м от оси ближайшей к точке измерения полосы или пути движения транспортных средств.

В каждом районе выбиралось шесть точек (перекрестки с оживленным движением автотранспорта, парки, жилой сектор, объекты социальной культуры, мосты и т. п.), измерения на которых выполнялись в дневное и вечернее время в течение недели; всего выполнено 504 измерения.

Согласно рекомендациям Руководства по вопросам шума в окружающей среде для Европейского региона Всемирной организации здравоохранения [11] шум, производимый автомобильным транспортом, необходимо снижать до эквива-

лентного уровня суточного шума L_{den} ниже 53 дБА, поскольку шум от движения автомобильного транспорта выше этого уровня ассоциируется с негативными последствиями для здоровья человека. В ночное время уровень шума не должен превышать 45 дБА, поскольку шум от автомобильного движения выше этого уровня ассоциируется с негативным влиянием на сон.

Оценку риска для здоровья населения от воздействия шума в РФ принято выполнять на основе эволюционных моделей, которые также имеют широкое применение для задач оценки рисков от таких факторов окружающей среды, как загрязнение воздуха, электромагнитное излучение и т. д. [12]. Получаемое с помощью рекуррентного соотношения значение риска выражается через показатель относительного риска, не являющегося вероятностной характеристикой, но демонстрирующего, во сколько раз риск развития заболевания в случае наличия у человека данного фактора риска больше, чем при его отсутствии [13]. В международной практике, наиболее часто применяемой является регрессия Кокса, или модель пропорциональных рисков. Зависимость уровня риска от фактора воздействия в данной модели имеет экспоненциальный характер, риск является функцией времени и также может превышать единицу [14–16]. Достаточно распространена оценка относительного риска через расчет соотношения шансов возникновения негативных эффектов к фоновому значению показателя здоровья (заболеваемости или смертности) с оценкой статистической значимости полученных отличий. Полученный таким образом показатель также используется для оценки негативных эффектов для здоровья населения как от физических, так и от химических факторов воздействия [17, 18].

Оценка рисков здоровью населения проводилась согласно методическим рекомендациям МР 2.1.10.0059-12 [19] с учётом оценки экспозиции, которая выполняется на основе результатов инструментальных измерений шума и включает в себя определение нормируемых параметров шума в заданный момент времени и продолжительности его воздействия, а также оценку суточного взвешенного шума как меры контакта населения с вредным фактором, что позволяет получать более точные значения. Выбор точек для акустических расчетов определялся расположением мест постоянного проживания населения, зон отдыха, внутридомовых территорий и т. п.

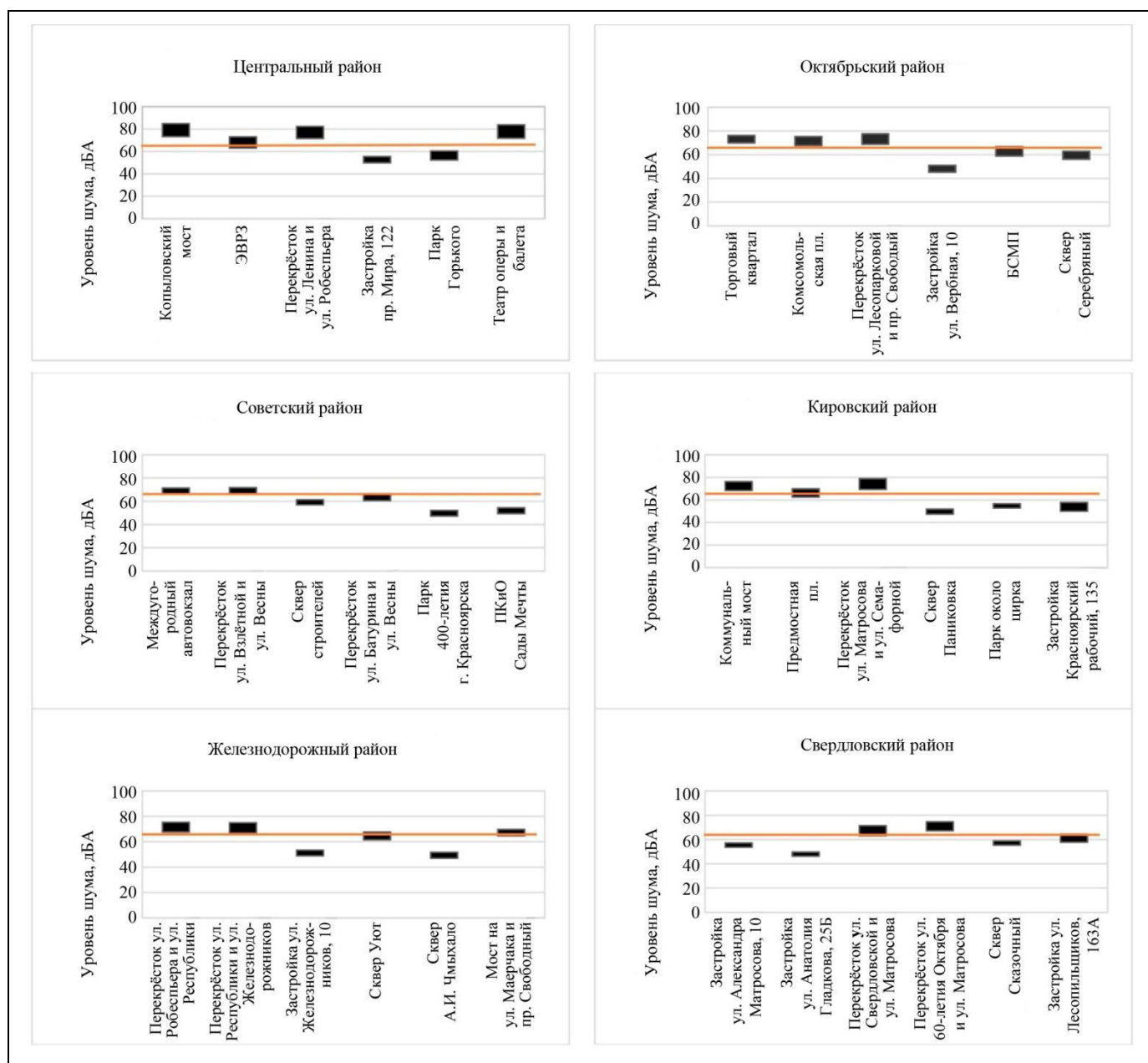


Рис. 1. Пространственная динамика уровней шума по районам Красноярска в вечернее время (оранжевой линией показан допустимый уровень шума)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЕЙ ШУМОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ Г. КРАСНОЯРСКА

Результаты измерений уровня шума приведены на рис. 1. В периоды максимальной интенсивности воздействия (вечернее время) наибольшие уровни шума наблюдались в Центральном и Октябрьском районах города. Значительный разброс результатов измерения в Железнодорожном и Свердловском районах объясняется ощутимым

снижением уровней шума на этих территориях при удалении от автодороги, внутри жилых кварталов и скверов.

Сравнение средних уровней шумовых загрязнений для Центрального и Октябрьского районов Красноярска с максимальными предельно допустимыми значениями уровня звука для источников непостоянных шумов, согласно своду правил СП 51.13330.2011 [20], показывает, что измеренные значения на семи анализируемых площадках превышают установленный норматив (табл. 3).

**Средние значения уровней шума в Центральном и Октябрьском районах
Красноярска, апрель 2021 г.**

Центральный район	Среднее значение уровня шума, дБА	ПДУ _{max} для источников непостоянного шума, дБА	Октябрьский район	Среднее значение уровня шума, дБА	ПДУ _{max} для источников непостоянного шума, дБА
Копыловский мост	78,2	70	Торговый комплекс на Свободном	73,7	70
ЭВРЗ	65,1	70	Комсомольская площадь	71,4	60
Перекресток ул. Ленина и ул. Робеспьера	74,8	70	Перекресток ул. Лесопарковая и пр. Свободный	74,1	70
Застройка проспект Мира, 122	50,0	70	Застройка Вербная, 10	47,4	70
Парк Горького	55,2	60	БСМП	62,6	60
Мост рядом с остановкой театр оперы и балета	75,0	70	Сквер Серебряный	58,9	60

На рис. 2 представлена карта шумового загрязнения Красноярска, построенная на основе данных измерений средствами QGIS.

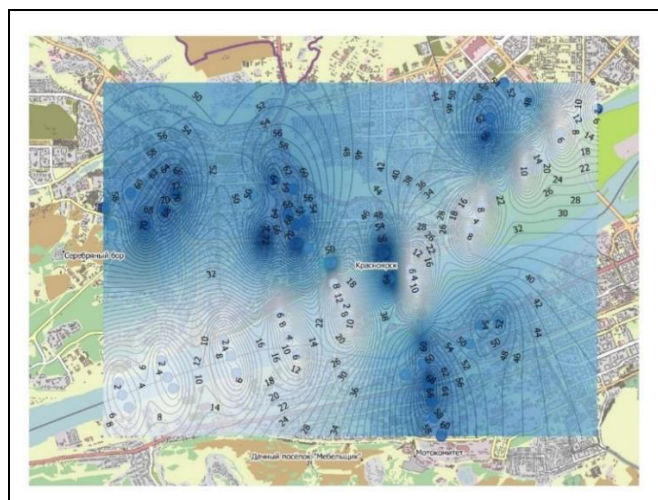


Рис. 2. Пространственное распределение уровней шума на территории г. Красноярска в вечернее время

Пространственное распределение уровней звукового воздействия в вечернее время наглядно демонстрирует наличие нескольких участков со значениями, превышающими установленные нормы. Изолинии характеризуют изменение значений по поверхности; там, где значение меняется не сильно, линии расположены дальше друг от друга; в местах, где значения возрастают или убывают быстро, линии расположены ближе друг к другу.

Наибольшая плотность изолиний получилась в Центральном районе, что объясняется значительной концентрацией транспорта, особенно в вечернее время.

3. ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ

Для оценки риска согласно ГОСТ Р 53187–2008 [21] и МР 2.1.10.0059-12 [19] использовался эквивалентный уровень средневзвешенного суточного шума L_{den} , при определении которого учитывались измеренные значения дневных и вечерних уровней:

$$L_{den} = 10 \lg \frac{1}{24} (16 \cdot 10^{(L_{day}/10)} + 8 \cdot 10^{((L_{night}+10)/10)}),$$

где L_{day} – эквивалентный уровень средневзвешенного дневного шума за исследуемый 16-часовой период, дБА; L_{night} – эквивалентный уровень средневзвешенного вечернего шума за исследуемый 8-часовой период, дБА.

Расчёты показывают, что эквивалентные уровни средневзвешенного шума находятся в диапазоне от 55 до 85 дБА для всех районов Красноярска. В табл. 4 приведены результаты расчётов для Центрального и Октябрьского районов Красноярска. Очевидно превышение рекомендованных уровней на всех анализируемых площадках.

Шум является общебиологическим раздражителем и оказывает влияние не только на слуховой



анализатор, но и на такие жизненно важные системы, как сердечно-сосудистая, нервная, пищеварения и кроветворения.

На основе полученных измерений выполнен расчёт относительного риска возникновения болезней системы кровообращения (БСК) от влияния шума согласно методическим рекомендациям МР 2.1.10.0059-12 [19]:

$$OR = 1,63 - 6,13 \cdot 10^{-4} L_{day,16}^2 + 7,36 \cdot 10^{-6} L_{day,16}^3,$$

где $L_{day,16}$ – эквивалентный уровень дневного шума, дБА.

Для определения характера связи фактора и исхода показатель относительного риска сравнивается с единицей: при значениях $OR \leq 1$ уровень шума

не влияет на вероятность возникновения болезней системы кровообращения, при значениях $OR > 1$ уровень шума повышает частоту возникновения болезней системы кровообращения.

Полученные средние значения относительных рисков возникновения болезней системы кровообращения от влияния шума для шести районов Красноярска находятся в диапазоне от 1,05 до 1,16 (табл. 5). Границы доверительных интервалов для величин риска OR , рассчитаны по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,01$.

Средний относительный риск по Красноярску незначительный и составляет 1,09. Отличие от уровня риска по эквивалентному уровню звука, скорректированного на уровень дневного воздействия, является несущественным.

Таблица 4

Эквивалентные уровни средневзвешенного суточного шума в Центральном и Октябрьском районах Красноярска, апрель 2021 г.

Центральный район	L_{day} , дБА	L_{night} , дБА	L_{den} , дБА	Октябрьский район	L_{day} , дБА	L_{night} , дБА	L_{den} , дБА
Копыловский мост	77,4	79,1	84,5	Торговый комплекс на Свободном	74,3	73,1	79,4
ЭВРЗ	62,1	68,1	73,5	Комсомольская площадь	71,5	71,5	77,5
Перекресток ул. Ленина и ул. Робеспьера	72,6	77,0	82,5	Перекресток ул. Лесопарковая и пр. Свободный	75,0	73,3	79,6
Застройка проспект Мира, 122	47,2	52,8	58,3	Застройка Вербная, 10	46,6	48,1	53,9
Парк Горького	54,0	56,4	62,1	БСМП	62,4	62,9	68,8
Мост рядом с остановкой театр оперы и балета	72,3	77,8	83,3	Сквер Серебряный	58,1	59,6	64,4

Таблица 5

Относительный риск возникновения БСК от влияния шума по районам Красноярска, апрель 2021 г.

Район	OR , среднее	Доверительный интервал	OR , по эквивалентному скорректированное
Центральный район	1,16	[1,09; 1,23]	1,17
Октябрьский район	1,14	[1,06; 1,22]	1,16
Советский район	1,05	[1,03; 1,06]	1,05
Кировский район	1,11	[1,06; 1,16]	1,11
Железнодорожный район	1,06	[1,04; 1,08]	1,06
Свердловский район	1,05	[1,01; 1,08]	1,05

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоснованного принятия решений по выбору конкретных мер защиты от шумов необходимо проводить мониторинг акустической нагрузки, который позволил бы получать достоверные данные о её распределении на территориях города [22]. При защите от транспортного шума большое значение имеют организационные меры, такие как: перераспределение потоков транспорта, ограничение грузового движения, ограничение скорости и др. Отсутствие общей концепции обеспечения экологической безопасности по шумовому фактору зачастую приводит к выбору случайных решений, направленных на поиск локальных дорогостоящих конструктивных методов защиты. Требуется переход от пассивных к активным методам регулирования шумового режима для формирования среды с заранее заданными свойствами, обеспечивающими необходимый уровень экологической безопасности. При этом от степени экологической обоснованности применяемых решений зависит не только качественное состояние среды, но и величина будущих необходимых затрат и средств на ликвидацию негативных воздействий [23].

Таким образом, формирование стратегии управления состоянием окружающей среды и ее качественными характеристиками, а также обоснование направлений инвестирования капиталовложений и рациональное использование урбанизированных территорий во многом зависит от комплексной экологической оценки техногенных нагрузок, к которым относится и шумовое загрязнение. Перечень задач, которые необходимо решать в рамках управления риском для здоровья населения, формируется для каждого субъекта Российской Федерации индивидуально, так как регионы и даже крупные города заметно различаются уровнем общественного здоровья, что указывает на неоднородность условий жизни и качества среды обитания [3].

Несмотря на снижение общей заболеваемости взрослого населения Красноярского края БСК за последние пять лет, её уровень по-прежнему высок и требует внимания как со стороны исследователей, так и со стороны органов, осуществляющих управление в области охраны окружающей среды.

Совместное действие шума и других физических факторов (электромагнитные поля, освещенность, температура воздуха, вибрация) может привести к усилению негативного влияния и вызывать разнонаправленные реакции со стороны всех функциональных систем организма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты измерения уровня шумовых воздействий в шести районах г. Красноярска. Полученные данные показывают, что в каждом районе наблюдается превышение максимальных уровней звука для источников непостоянного шума. Карта шумового загрязнения позволяет анализировать пространственное распределение звуковых воздействий с учётом рассеяния на территории города. Расчёт рисков возникновения болезней системы кровообращения в рассмотренных условиях подтверждает, что производимый уровень шума повышает частоту возникновения болезней кровеносных органов.

Полученные результаты могут быть использованы для изучения закономерностей воздействия факторов среды на здоровье, проведения гигиенической диагностики, разработки и внедрения комплекса мероприятий по снижению уровня воздействий и получения достоверной информации о характере и видах воздействий на здоровье населения. Обеспечение шумовой безопасности во многом зависит от оперативного установления уровней нагрузки и получения характеристик распределения шума на различных функциональных территориях с учетом многочисленности, разнообразия и комплексности воздействия источников. Очевидна необходимость дальнейших исследований реальных уровней звуковых воздействий и рисков для здоровья населения и всех жизненно важных систем организма.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев А.В.* Шумовая безопасность урбанизированных территорий // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – 2014. – Т. 16, № 1 – С. 299–305. [Vasilyev, A.V. Noise safety as a part of Ecological safety of urban territories // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 16, no. 1. – P. 299–305. (In Russian)]
2. *Васильев А.В.* Подходы к оценке экологического риска при воздействии акустических загрязнений // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 25–27. – DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-2-25-27>. [Vasil'ev A. Approaches to Estimation of Ecological Risk During the Impact of Acoustical Pollutions. Ecology and Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22, no. 2. – P. 25–27. (In Russian.)].
3. *Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году».* – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. – 340 с. [State Report “On the Conditions of Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population in the Russian Federation in 2021.” – Moscow: the Federal Service



- for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Rospotrebnadzor), 2022. – 340 s. (In Russian)] – URL: <https://www.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/594/sqywwl4tg5arqff6xv15dss0l7vvuank/Gosudarstvennyy-doklad.-O-sostoyanii-sanitarno-epidemiologicheskogo-blagopoluchiyanaseleniya-v-Rossiyskoy-Federatsii-v-2021-godu.pdf>.
4. Yu, B., Wen, L., Bai, J., and Chai, Y. Effect of Road and Railway Sound on Psychological and Physiological Responses in an Office Environment. – Buildings. – 2022. – Vol. 12, no. 1. – P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12010006>.
 5. Ma, H., Shu, S. An Experimental Study: The Restorative Effect of Soundscape Elements in a Simulated Open-Plan Office // Acta Acust. United Acust. – 2018. – Vol. 104, no. 1. – P. 106–115.
 6. Soares, F., Silva, E., Pereira, F., et al. The Influence of Noise Emitted by Vehicles on Pedestrian Crossing Decision-Making: A Study in a Virtual Environment // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, no. 8. – P. 1–15. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10082913>.
 7. О влиянии шума на здоровье человека (по материалам территориального отдела Управления Роспотребнадзора). URL: <http://23.rospotrebnadzor.ru/content/325/14474/> (дата обращения 21.09.2022 г.). [O vliyaniy shuma na zdorov'e cheloveka (pomaterialamterritorial'nogootdelaUpravleniyaRospotrebnadzora). – URL: <http://23.rospotrebnadzor.ru/content/325/14474/> (Accessed September 21, 2022)]
 8. Morsing, J.A., Smith, M.G., Ögren, M., et al. Wind Turbine Noise and Sleep: Pilot Studies on the Influence of Noise Characteristics // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2018. – Vol. 15, no. 11. – P. 1–14.
 9. Распоряжение правительства Красноярского края № 419-Р от 01.07.2021 г. Региональная программа Красноярского края «Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями». [Rasporyazhenie pravitel'stva Krasnoyarskogo kraya № 419-R ot 01.07.2021 g. Regional'naya programma Krasnoyarskogo kraya «Bor'ba s serdechno-sosudistymi zabolovaniyami». (In Russian)]
 10. Статистический сборник Заболеваемость населения Красноярского края в 2021 году. – Красноярск, 2022. – URL: <https://krasstat.gks.ru/folder/30015> (дата обращения 2.10.2022 г.) [Statisticheskiy sbornik Zabolavaemost' naseleniya Krasnoyarskogo kraya v 2021 godu. – Krasnoyarsk, 2022. – URL: <https://krasstat.gks.ru/folder/30015> (Accessed October 2, 2022).]
 11. Руководство по вопросам шума в окружающей среде для Европейского региона. – Всемирная организация здравоохранения, 2018. [Rukovodstvo po voprosam shuma v okruzhayushchei srede dlya Evropeiskogo regiona. – Vsemirnaya organizatsiya zdravookhraneniya, 2018.] – URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/383925/noise-guidelines-exec-sum-rus.pdf.
 12. Лебедева-Несевря Н.А. Теория, методология и практика анализа социально-детерминированных рисков здоровью населения Дисс... доктора соц. наук: 14.02.05, «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения». – Пермь, 2014. – 369 с. [Lebedeva-Nesevrya, N.A. Teoriya, metodologiyaipraktikaanalizasotsial'nodeterminirovannykhriskovzdorov'yunaseleniya. Diss... doktora sots. nauk: 14.02.05, «Federal'nyi nauchnyi tsentr mediko-profilakticheskikh tekhnologii upravleniya riskami zdorov'yu naseleniya». – Perm', 2014. – 369 s. (In Russian)]
 13. Косарев В.В., Лотков В.С., Бабанов С.А. Эпидемиологические исследования в медицине труда // Медицина труда и промышленная экология. – 2006. – № 8 – С. 1–4. [Kosarev, V.V., Lotkov, V.S., Babanov, S.A. Ehpideologicheskie issledovaniya v meditsine truda // Meditsina truda I promyshlennaya ehkologiya. – 2006. – No. 8 – P. 1–4. (In Russian)]
 14. Sørensen, M., Hvidberg, M., Andersen, Z.J., et al. Road Traffic Noise and Stroke: A Prospective Cohort Study // European Heart Journal. – 2011. – Vol. 32. – P. 737–744. – DOI: [10.1093/eurheartj/ehq466](https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehq466).
 15. Румянцев П.О., Саенко В.А., Румянцева У.В., Чекин С.Ю. Статистические методы анализа в клинической практике. Часть II. Анализ выживаемости и многомерная статистика // Проблемы эндокринологии. – 2009. – Т. 55. – № 6. – С. 48–56. [Rumyantsev, P.O., Saenko, V.A., Rumyantseva, U.V., Chekin, S.Yu. Statisticheskie metody analiza v klinicheskoi praktike. Chast' II. Analiz vyzhivaemosti i mnogomernaya statistika // Problemy ehndokrinologii. – 2009. – Vol. 55, no. 6. – P. 48–56. (In Russian)]
 16. Negahdari, H., Javadvpour, S., Moattar, F., Negahdari, H. Risk Assessment of Noise Pollution by Analyzing the Level of Sound Loudness Resulting from Central Traffic in Shiraz // Environmental Health Engineering and Management Journal. – 2018. – Vol. 5, no. 4. – P. 211–220. – DOI: [10.15171/EHEM.2018.29](https://doi.org/10.15171/EHEM.2018.29).
 17. Черных Д.А., Тасейко О.В. Оценка риска повышения смертности от температурных волн для населения города Красноярска // Экология человека. – 2018. – № 2. – С. 3–8. — [Chernykh, D.A., Taseiko, O.V. Otsenka riska povysheniya smertnosti ot temperaturnykh voln dlya naseleniya goroda Krasnoyarska // Ehkologiya cheloveka. – 2018. – No 2. – S. 3–8. (In Russian)] DOI [10.33396/1728-0869-2018-2-3-8](https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-2-3-8).
 18. Münzel, T., Kröller-Schön, S., Oelze, M., et al. Adverse Cardiovascular Effects of Traffic Noise with a Focus on Nighttime Noise and the New WHO Noise Guidelines // Annual Review of Public Health. – 2020. Vol. 4. – P. 309–328. – DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth081519-062400>.
 19. МР 2.1.10.0059-12 Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума. Методические рекомендации. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011 – 40 с. [MR 2.1.10.0059-12 Sostoyanie zdorov'ya naseleniya v svyazi s sostoyaniem okruzhayushchei sredy i usloviyami prozhivaniya naseleniya. Otsenka riska zdorov'yu naseleniya ot vozdeistviya transportnogo shuma. Metodicheskie rekomendatsii. – M.: Federal'nyit sentr gigieny i ehpidemiologii Rospotrebnadzora, 2011 – 40 s. (In Russian)]
 20. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Свод правил. – Москва: Минрегион России, 2010. [SP 51.13330.2011 Zashchita ot shuma. Svod pravil. – Moskva: Minregion Rossii, 2010. (In Russian)]
 21. ГОСТ Р 53187–2008 Национальный стандарт Российской федерации. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий. – Москва: Стандартиформ, 2012. – [GOST R 53187–2008 Natsional'nyi standard Rossiiskoi federatsii. Akustika. Shumovoi monitoring gorodskikh territorii. – Moskva: Standartinform, 2012. (In Russian)]
 22. Цукерников И.Е., Шубин И.Л. Шумовой мониторинг городских территорий // Градостроительство. – 2009. – № 5. – С. 94–100. [Tsukernikov, I.E. Shubin, I.L. Shumovoi monitoring

gorodskikh territorii. – 2009. – Gradostroitel'stvo. – 2009. – No. 5. – S. 94–100. (In Russian)] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shumovoy-monitoring-gorodskikh-territoriy/viewer>.

23. Пестрякова С.В. Метод оценки и регулирования шумового режима при обеспечении экологической безопасности урбанизированных территорий. Дисс... канд. техн. наук: 05.14.16, Науч.-исслед. ин-т строит. физики Рос. акад. архитектуры и строит. наук. – Москва, 1999. – 168 с. [Pestryakova, S.V. Metodotsenki i regulirovaniyashumovogorezhimapriobespecheniiekhologicheskobeзопасnosti urbanizirovannykh territorii. Diss... kand. tekhn. nauk: 05.14.16, Nauch.-issled. in-tstroit. fizikiRos. akad. Arkhitektury i stroit. nauk. – Moskva, 1999. – 168 s. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Михальским.

Поступила в редакцию 3.10.2022,
после доработки 31.01.2023.
Принята к публикации 14.02.2023.

Давыдова Екатерина Александровна – специалист, ООО «МФЦ Полус», Группа по формированию комплексной отчетности, Центр по сопровождению процессов охраны труда, ✉ DavydovaEA@polyus.com,

Бельская Екатерина Николаевна – канд. техн. наук, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, ✉ ketrin_nii@mail.ru,

Постникова Ульяна Сергеевна – старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, ✉ ulyana-ivanova@inbox.ru,

Тасейко Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, ✉ taseiko@gmail.com.

ASSESSING THE RISKS OF CIRCULATORY DISEASES DUE TO NOISE EXPOSURE IN URBAN AREAS

E.A. Davydova¹, E.N. Belskaia², U.S. Postnikova³, and O.V. Taseiko⁴

¹Multifunctional Center Polyus, Krasnoyarsk, Russia

^{2,3,4}Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

^{3,4}Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk Branch, Krasnoyarsk, Russia

¹✉ DavydovaEA@polyus.com, ²✉ ketrin_nii@mail.ru, ³✉ ulyana-ivanova@inbox.ru, ⁴✉ taseiko@gmail.com

Abstract. This paper describes the basic sources of noise exposure as significant negative physical factors for human health in an urban environment. We present the share of the industrial enterprises and vehicles not meeting hygienic standards of noise impacts for 2012–2021. Noise pollution levels are measured for six districts of Krasnoyarsk, and the territories with the highest levels are identified. The spatial distribution of noise levels is shown for Krasnoyarsk in the evening. The equivalent levels of weighted average daily noise exposure in the Tsentralny and Oktyabrsky districts of Krasnoyarsk are determined. Health risks are assessed by calculating the relative risk of circulatory diseases due to noise exposure. As noted, ensuring noise safety largely depends on determining load levels and obtaining characteristics of noise distribution in various functional areas promptly considering the multiplicity, diversity, and complexity of noise exposure sources. The obtained results can be used to study the impact of environmental factors on human health, perform hygienic diagnosis, elaborate and implement exposure reduction measures, and obtain reliable information about different exposures for human health.

Keywords: noise safety, health risk, urban territory, noise level measurement, spatial distribution, traffic noise, equivalent noise level, relative risk, risk of circulatory diseases, traffic noise protection.

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПРОМИССА МЕЖДУ СТЕПЕНЬЮ ДЕМПФИРОВАНИЯ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

М. Алхелу, Я. Вассуф, М.В. Коржуков, Е.С. Лобусов, В.В. Серебрянный

Аннотация. Эффективность работы подвески автомобиля обычно оценивается по ее способности обеспечивать максимальный комфорт передвижения для пассажиров и сохранение непрерывного контакта колес с дорожным полотном для обеспечения удержания автомобиля на дороге. Целью настоящей работы является разработка алгоритма активного управления подвеской для модели типа «полный автомобиль» (МПА) для улучшения ее характеристик с применением активного управления подавлением помех (АУПП). Характеристики комфорта при передвижении и управляемости на дороге для системы подвески в МПА исследуются в сравнении с характеристиками пассивной подвески. Предложен алгоритм оптимизации, позволяющий управлять компромиссом между комфортом и управляемостью с помощью одной переменной. Предлагаемый алгоритм основан на прогнозировании значений смещения кузова автомобиля и угла крена в зависимости от динамики активного регулятора подавления помех на заданном временном горизонте. Результаты показывают эффективность функционирования активной системы подвески с использованием предложенного алгоритма, которая выражается в улучшении характеристик комфорта передвижения и управляемости на дороге.

Ключевые слова: активное управление подавлением помех (АУПП), модель типа «полный автомобиль» (МПА), расширенный наблюдатель состояния (РНС), проблема комфорта, проблема управляемости на дороге, ПД-регулятор, следящий дифференциатор (СД).

ВВЕДЕНИЕ

Подвеска представляет собой одну из немногих систем автомобиля, которая обладает существенными недостатками [1]. Множество конструкторов транспортных средств и исследователей прикладывают огромные усилия для совершенствования систем управления подвеской автомобиля. Наиболее серьезной проблемой для работы подвески является необходимость повышения комфорта передвижения для пассажиров без потери устойчивости и контакта колес с дорогой [2, 3].

Проблема повышения комфорта заключается в способности системы подвески максимально изолировать пассажиров от вертикальных ускорений, вызываемых взаимодействием колес автомобиля с дорогой. Проблема устойчивости на дороге заключается в поддержании максимального контакта колес с дорожным покрытием. Попадание колеса в ухаб или выбоину вызывает значительную силу реакции, что позволяет увеличить контакт с до-

рожным покрытием. Таким образом поддерживается приемлемый уровень управляемости в каждый момент движения автомобиля.

Проблема управляемости состоит в нахождении баланса между двумя характеристиками: комфортом пассажиров и устойчивостью на дороге. Когда пружины системы подвески слишком жесткие или слишком мягкие, подвеска работает неэффективно, поскольку не может оптимальным образом изолировать автомобиль от воздействия неровностей дорожного полотна. Мягкая подвеска обеспечивает хороший комфорт при передвижении, тогда как жесткая подвеска обеспечивает хорошую устойчивость на дороге. Для обеспечения хорошей управляемости жесткость подвески должна быть настроена между крайними значениями.

Существует неизбежный конфликт между комфортом пассажиров и отклонением подвески из-за того, что положение колеса примерно соответствует профилю дороги на низких частотах (< 5 рад/с):

любое уменьшение хода кузова на этих частотах приведет к увеличению отклонения подвески [4]. В связи с этим актуальной является задача поиска компромисса между двумя указанными характеристиками.

Одним из наиболее распространенных способов управления этим компромиссом является обеспечение комфорта при передвижении в случае, когда относительное смещение между поддрессоренной и неподдрессоренной массой (ход подвески) выходит за пределы хода подвески. Регулятор в системе ограничивает ход подвески, чтобы гарантировать решение проблемы с управляемостью при предельных значениях [5].

Для разрешения конфликтов, возникающих между комфортом и управляемостью, был предложен набор механических решений. Одно из них приведено в статье [6]. Авторы упомянутой работы предложили критерии проектирования полуактивной системы подвески, которые могли бы значительно снизить или даже устранить конфликт между комфортом езды и управляемостью. Работа системы зависит от переключения между жесткой пружиной и режимом с высоким демпфированием (для обеспечения управляемости), а также мягкой пружиной и режимом с низким демпфированием (для обеспечения комфорта передвижения). Однако многие механические решения требуют непосредственного участия водителя в процессе управления, поскольку необходимо определить соответствующий режим работы с учетом рельефа дороги.

В работе [7] применяются генетические алгоритмы для оптимизации ряда показателей, характеризующих движение автомобиля, при наличии ограничений. Однако такая система должна иметь механизм переключения между режимами во время непосредственной работы.

В работе [8] рассматривается моделирование и управление системой активной подвески для модели типа «полный автомобиль». Был предложен линейный квадратичный регулятор (ЛКР, англ. *linear quadratic regulator*, LQR) для обеспечения комфорта пассажиров или управляемости автомобиля. Система управления была протестирована на неровностях различной высоты. Результаты тестов показали хорошую эффективность системы управления, однако в ней отсутствует механизм переключения между режимами работы.

В работах [9–11] модель прогнозирующего управления (МПУ, англ. *model predictive control*, MPC) применяется для обеспечения высокого качества работы ряда систем автомобиля, в том числе для повышения комфорта пассажиров и управ-

ляемости. Учитываются ограничения, поступающие на вход системы управления, и состояние системы, а также принимается во внимание информация, поступающая из системы предварительного просмотра. Однако для обеспечения работы всей системы требуется большой набор прогнозируемых данных и вычислений. Продолжительность выполнения процедуры оптимизации на основе МПУ может быть слишком большой для функционирования в режиме реального времени.

В работах [12–14] разработана надежная методика управления системой активной подвески. Для минимизации влияния рельефа дороги и препятствий на автомобиль и его пассажиров применяются H_∞ -регуляторы. Тем не менее, предложенная методика может быть расширена для того, чтобы сосредоточиться на проблеме управляемости. Конфликт между комфортом и управляемостью можно устранить с помощью введения положительной переменной, но это значительно увеличит размерность регулятора, а его настройка также потребует больших усилий.

В ряде предыдущих работ авторов (см., например, статьи [15–16]) для управления компромиссом между степенью управляемости и комфортом применяются методы, основанные на данных (в качестве основного – управление активным подавлением помех (АУПП)).

В настоящей статье основное внимание уделяется управлению конфликтом между комфортом и управляемостью с помощью АУПП. Для этого предлагается новый подход к оптимизации, основанный на минимизации показателя качества, который позволяет решать две проблемы с использованием одного параметра.

1. МОДЕЛЬ ТИПА «ПОЛНЫЙ АВТОМОБИЛЬ»

На рис. 1 показана модель автомобиля с активной подвеской с семью степенями свободы, которая включает в себя характеристики подъема, тангажа и крена поддрессоренной массы, вертикальных перемещений передних и задних подвесок. Для простоты вычислений и в целях моделирования предполагается, что все углы тангажа и крена малы. В качестве модели подвески рассматриваются линейные пружинные элементы с амортизатором, а шины, в свою очередь, моделируются как простые линейные пружины без амортизаторов. В целях упрощения уравнения, описывающие динамику транспортного средства, необходимо разделить на три части:

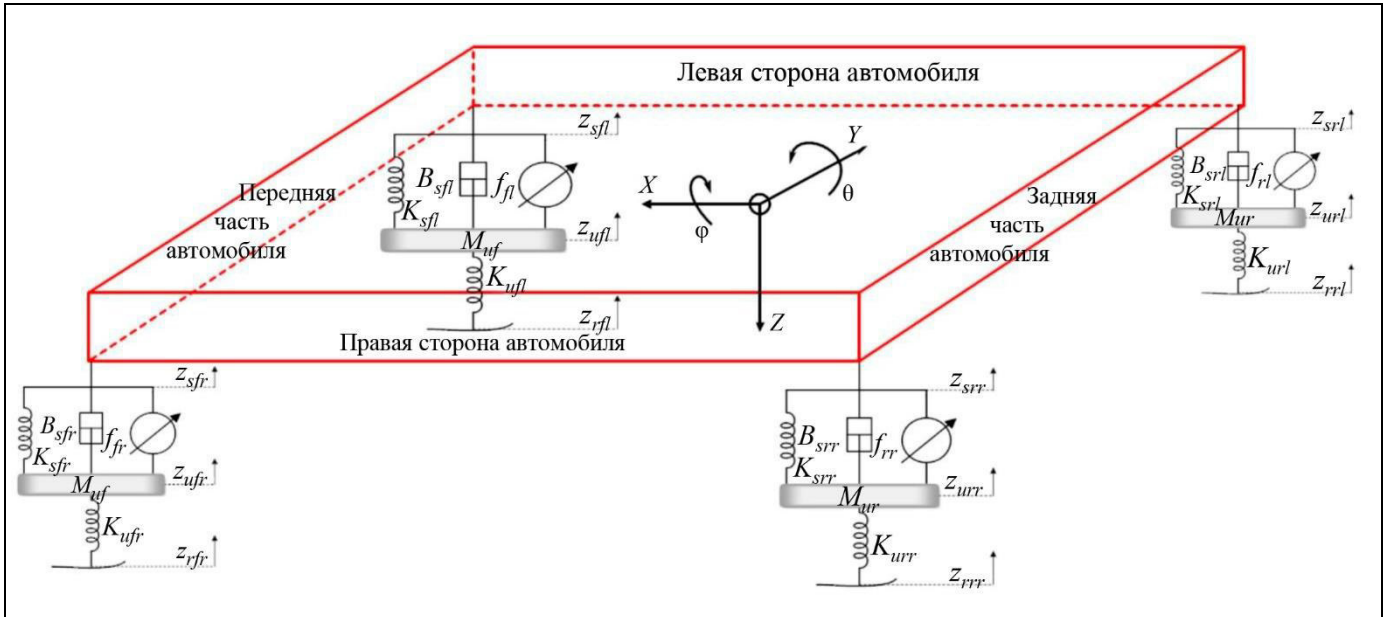


Рис. 1. Модель автомобиля с активной подвеской с семью степенями свободы

• уравнения неподдресоренной массы, которые описывают вертикальные ускорения колес автомобиля с точки зрения прогибов подвески и дорожных возмущений:

$$\begin{aligned} m_u \ddot{z}_{ufl} &= K_{sf} (z_{sfl} - z_{ufl}) + B_{sfl} (\dot{z}_{sfl} - \dot{z}_{ufl}) - \\ &\quad - K_u (z_{ufl} - z_{rfl}) - f_{fl}, \\ m_u \ddot{z}_{ufr} &= K_{sfr} (z_{sfr} - z_{ufr}) + B_{sfr} (\dot{z}_{sfr} - \dot{z}_{ufr}) - \\ &\quad - K_u (z_{ufr} - z_{rfr}) - f_{fr}, \\ m_u \ddot{z}_{url} &= K_{srl} (z_{srl} - z_{url}) + B_{srl} (\dot{z}_{srl} - \dot{z}_{url}) - \\ &\quad - K_u (z_{url} - z_{rrl}) - f_{rl}, \\ m_u \ddot{z}_{urr} &= K_{srr} (z_{srr} - z_{urr}) + B_{srr} (\dot{z}_{srr} - \dot{z}_{urr}) - \\ &\quad - K_u (z_{urr} - z_{rrr}) - f_{rr}; \end{aligned} \quad (1)$$

• уравнения углов шасси, которые описывают взаимосвязь между вертикальным смещением шасси автомобиля на каждом углу со всеми состояниями системы:

$$\begin{aligned} z_{sfl} &= w_f \phi + a\theta + z_s, \\ z_{sfr} &= -w_f \phi + a\theta + z_s, \\ z_{srl} &= w_r \phi - b\theta + z_s, \\ z_{srr} &= -w_r \phi - b\theta + z_s, \end{aligned}$$

где w – ширина автомобиля; a – приблизительное расстояние от центра масс автомобиля до передней части; b – приблизительное расстояние от центра масс автомобиля до задней части;

• уравнения поддресоренной массы, которые описывают вертикальное ускорение шасси автомобиля и линейные ускорения углов крена и тангажа:

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -K_{sf} (z_{sfl} - z_{ufl}) - K_{sf} (z_{sfr} - z_{ufr}) - \\ &\quad - K_{sr} (z_{srl} - z_{url}) - \dots - K_{sr} (z_{srr} - z_{urr}) - \\ &\quad - B_{sfl} (\dot{z}_{sfl} - \dot{z}_{ufl}) - B_{sfr} (\dot{z}_{sfr} - \dot{z}_{ufr}) - \dots \\ &\quad - B_{srl} (\dot{z}_{srl} - \dot{z}_{url}) - B_{srr} (\dot{z}_{srr} - \dot{z}_{urr}) + \\ &\quad + f_{fl} + f_{fr} + f_{rl} + f_{rr}, \\ I_{yy} \ddot{\theta} &= -aK_{sf} (z_{sfl} - z_{ufl}) - aK_{sf} (z_{sfr} - z_{ufr}) + \\ &\quad + bK_{sr} (z_{srl} - z_{url}) + bK_{sr} (z_{srr} - z_{urr}) - \\ &\quad - aB_{sfl} (\dot{z}_{sfl} - \dot{z}_{ufl}) - aB_{sfr} (\dot{z}_{sfr} - \dot{z}_{ufr}) + \\ &\quad + bB_{srl} (\dot{z}_{srl} - \dot{z}_{url}) + bB_{srr} (\dot{z}_{srr} - \dot{z}_{urr}) + \dots \\ &\quad + af_{fl} + af_{fr} - bf_{rl} - bf_{rr}, \\ I_{xx} \ddot{\phi} &= -w_f K_{sf} (z_{sfl} - z_{ufl}) + w_f K_{sf} (z_{sfr} - z_{ufr}) - \\ &\quad - w_r K_{sr} (z_{srl} - z_{url}) + w_r K_{sr} (z_{srr} - z_{urr}) - \\ &\quad - w_f B_{sfl} (\dot{z}_{sfl} - \dot{z}_{ufl}) + w_f B_{sfr} (\dot{z}_{sfr} - \dot{z}_{ufr}) - \\ &\quad - w_r B_{srl} (\dot{z}_{srl} - \dot{z}_{url}) + w_r B_{srr} (\dot{z}_{srr} - \dot{z}_{urr}) + \dots \\ &\quad + w_f f_{fl} - w_f f_{fr} + w_r f_{rl} - w_r f_{rr}. \end{aligned} \quad (2)$$

Переменные состояния системы описаны в табл. 1, а значения параметров системы приведены в табл. 2. Приведенные уравнения, переменные состояния и параметры взяты из работы [17].

Таблица 1

Переменные состояния системы для модели типа «полный автомобиль»

Обозначение	Описание
z	Положение подъема (высота подъема поддрессоренной массы)
θ	Угол тангажа
ϕ	Угол крена
z_{sfl}, z_{ufl}	Высота поддрессоренной / неподдрессоренной массы переднего левого колеса
z_{sfr}, z_{ufr}	Высота поддрессоренной / неподдрессоренной массы переднего правого колеса
z_{srl}, z_{url}	Высота поддрессоренной / неподдрессоренной массы заднего левого колеса
z_{srr}, z_{urr}	Высота поддрессоренной / неподдрессоренной массы заднего правого колеса
f_{fl}	Усилие управления слева спереди
f_{fr}	Усилие управления справа спереди
f_{rl}	Усилие управления слева сзади
f_{rr}	Усилие управления справа сзади

Таблица 2

Параметры системы в модели типа «полный автомобиль»

Обозначение	Описание	Значение
m_s	Поддрессоренная масса	1 500 кг
m_u	Неподдрессоренная масса	59 кг
$K_{sf} = K_{sfl} = K_{sfr}$	Жесткость пружины передней подвески	35 000 Н/м
$K_{sr} = K_{srl} = K_{srr}$	Жесткость пружины задней подвески	38 000 Н/м
K_u	Жесткость пружины шины	190 000 Н/м
$B_{sf} = B_{sfl} = B_{sfr}$	Демпфирование передней подвески	1 000 Н·с/м
$B_{sr} = B_{srl} = B_{srr}$	Демпфирование задней подвески	1 100 Н·с/м
I_{xx}	Момент инерции оси крена	460 кг·м ²
I_{yy}	Момент инерции оси тангажа	2 160 кг·м ²

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагаемый подход разработан на платформе моделирования, которая основана на микроконтроллере ARM (простая платформа, созданная авторами; содержит микроконтроллер, USB-порт и источник питания) с подключенными к нему коммерческими датчиками (бюджетные датчики, которые обычно используются в коммерческих продуктах) и используется для управления быстрыми активными подвесками.

Используются датчики четырех различных типов: акселерометры, гироскопы, магнитометры и потенциометры, соединенные сетью Ethernet, используемой для их подключения к центральному блоку управления. Наличие связи через Ethernet важно, поскольку это гарантирует модульность

архитектуры системы управления: ее отдельные блоки могут быть подключены или отключены без снижения скорости передачи данных.

На рис. 2 представлено расположение датчиков: используются четыре линейных потенциометра – по одному на каждой подвеске – вместе с набором из восьми трехосных MEMS-акселерометров, четыре из которых установлены на колесах, а ещё четыре – на раме кузова автомобиля, рядом с шарниром подвески. Блок измерения инерции (англ. *inertial measurement unit*, IMU) с девятью степенями свободы, который состоит из трехосного акселерометра, трехосного гироскопа и трехосного магнитометра, установлен рядом с центром тяжести автомобиля. Четыре датчика, расположенные на раме, выполняют две задачи: измеряют вертикальные ускорения вблизи места подвешивания и помогают оценить общее положение

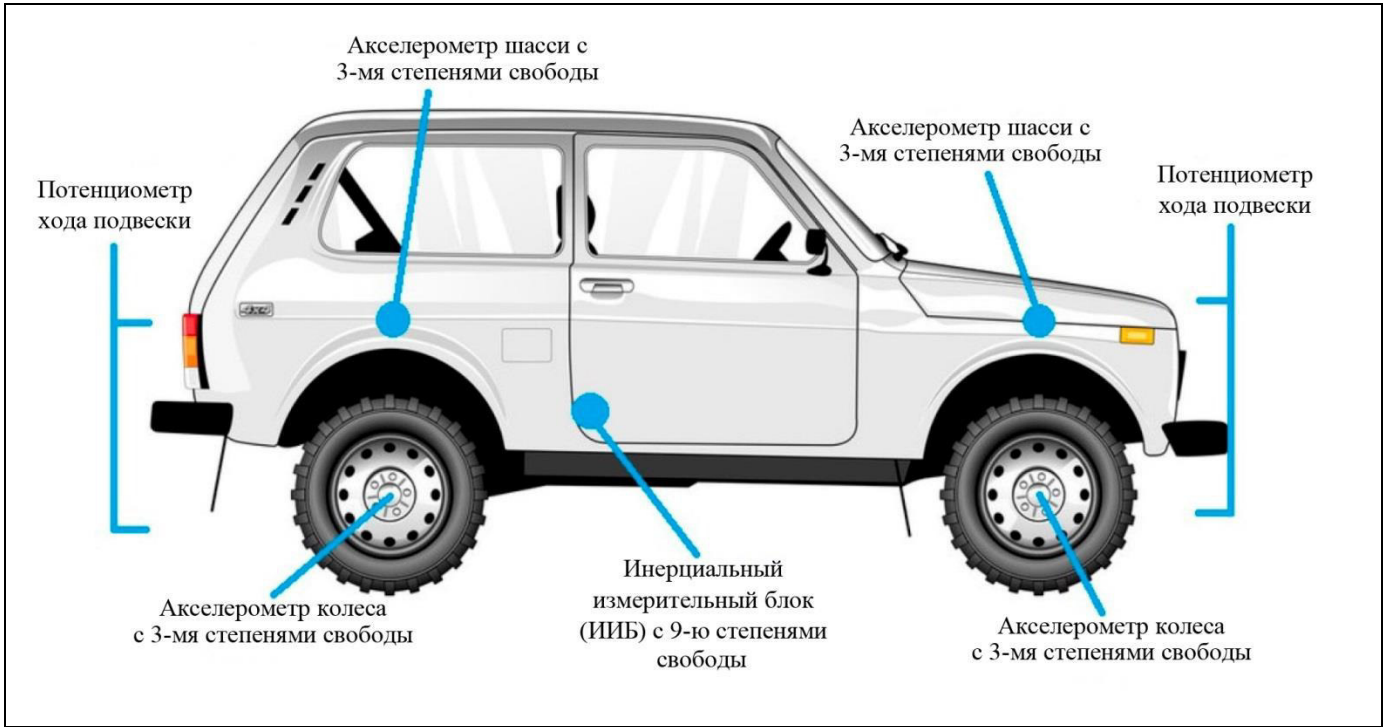


Рис. 2. Расположение датчиков на автомобиле

транспортного средства. Фактически четыре значения трехмерного ускорения, полученные с четырех узлов, передаются в IMU для лучшей оценки углов тангажа и крена транспортного средства.

Из-за небольшого количества информации о динамике системы датчик IMU 9 DOF будет использоваться для оценки углов тангажа, вращения и крена с применением алгоритма градиентного спуска (англ. *gradient descent algorithm*). Четыре потенциометра на каждом углу автомобиля будут использоваться для измерения отклонений подвески. Акселерометры на каждом колесе и на каждом соответствующем угловом шасси используются для оценки коэффициента динамической нагрузки (англ. *dynamic load coefficient, DLC*) каждого колеса. Это делается следующим образом.

Возвращаясь к динамическим уравнениям системы типа «четверть автомобиля» и последовательно суммируя их, получаем уравнение

$$\left. \begin{aligned} \frac{m_s}{4} \ddot{z}_{si} &= -K_{si} z_{si} - C_{si} \dot{z}_{si} + u_i \\ m_{ui} \ddot{z}_{ui} &= K_{si} z_{si} + C_{si} \dot{z}_{si} - K_u (z_{ui} - z_{ri}) - u_i \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{m_s}{4} \ddot{z}_{si} + m_u \ddot{z}_{ui} = -K_u (z_{ui} - z_{ri}); i \in \{fl, fr, rl, rr\}.$$

В результате

$$\begin{aligned} DLC_i &= RMS \left(\frac{K_u (z_{ui} - z_{ri})}{(m_{si} + m_u) g} \right) = \\ &= RMS \left(- \frac{(m_s / 4) \ddot{z}_{si} + m_u \ddot{z}_{ui}}{((m_s / 4) + m_u) g} \right). \end{aligned}$$

Здесь C_{si} – коэффициент демпфирования подвески i -го колеса; z_{ui} – вертикальное смещение i -го колеса; z_{si} – вертикальное смещение шасси i -го узла; z_{ri} – дорожный шум в i -м узле; RMS (root mean square) – среднеквадратичное значение.

На рис. 3 показана схема извлечения данных для управления с обратной связью.

Согласно изложенному в работе [12], степени комфорта и управляемости можно описать с помощью ускорения подъема центра тяжести транспортного средства и угла крена соответственно. Степень комфорта оценивается так:

$$\sigma_1 = RMS(\ddot{z}_s), \tag{3}$$

где \ddot{z}_s – ускорение поддресоренной массы всего кузова транспортного средства.

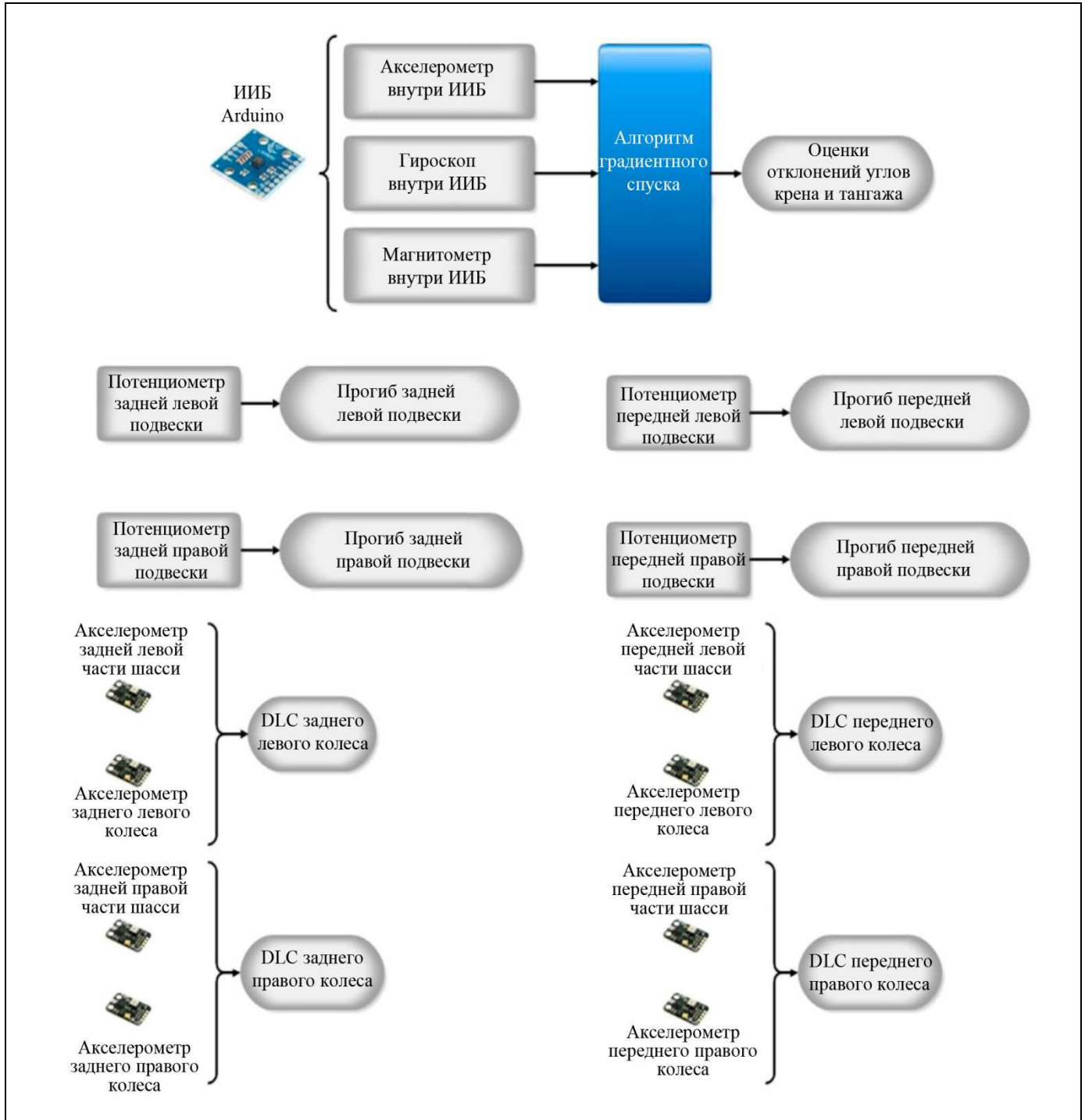


Рис. 3. Схема извлечения данных

Степень управляемости оценивается с использованием критерия

$$\sigma_2 = \sqrt{\int_{0\text{Hz}}^{20\text{Hz}} S_\varphi dw \times \frac{\sum_{i=1}^4 DLC_i}{4}}, \quad (4)$$

где DLC_i представляет собой коэффициент динамической нагрузки в i -м углу автомобиля, а S_φ –

спектральную плотность мощности (англ. *power spectral density*, PSD) угла крена.

Каждое колесо автомобиля снабжено гидравлическим быстродействующим приводом. На рис. 4 показана система подвески на одном колесе.

Предполагается, что гидравлический привод состоит из золотникового клапана (сервоклапана) и гидроцилиндра. На рис. 4 показаны: P_s и P_r – давление гидравлической жидкости, поступающей

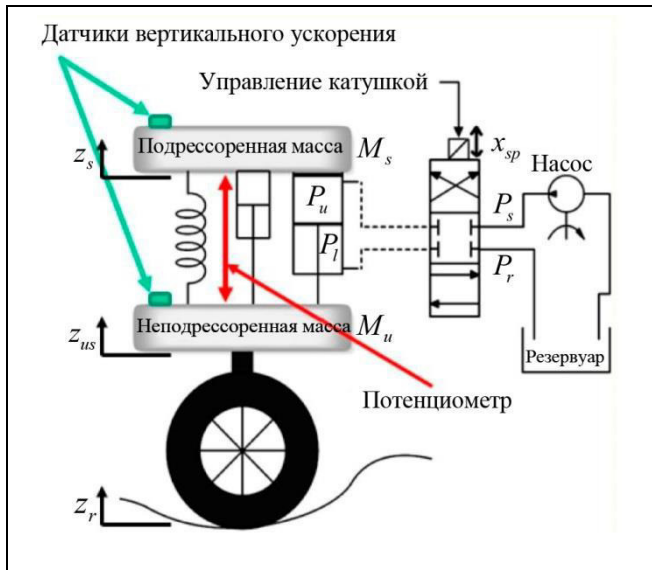


Рис. 4. Активный гидравлический привод

и выходящей из золотникового клапана соответственно; x_{sp} – положение золотникового клапана; P_u и P_l – давление масла в верхней и нижней камерах цилиндра соответственно; Z_u – вертикальное смещение колеса; Z_s – вертикальное смещение шасси; Z_r – дорожный шум.

Когда золотниковый клапан перемещается вверх (положительное значение), верхняя полость цилиндра соединяется с подающей линией и ее давление увеличивается. Тем временем нижняя полость подключается к линии сброса и ее давление уменьшается. Падение давления приводит к тому, что поршень цилиндра выдвигается или втягивается.

Для механического перемещения золотника клапана электрический ток подается на катушку,

которая соединена с сервоклапаном. Привод, на который было подано питание, переводит золотник в нужное положение. Уравнение динамики привода можно найти в работе [18].

Требуется найти закон управления и его параметры, которые влияют на степень управляемости автомобиля и степень демпфирования подвески. При этом должны выполняться следующие условия:

- Система управления должна быть построена с применением методов управления по данным наблюдений.
- Должны обеспечиваться определенные соотношения между степенью демпфирования и степенью управляемости в зависимости от текущих условий (при передвижении со скоростью до 70 км/ч по дороге класса D согласно стандарту ISO 8608).

Далее будет кратко представлен алгоритм регулирования на основе АУПП, который применяется для управления системой подвески автомобиля. АУПП представляет собой тип систем управления, основной целью которых является подавление помех. Алгоритм работает в условиях, когда полная модель объекта (например, привода) неизвестна, а наблюдатель устраняет неопределенности, связанные с недостаточностью информации.

3. СХЕМА ЛИНЕЙНОГО АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДАВЛЕНИЕМ ПОМЕХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В основе линейного активного подавления помех (ЛАУПП) лежит обобщенный подход АУПП [19]. На рис. 5 показаны компоненты структуры ЛАУПП второго порядка.

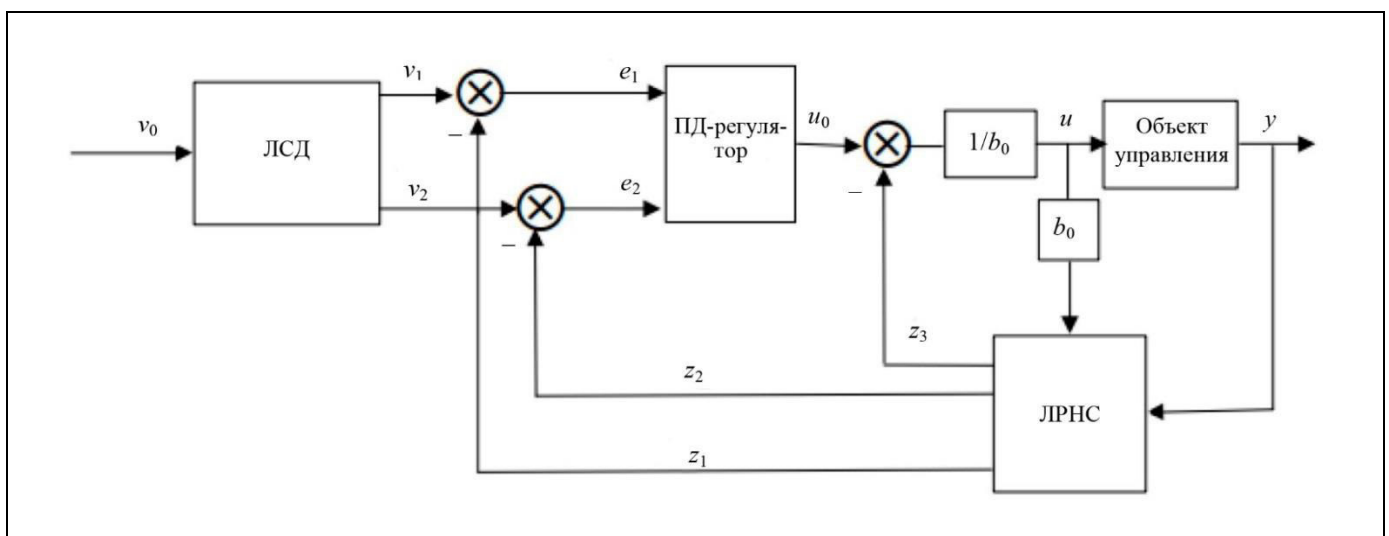


Рис. 5. Схема ЛАУПП второго порядка

Система управления на основе АУПП состоит из двух основных контуров: контура обратной связи и контура оценки и содержит четыре основных блока: регулятор, линейный расширенный наблюдатель состояния (ЛРНС), линейный следящий дифференциатор (ЛСД) и схему подавления помех.

3.1. Линейный следящий дифференциатор

Линейный следящий дифференциатор – это предварительный фильтр, который преобразует входной сигнал и скорость его изменения.

С помощью ЛСД входной сигнал сглаживается. Его выходами являются два сигнала: предварительно отфильтрованный полезный сигнал и скорость его изменения. Алгоритм выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= v_2, \\ \dot{v}_2 &= -k_1(v_1 - v_0) - k_2 v_2, \end{aligned}$$

где v_0 – полезный сигнал; v_1 – отфильтрованный полезный сигнал; v_2 – скорость изменения отфильтрованного полезного сигнала; k_1, k_2 – настраиваемые параметры ЛСД. Когда $k_1 = r^2, k_2 = 2r, r > 0$, перерегулирование отсутствует и время переходного процесса составляет примерно $T_0 = 7/r$, r – коэффициент, характеризующий скорость изменения отфильтрованного полезного сигнала.

Применение ЛСД, таким образом, позволяет одновременно обеспечить контроль опорного сигнала и его скорости. В настоящей работе ЛСД не используется, так как полезный сигнал всегда равен нулю.

3.2. Линейный расширенный наблюдатель состояния

Идея расширенного наблюдателя состояний (РНС) заключается в том, чтобы получить информацию об обобщенных возмущениях (неопределенностях и внешних возмущениях \hat{f} и внутренней динамике системы $\hat{y}, \dot{\hat{y}}$).

Таким образом, простой наблюдатель Люнбергера может быть использован для оценки общего возмущения системы и ее состояний следующим образом.

Динамику системы можно представить в общем виде:

$$\ddot{y} = g(t, y, \dot{y}) + b_0 u + w, \quad (5)$$

где y – выходной сигнал; u – управление; $g(\cdot)$ – функция, описывающая динамику объекта (вклю-

чая неизвестную динамику); w – внешнее возмущение; b_0 – коэффициент системы. Компоненты динамики системы ($g(\cdot), b_0, w$) обычно точно не известны. Объединив внешние и внутренние возмущения в одной функции $f(\cdot)$, систему можно представить в виде

$$\ddot{y} = f(t, y, \dot{y}, w) + b_0 u. \quad (6)$$

Уравнение (6) можно записать в пространстве состояний в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= f + b_0 u, \\ y &= x_1. \end{aligned}$$

Общее возмущение добавляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3 + a u, \\ \dot{x}_3 &= \dot{f}(t, x_1, x_2, w), \\ y &= x_1. \end{aligned}$$

Запишем последние уравнения в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_x x + B_x u + E_x \dot{f}, \\ y &= C_x x, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_x &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_x = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_x &= [1 \quad 0 \quad 0], E_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Линейный РНС (ЛРНС) может использоваться для наблюдения состояний x_1, x_2, x_3 . Таким образом, ЛРНС может быть представлен как

$$\dot{z}_1 = z_2 - \alpha_1 \hat{e}, \quad \dot{z}_2 = z_3 + \hat{b}_0 u - \alpha_2 \hat{e}, \quad \dot{z}_3 = -\alpha_3 \hat{e},$$

где z_1, z_2 и z_3 – аппроксимированные значения состояний x_1, x_2 и x_3 соответственно; α_1, α_2 и α_3 коэффициенты наблюдателя; $\hat{e} = y - z_1$ – оценка ошибки; \hat{b}_0 – аппроксимированное значение коэффициента b_0 в уравнении (1), оно может быть выбрано в этой структуре эмпирически.

Наблюдаемые переменные ($\hat{y} = z_1, \dot{\hat{y}} = z_2, \hat{f} = z_3$) наряду с аппроксимированным значением \hat{b}_0 затем используются для подавления помех и управления системой, как показано на рис. 5.



3.3. Схема подавления помех

Схема подавления помех может быть определена так:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{\hat{b}_0} = \frac{u_0 - \hat{f}}{\hat{b}_0},$$

где u_0 – выход регулятора.

Вернемся к уравнению (6) и подставим вместо u его расчетное значение:

$$\ddot{y} = f(\cdot) + b_0 \left(\frac{u_0 - \hat{f}}{\hat{b}_0} \right).$$

Если по результатам наблюдения можно считать, что $\hat{b}_0 \approx b_0$ и $\hat{f} \approx f$ то динамическое уравнение можно записать так:

$$\ddot{y} \approx u_0.$$

3.4. Регулятор обратной связи

Если в качестве регулятора обратной связи используется пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор, то управляющий сигнал u_0 можно записать в виде:

$$u_0(t) = K_p (y_{ref} - \hat{y}) + K_d \dot{\hat{y}}.$$

Коэффициенты ПД-регулятора могут быть выбраны следующим образом:

$$K_p = w_{CL}^2, \quad K_d = -2\xi w_{CL},$$

где w_{CL} – желаемый полюс замкнутой системы, а ξ – желаемый коэффициент демпфирования замкнутой системы.

Полюса наблюдателя w_{ESO} должны быть помещены слева на расстоянии, в n раз превышающем полюс замкнутого цикла, чтобы гарантировать, что динамика наблюдателя достаточно быстрая, $n \in [3, 10]$ т. е.

$$w_{ESO} = n w_{CL}.$$

Здесь для простоты все полюса равны. Это означает, что характеристическое уравнение наблюдателя будет таким:

$$\begin{aligned} D(\lambda) &= (\lambda - w_{ESO})^3 = \\ &= \lambda^3 - 3w_{ESO}\lambda^2 - 3w_{ESO}^2\lambda - w_{ESO}^3. \end{aligned}$$

Значения коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ вычисляются путем решения уравнения

$$D(\lambda) = |sI - A_x + LC_x|,$$

где

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix}.$$

В результате коэффициенты наблюдателя выбираются так:

$$\alpha_1 = -3w_{ESO}, \quad \alpha_2 = -3w_{ESO}^2, \quad \alpha_3 = -w_{ESO}^3.$$

Примечание. В настоящей статье рассматриваются три переменных управления: угол крена, угол тангажа и вертикальное смещение шасси. Считается, что каждый из этих каналов управляется независимым АУПП и общее уравнение, описывающее этот канал управления, определяется уравнением (5).

4. ПОДХОД НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННОГО АУПП

Если управление направлено на минимизацию вертикального смещения подрессоренной массы z_s , вертикальное ускорение также будет сведено к минимуму, обеспечивая необходимый комфорт. Таким образом, компромисс между степенью управляемости и степенью комфорта может быть интерпретирован как компромисс между смещением кузова z_s и углом крена φ .

Тогда показатель качества, который используется для оптимизации работы системы подвески, определяется следующим образом:

$$J = \int_0^{T_p} \left[(1 - \rho)(\varphi(t + \tau))^2 + \rho(z_s(t + \tau))^2 \right] d\tau, \quad (7)$$

где T_p – период, в течение которого осуществляется оптимизация; $z_s(t + \tau)$ – будущие значения вертикального смещения шасси через некоторое время τ ; $\varphi(t + \tau)$ – будущие значения угла крена.

Будущие значения прогнозируются разложением функций $z_s(t + \tau)$ и $\varphi(t + \tau)$ в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} z_s(t + \tau) &\approx z_s(t) + \tau \dot{z}_s(t) + \frac{\tau^2}{2} \ddot{z}_s(t), \\ \varphi(t + \tau) &\approx \varphi(t) + \tau \dot{\varphi}(t) + \frac{\tau^2}{2} \ddot{\varphi}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Оценки вторых производных выходных параметров выводятся из основного динамического уравнения системы, управляемой АУПП:

$$\begin{aligned} \hat{\ddot{z}}_s &= b_z \hat{u}_z + \hat{f}_z, \\ \hat{\ddot{\varphi}} &= b_\varphi \hat{u}_\varphi + \hat{f}_\varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя уравнения (9) в уравнения (8), мы получаем

$$\begin{aligned}\hat{z}_s(t+\tau) &\approx T(\tau)(\hat{X}_z + \hat{U}_z), \\ \hat{\phi}(t+\tau) &\approx T(\tau)(\hat{X}_\phi + \hat{U}_\phi),\end{aligned}$$

где

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \end{bmatrix}, \hat{X}_z = \begin{bmatrix} z_s & \dot{z}_s & \hat{f}_z \end{bmatrix}^T, \\ \hat{U}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_z \hat{u}_z \end{bmatrix}^T$$

$$\text{и } \hat{X}_\phi = \begin{bmatrix} \phi & \dot{\phi} & \hat{f}_\phi \end{bmatrix}^T, \hat{U}_\phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_\phi \hat{u}_\phi \end{bmatrix}^T.$$

В результате показатель качества может быть записан следующим образом:

$$J = \int_0^{T_p} \rho [T(\tau)(\hat{X}_z + \hat{U}_z)]^2 + \\ + (1-\rho) [T(\tau)(\hat{X}_\phi + \hat{U}_\phi)]^2 d\tau.$$

Преобразуем уравнение (7) к следующему выражению:

$$J = \frac{\rho}{2} [\hat{X}_z^T + \hat{U}_z^T] T_s [(\hat{X}_z + \hat{U}_z)] + \\ + \frac{1-\rho}{2} [\hat{X}_\phi^T + \hat{U}_\phi^T] T_s [\hat{X}_\phi + \hat{U}_\phi],$$

где

$$T_s = \int_0^{T_p} T^T(\tau) T(\tau) d\tau = \begin{bmatrix} T_p & \frac{T_p^2}{2} & \frac{T_p^3}{6} \\ \frac{T_p^2}{2} & \frac{T_p^3}{3} & \frac{T_p^4}{8} \\ \frac{T_p^3}{6} & \frac{T_p^4}{8} & \frac{T_p^5}{20} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}.$$

Обозначим $\hat{X}_{1z} = [z_s, \dot{z}_s]^T$, $\hat{X}_{2z} = \hat{f}_z$, $\hat{U}_{2z} = b_z \hat{u}_z$, $\hat{X}_{1\phi} = [\phi, \dot{\phi}]^T$, $\hat{X}_{2\phi} = \hat{f}_\phi$, $\hat{U}_{2\phi} = b_\phi \hat{u}_\phi$. Тогда показатель качества примет вид:

$$J = \frac{\rho}{2} \begin{pmatrix} \hat{X}_{1z}^T & \hat{X}_{2z}^T + \hat{U}_{2z}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_{1z} \\ \hat{X}_{2z} + \hat{U}_{2z} \end{pmatrix} + \dots \\ + \frac{1-\rho}{2} \begin{pmatrix} \hat{X}_{1\phi}^T & \hat{X}_{2\phi}^T + \hat{U}_{2\phi}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_{1\phi} \\ \hat{X}_{2\phi} + \hat{U}_{2\phi} \end{pmatrix}.$$

Следовательно, частные производные показателя качества по управлению будут такими:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2z}} &= \frac{\rho}{2} (T_{12}^T \hat{X}_{1z} + T_{22}^T \hat{X}_{2z} + T_{21} \hat{X}_{1z} + \\ &+ T_{22} \hat{X}_{2z} + 2T_{22} \hat{U}_{2z}), \\ \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2\phi}} &= \frac{1-\rho}{2} (T_{12}^T \hat{X}_{1\phi} + T_{22}^T \hat{X}_{2\phi} + \\ &+ T_{21} \hat{X}_{1\phi} + T_{22} \hat{X}_{2\phi} + 2T_{22} \hat{U}_{2\phi}).\end{aligned}$$

Отмечая, что $T_{12}^T = T_{21}$, $T_{22}^T = T_{22}$, последнее выражение можно упростить:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2z}} &= \rho (T_{21} \hat{X}_{1z} + T_{22} (\hat{X}_{2z} + \hat{U}_{2z})), \\ \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2\phi}} &= (1-\rho) (T_{21} \hat{X}_{1\phi} + T_{22} (\hat{X}_{2\phi} + \hat{U}_{2\phi})).\end{aligned}$$

Если управление выбрано в виде

$$\hat{U}_2 = \begin{bmatrix} \rho \hat{U}_{2z} \\ (1-\rho) \hat{U}_{2\phi} \end{bmatrix}, \text{ то оптимальное управление}$$

определяется так: $\frac{\partial J}{\partial \hat{U}_2} = 0$, т. е.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2z}} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial \hat{U}_{2\phi}} = 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}T_{22} \hat{U}_{2z} &= -T_{21} \hat{X}_{1z} - T_{22} \hat{X}_{2z}, \\ T_{22} \hat{U}_{2\phi} &= -T_{21} \hat{X}_{1\phi} - T_{22} \hat{X}_{2\phi}.\end{aligned}$$

Это приводит к следующему закону управления:

$$\begin{aligned}\hat{U}_{2z} &= -(T_{22})^{-1} T_{21} \hat{X}_{1z} - \hat{X}_{2z}, \\ \hat{U}_{2\phi} &= -(T_{22})^{-1} T_{21} \hat{X}_{1\phi} - \hat{X}_{2\phi}.\end{aligned}$$

В итоге закон управления, применяемый к углам подъема и крена соответственно, определяется уравнением

$$u_i = -\frac{1}{b_{0i}} (K_{pi} (y_i - y_{ri}) + K_{di} \dot{y}_i + \hat{f}_i), \quad i = \{z, \phi\}, \quad (10)$$

где

$$K_{pz} = K_{p\phi} = \frac{10}{3T_p^2}; \quad K_{dz} = K_{d\phi} = \frac{5}{2T_p}. \quad (11)$$

Полос замкнутого контура и коэффициент демпфирования системы, управляемой с помощью



АУПП, могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\begin{aligned} K_p &= w_{CL}^2, \quad K_d = 2\xi w_{CL} \Rightarrow \\ -w_{CL} &= -\sqrt{K_p}, \quad \xi = 0,5 \frac{K_d}{\sqrt{K_p}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Следовательно, характеристическое уравнение всей системы будет $\Delta(s) = s^2 + K_d s + K_p$ и она всегда будет устойчивой по Гурвицу, если $K_p, K_d > 0$.

Это всегда верно, если $T_p > 0$.

Если закон управления с помощью АУПП в контурах подъема и крена выбран таким, как в уравнении (10), коэффициенты управления – как в уравнении (11), а коэффициенты наблюдателя – как в уравнении (12), то общая система всегда будет устойчивой. В этом случае предполагается, что в контуре управления углом тангажа функционирует другой регулятор АУПП, параметры которого выбираются эмпирически. На рис. 6 показана схема системы с замкнутым контуром.

Механизм распределения управления представляет собой матрицу распределения (*decoupling matrix*), в которую входят стабилизирующие силы подъема, тангажа и крена. Этот механизм выдает значение управляющих сил для подвесок четырех углов автомобиля. С учетом уравнения (2) механизм распределения может быть представлен следующим образом:

$$K = \text{Pinv} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ a & a & -b & -b \\ w_f & -w_f & w_r & -w_r \end{pmatrix},$$

где Pinv представляет собой операцию псевдообращения матрицы.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Тестирование предлагаемой стратегии управления проводится при условии, что дорожные неровности соответствуют стандарту ISO 8608 для дорог класса D, а скорость транспортного средства изменяется в пределах от 20 до 70 км/ч.

Во время тестирования вычисляется спектральная плотность мощности (англ. *power spectral density*, PSD) ускорения подрессоренной массы и PSD угла крена за 1000 с работы и, следовательно, вычисляются показатели комфорта и степени управляемости по формулам (3) и (4) соответственно.

На первом этапе наблюдается, как изменяется индекс комфорта и индекс степени управляемости при изменении коэффициента управления ρ , когда скорость автомобиля фиксируется на значении 54 км/ч. В конце этого этапа тестирования получаем балансовое значение ρ , которое может характеризовать достижение компромисса между степенью комфорта и степенью управляемости.

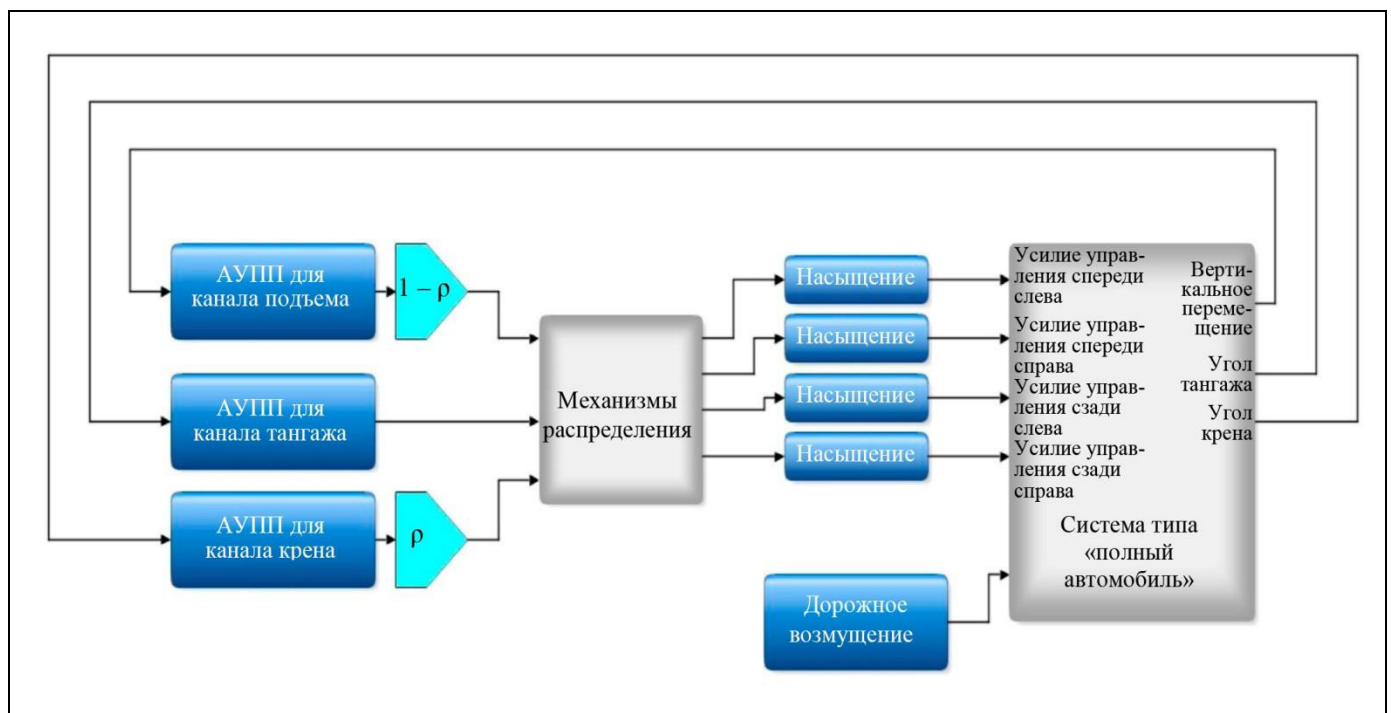


Рис. 6. Модель типа «полный автомобиль» с системой подвески, управляемой с помощью оптимизированного АУПП

На втором этапе наблюдается, как индекс комфорта и индекс степени управляемости изменяются при изменении скорости автомобиля, когда ρ фиксируется на балансовом значении.

Согласно стандарту ISO 2631-1 поездка считается комфортной, если среднеквадратичное значение ускорения подрессоренной массы составляет менее $0,31 \text{ м/с}^2$. В то время как согласно предложенному нами критерию необходимая степень управляемости достигается, если значение показателя (4) меньше $3,00 \times 10^{-4}$.

В табл. 3 показано изменение значений индекса комфорта и индекса степени управляемости при изменении значения ρ .

Таблица 3

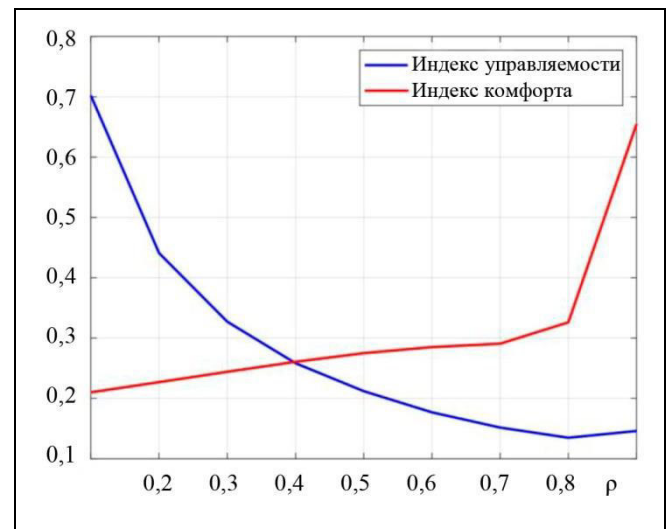
Индекс комфорта и индекс степени управляемости при изменении значения ρ

ρ	Индекс комфорта	Индекс степени управляемости
0,1	0,1653	$5,00 \times 10^{-4}$
0,2	0,1786	$3,14 \times 10^{-4}$
0,3	0,1921	$2,33 \times 10^{-4}$
0,4	0,2051	$1,48 \times 10^{-4}$
0,5	0,2164	$1,51 \times 10^{-4}$
0,6	0,2243	$1,26 \times 10^{-4}$
0,7	0,2287	$1,08 \times 10^{-4}$
0,8	0,2566	$0,96 \times 10^{-4}$
0,9	0,5153	$1,04 \times 10^{-4}$

На рис. 7 показаны нормализованные значения индекса комфорта и индекса управляемости в диапазоне $[0, 1]$. Можно видеть, что компромисс достигается в точке $\rho = 0,4$.

Теперь, выбрав $\rho = 0,4$, мы можем изучить изменение индекса комфорта и индекса степени управляемости в результате изменения скорости автомобиля (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что предложенный алгоритм отлично работает до скорости автомобиля 80 км/ч . Однако передвижение на этом автомобиле в таких условиях на скорости более 30 км/ч будет опасно в случае применения пассивной системы.


 Рис. 7. Нормализованные значения индекса комфорта и индекса управляемости в диапазоне $[0, 1]$

Можно утверждать, что с помощью предложенного алгоритма можно переключаться между различными режимами работы, изменяя значение одного коэффициента.

Таблица 4

Индекс комфорта и индекс степени управляемости при изменении скорости автомобиля

Скорость автомобиля, км/ч	Индекс комфорта		Индекс степени управляемости	
	Активная подвеска	Пассивная подвеска	Активная подвеска	Пассивная подвеска
20	0,1248	0,4169	$0,68 \times 10^{-4}$	$4,82 \times 10^{-4}$
30	0,1529	0,5106	$1,02 \times 10^{-4}$	$7,23 \times 10^{-4}$
40	0,1765	0,5896	$1,36 \times 10^{-4}$	$9,65 \times 10^{-4}$
50	0,1974	0,6592	$1,70 \times 10^{-4}$	$12,0 \times 10^{-4}$
60	0,2162	0,7221	$2,04 \times 10^{-4}$	$14,0 \times 10^{-4}$
70	0,2341	0,7800	$2,42 \times 10^{-4}$	$17,0 \times 10^{-4}$
80	0,2511	0,8338	$2,89 \times 10^{-4}$	$19,0 \times 10^{-4}$
90	0,2669	0,8844	$3,45 \times 10^{-4}$	$22,0 \times 10^{-4}$
100	0,2868	0,9323	$4,26 \times 10^{-4}$	$24,0 \times 10^{-4}$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена процедура оптимизации для управления компромиссом между комфортом и управляемостью в системе МПА. Алгоритм основан на выборе параметров АУПП с использованием показателя качества, который включает в себя две характеристики и балансирует между ними путем изменения значения одного коэффициента. Результаты доказали простоту и легкость процесса управления компромиссом таким образом. Продемонстрирована эффективность применения данного подхода, в условиях когда автомобиль движется по дороге класса D, соответствующей стандарту ISO 8608, с изменением скорости в диапазоне от 20 до 80 км/ч. Отметим, что наиболее важными особенностями этого подхода являются простота выбора параметров регулятора и простота применения. Данный алгоритм не может быть отнесен к классу прогнозирующего управления, поскольку управляющий сигнал не включен в показатель качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu, H., Gao, H. and Li, P. Handbook of Vehicle Suspension Control System. – Institution of Engineering and Technology, 2013. – 424 p.
2. Alhelou, M., Gavrilov A.I. Managing the Handling-Comfort Contradiction of a Quarter-Car System Using Kalman Filter // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2021. – No. 43(10). – P. 2292–2306.
3. Alhelou, M., Gavrilov, A.I. Unscented Kalman-Filter to Manage the Handling-Comfort Trade-off of Quarter-of-Vehicle // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2021. – Vol. 44, iss.1. – Art. id. 01423312211031774.
4. Pepe, G., Roveri, N., Carcaterra, A. Experimenting Sensors Network for Innovative Optimal Control of Car Suspensions // Sensors. – 2019. – Vol. 19, iss. 14. – Art. no. 3062.
5. Franz, D. Simulink Control Model of an Active Pneumatic Suspension System in Passenger Cars: Master of Science in Mechatronic Engineering Thesis. – Politecnico de Torino, 2019.
6. Els, P.S., Theron, N.J., Uys, P.E., Thoresson, M.J. The Ride Comfort vs. Handling Compromise for Off-road Vehicles // Journal of Terramechanics. – 2007. – Vol. 44, no. 4. – P. 303–317.
7. Shirahatti, A., Prasad, P., Panzade, P., Kulkarni, M. Optimal Design of Passenger Car Suspension for Ride and Road Holding // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2008. – No. 30. – P. 66–76.
8. Darus, R., Sam Y.M. Modeling and Control Active Suspension System for a Full Car Model // Proceedings of 2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications. – Kuala Lumpur, 2009. – P. 13–18.
9. Gohrle, C., Wagner, A., Schindler, A., Sawodny, O. Active Suspension Controller Using MPC Based on a Full-car Model with Preview Information // Proceedings of 2012 American Control Conference (ACC). – Montreal, 2012. – P. 497–502.
10. Nguyen, M.Q., Canale, M., Sename, O., Dugard, L. A Model Predictive Control Approach for Semi-active Suspension Con-

trol Problem of a Full Car // Proceedings of 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC). – Las Vegas, Nevada, 2016. – P. 721–726.

11. Verschueren, R., Zanon, M., Quirynen, R., Diehl, M. Time-Optimal Race Car Driving Using an Online Exact Hessian Based Nonlinear MPC Algorithm // Proceedings of 2016 European Control Conference. – Aalborg, 2016. – P. 141–147.
12. Rizvi, S.M.H., Abid, M., Khan, A.Q., et al. H_∞ control of 8 Degrees of Freedom Vehicle Active Suspension System // Journal of King Saud University-Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 30, no. 2. – P. 161–169.
13. Van der Sande, T.P.J., Gysen, B.L.J., Besselink, I.J.M., et al. Robust Control of an Electromagnetic Active Suspension System: Simulations and Measurements // Mechatronics. – 2013. – Vol. 23, no. 2 – P. 204–212.
14. Wang, C., Deng, K., Zhao, W., et al. Robust Control for Active Suspension System under Steering Condition // Science China Technological Sciences. – 2017. – Vol. 60, no. 2. – P. 199–208.
15. Alhelou, M., Wassouf, Y., and Gavrilov, A.I. Linear-Control vs. ADRC for Automatic Management of the Handling-Comfort Contradiction of a Quarter-Car System // International Journal of Heavy Vehicle Systems. – 2022. – Vol. 29, no. 2. – P. 145–162.
16. Alhelou, M., Wassouf, Y., Serebrenny, V.V., et al. Managing the Handling-Comfort Trade-Off of a Quarter Car Suspension System using Active Disturbance Rejection Control and Vyshnegradsky Equation // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2022. – Vol. 23, no. 7. – P. 367–375.
17. Kumar, S., Medhavi, A., Kumar, R. Modeling of an Active Suspension System with Different Suspension Parameters for Full Vehicle // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS). – 2021. – Vol. 28, no. 1. – P. 55–63.
18. Алхелу М., Вассуф Я., Серебряный В.В. и др. Адаптивное управление компромиссом между управляемостью и комфортом в модели типа «четверть автомобиля» // Проблемы управления. – 2022. – № 2. – С 36–48. [Alhelou, M., Wassouf, Y., Serebrenny, V.V., et al. The Handling-Comfort Trade-Off in a Quarter-Car System: Automatic Adaptive Management via Active Disturbance Rejection Control // Control Sciences. – 2022. – No. 2. – P. 29–39. (In Russian)]
19. Gao, Z., and Tian, G. Extended Active Disturbance Rejection Controller. US Patent no. 8180464 – 2012.

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

Поступила в редакцию 8.06.2022,
после доработки 14.12.2022.
Принята к публикации 25.01.2023

Алхелу Мухаммед – аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ✉ muhammed.alhelou@gmail.com,

Вассуф Язан – аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана; главный специалист по программированию БТС, ООО «ИЦ «КАМАЗ»», г. Москва, ✉ vassufya@student.bmstu.ru,

Коржуков Максим Валентинович – ООО «ИЦ «КАМАЗ»», г. Москва, ✉ KorzhukovMV@kamaz.ru,

Лобусов Евгений Сергеевич – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ✉ evgeny.lobusov@yandex.ru.

Серебряный Владимир Валерьевич – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ✉ vsereb@bmstu.ru.

MANAGING THE HANDLING-COMFORT TRADE-OFF IN THE FULL CAR MODEL BY ACTIVE SUSPENSION CONTROL

M. Alhelou¹, Y. Wassouf², M.V. Korzhukov³, E.S. Lobusov⁴, and V.V. Serebrenny⁵

^{1,2,4,5}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^{2,3}KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russia

¹✉ muhammed.alhelou@gmail.com ²✉ vassufya@student.bmstu.ru ³✉ KorzhukovMV@kamaz.ru
⁴✉ evgeny.lobusov@yandex.ru ⁵✉ vsereb@bmstu.ru

Abstract. The effectiveness of a car suspension is usually assessed by the ability to provide maximum ride comfort and maintain continuous contact of the wheels with the road (road holding). This paper develops an active suspension control algorithm for the full car model (FCM) to improve its characteristics by active disturbance rejection control (ADRC). The ride comfort and road holding characteristics of the FCM suspension system are compared with those of the passive suspension. We propose an optimization algorithm for managing the comfort-handling trade-off using a single variable. This algorithm is based on forecasting the future values of the car chassis displacement and the roll angle depending on the dynamics of the ADRC controller on a given horizon. The simulation results confirm the effectiveness of the active suspension system with the proposed algorithm in improving the ride comfort and road holding characteristics.

Keywords: active disturbance rejection control (ADRC), full car model (FCM), extended state observer, ride comfort, handling, PD controller, tracking differentiator.



XXX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

В декабре 2022 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН состоялась XXX Международная научная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Организаторы конференции – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Научный совет РАН по теории и процессам управления, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.

Прошло ровно 30 лет с даты проведения первой конференции по рассматриваемой тематике. Изначально данное ежегодное научное мероприятие задумывалось как конференция по проблемам управления в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС), что объясняется высокой актуальностью данной проблематики в 90-е годы прошлого века. Вследствие этого организаторами конференции в качестве основной была поставлена задача разработки теоретических и методологических основ повышения эффективности систем государственного управления в условиях ЧС, а также проектирования и внедрения в практику информационных систем быстрого развертывания, обеспечивающих оперативную и бесперебойную работу профильных структурных подразделений и служб.

С течением времени и по мере возникновения новых актуальных и требующих решения проблем, связанных с обеспечением устойчивого и безопасного развития нашей страны тематика представляемых на конференцию докладов стала существенно расширяться.

Появился целый ряд новых научных направлений как в рассматриваемой, так и в смежных предметных областях, среди которых: планирование, организация и автоматизация процессов

управления техногенной безопасностью; методы и технологии информационной поддержки принятия решений в условиях ЧС; общетеоретические и методологические проблемы обеспечения комплексной безопасности сложных организационных систем; проблемы управления обеспечением социальной, экономической, политической, региональной, экологической и общественной безопасности; управление геополитическим информационным противоборством; методы сценарного анализа процессов развития социально-экономических систем в условиях неопределенности и риска; технологии имитационного и сценарного моделирования; информационная и кибербезопасность (методы и технологии защиты телекоммуникаций и сетей, автоматизированных систем, программного обеспечения и данных от удаленных атак, повреждений или несанкционированного доступа) и др.

Как результат, в 1998 г. было принято решение изменить название конференции на нынешнее и существенно расширить состав секций, который за редким исключением остается неизменным в последние годы.

За прошедшие 30 лет ежегодная конференция фактически стала площадкой для обсуждения результатов научных исследований и обмена опытом решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в области управления безопасностью в условиях появления новых вызовов и угроз различного характера. Причем именно складывающаяся ситуация в стране и в мире определяла и определяет сегодня основные направления и тематику исследований, результаты которых находят свое отражение в представленных докладах.

Отличительной особенностью настоящей конференции является заметный рост интереса участников к поиску путей решения широкого круга теоретических и прикладных проблем повышения эффективности управления безопасностью лично-

сти, общества и государства в реалиях сегодняшнего дня.

В работе конференции приняли участие 99 авторов из 33-х организаций, представивших 73 доклада. Работа конференции велась по следующим секциям:

1. Общетеоретические и методологические вопросы обеспечения безопасности.
2. Проблемы обеспечения экономической и социально-политической безопасности.
3. Проблемы обеспечения информационной безопасности.
4. Кибербезопасность. Особенности обеспечения безопасности в социальных сетях.
5. Экологическая и техногенная безопасность.
6. Методы моделирования и принятия решений при управлении безопасностью сложных систем.
7. Автоматизированные системы и средства обеспечения безопасности сложных систем.

По многолетней традиции конференцию открыл развернутый доклад *Г.Г. Малинецкого* и *В.В. Кульбы* «Военные конфликты и промышленная политика в контексте теории управления рисками», посвященный анализу широкого круга проблем, с которыми сегодня столкнулась наша страна. В настоящее время, констатируют авторы, сфера геополитического противостояния России и западных стран значительно расширилась. Активная борьба сегодня ведется не только непосредственно на поле боя с использованием конвенциональных вооружений, но и в информационном и киберпространстве, в сфере смыслов и ценностей, а также, что представляет огромную опасность для человечества, в биологическом пространстве. В докладе особо подчеркивается, что необходимым условием победы в военно-политическом или, более широко, цивилизационном конфликте России и стран Запада является консолидация российского общества, осознание каждым его членом того факта, что нынешняя формально необъявленная война со странами НАТО должна стать делом всех и каждого, поскольку сегодня во многом определяется будущее нашей страны.

На основе результатов проведенного анализа авторы приводят развернутые предложения по противодействию внешним угрозам и по основным направлениям государственного развития в сложившейся крайне непростой ситуации. В частности, в докладе предлагается привести промышленную и научно-техническую политику нашей страны в соответствие новым задачам, внести ряд

структурных изменений в систему государственного управления с целью концентрации ресурсов и усилий на наиболее важных, ключевых направлениях развития нашей страны в условиях противостояния со странами НАТО и жестких экономических санкций.

Безусловно, ряд представленных в докладе выводов и предложений носят дискуссионный характер, а некоторые требуют дальнейших достаточно глубоких междисциплинарных исследований. Одновременно с этим отметим, что активная дискуссия в отечественном научном сообществе по многим рассматриваемым в представленной весьма интересной работе актуальным и в том числе требующим безотлагательного решения проблемам несомненно является полезной.

Доклад *В.В. Цыганова* «Инструменты влияния и агрессии глобального центра капитала при пределах роста» посвящен анализу механизмов манипулирования сознанием граждан западных государств (в том числе сопредельных с Россией) на основе нейропсихологической модели индивидуума, который рассматривается как активный элемент социально-экономической системы. В качестве базового инструмента информационно-психологического воздействия в работе рассматриваются механизмы манипулирования желаниями и страхами граждан. Реализация желаний стремящихся к накоплению финансовых средств индивидуумов в обществе потребления, констатирует автор, приводит к формированию локальных, а в условиях глобальной финансовой открытости – глобального центра капитала (ГЦК), в настоящее время расположенного в США. Однако, поскольку глобальные пределы роста в XXI в. ограничивают потребление (даже в стране пребывания ГЦК), центр капитала вынужден снижать остроту массового недовольства. С этой целью используются инструменты, расширяющие данные пределы роста за счет использования внешних источников дешевых ресурсов так называемых стран периферии мировой финансовой системы, в том числе путем захвата их рынков. Одновременно с этим для противодействия проявлениям недовольства индивидуумов-потребителей с целью удержания власти ГЦК использует механизмы управления страхами, заключающиеся в формировании образа внешнего врага, поддержке проявлений национализма (сознания собственной исключительности), а также наиболее агрессивной его формы – нацизма (национал-социализма).



Отметим, что практическое действие рассмотренных в докладе механизмов хорошо иллюстрируется, в частности, «перетягиванием» в США производственных компаний из Евросоюза и использованием «зерновой сделки» в основном для импорта продовольствия в страны ЕС вместо нуждающихся стран (расширение пределов роста), ростом националистических и ультраправых движений в странах западной Европы, а также обвиняющей во всех собственных проблемах Россию информационной политикой стран Запада (управление страхами).

Проблемам повышения эффективности регулирующих цифровые отношения правовых норм, а также оценки их влияния на процессы социально-экономического развития государства и общества посвящен доклад авторского коллектива под руководством чл.-корр. РАН *В.Л. Шульца* «Управление процессами трансформации права в условиях цифровизации на базе сценарного подхода». Масштабная цифровизация практически всех сторон жизнедеятельности человека, как отмечается в докладе, неизбежно приводит к целому ряду носящих фундаментальный характер изменений, причем обусловленных не столько ростом объемов циркулирующей информации, сколько появлением новых проблем и угроз в области безопасности личности, общества и государства. При этом особую актуальность проблемы повышения эффективности регулирующих межсубъектные отношения в цифровой среде норм законодательства приобретают в условиях открытой информационной войны со странами коллективного Запада.

Оценка эффективности действия законодательных актов, как отмечается в докладе, является чрезвычайно сложной комплексной проблемой в силу целого ряда объективных причин, среди которых: высокий уровень неопределенности и «информационной размытости» объектов исследования; значительная инерционность реакции социально-экономической системы на принимаемые решения по совершенствованию процессов законодательного регулирования; ограниченность практического опыта в решении значительной части связанных с развитием высоких технологий правовых проблем и т. д. В этих условиях, делают вывод авторы, возрастает актуальность задачи создания эффективных и одновременно с этим достаточно универсальных методов и механизмов опережающей сценарно-прогностической оценки

(экспертизы) эффективности разрабатываемых правовых актов. Предложенный для решения рассматриваемых задач подход базируется на формировании и исследовании имитационных моделей, позволяющих проводить анализ широкого класса процессов и явлений в политико-правовой, общественно-политической, социально-экономической и инновационно-технологической сферах, а также во внешней среде. Для оценки эффективности правового регулирования предлагается использовать критерии, отражающие степень достижения поставленных в процессе законотворчества целей, в том числе на основе их сопоставления с полученными реальными результатами.

Проблемам обеспечения технологического суверенитета и роста экономики в условиях широкомасштабного внешнего санкционного давления и ухода из России иностранного бизнеса посвящен доклад *Н.И. Комкова, Н.Н. Лантер* «Анализ и оценка уровня критичности отраслевых и корпоративных сбоев в условиях санкционной экономики РФ». В настоящее время, констатируют авторы, после ухода из РФ компаний из 70 стран мира, представлявших компетенции в 55 различных отраслях, возник определенный дисбаланс в производственном секторе национальной экономики, что привело к трансформации отраслевых рынков. Фактически из экономики РФ выпал значительный пласт технологических компетенций и логистических наработок, в результате чего изменилось качество производимых товаров и услуг, а также нанесен ущерб национальному интеллектуальному капиталу из-за усиления оттока специалистов за рубеж. Тем не менее, как отмечается в докладе, потенциал импортозамещения как инструмента «расширки узких мест» остается значительным, многие выпавшие технологические звенья в короткие сроки удастся успешно замещать российскими или доступными иностранными аналогами, в том числе в результате активного поиска новых торговых и технологических партнеров.

В сложившейся ситуации, утверждают авторы, достижение технологического суверенитета России на долговременную перспективу должно стать основной целью всех уровней системы управления государственным развитием, для чего необходима мобилизация ресурсов в рамках программно-целевого подхода для обеспечения роста экономики в условиях текущих и будущих вызовов. Для решения данной задачи авторами разработан мето-

дологический инструмент усиления потенциала конкурентоспособности РФ на основе информационно-логической модели импортозамещения в рамках полного жизненного цикла технологической цепи инновационного воспроизводства.

В целом решению широкого круга как оперативных, так и нацеленных на долгосрочную перспективу задач обеспечения безопасного и устойчивого развития страны в крайне непростой геополитической и экономической ситуации посвящено достаточно большое количество представленных на конференции разнообразных по тематике работ, среди которых можно отметить доклады *Г.Г. Малинецкого, Т.С. Ахромеевой, С.А. Торпыгиной, В.В. Кульбы* «Наука и образование как объекты управления сложными системами»; *Р.Ю. Дашкова, Н.И. Комкова, А.А. Лазарева* «Формирование целевых проектов развития»; *В.В. Леценко* «О цивилизационной безопасности России»; *М.Е. Степанцова* «Моделирование сценария информационного противоборства с асимметричным влиянием на малые группы»; *Н.В. Команича, И.В. Чернова* «Сценарное моделирование инновационного развития Арктической зоны РФ в условиях влияния внешних угроз»; *М.В. Кротовой* «Качественные подходы к моделированию стратегий импортозамещения на отраслевом и межотраслевом уровнях»; *З.К. Авдеевой, С.В. Ковриги* «Обнаружение изменений в социально-экономических ситуациях на основе разнородной информации»; *А.Н. Фомичева* «Концепция энергетической псевдобезопасности как генезис мирового экономического кризиса»; *А.А. Рыженко* «Организация системы подготовки сотрудников организаций в сфере противоборства механизмам социальной инженерии»; *В.В. Кафидова* «Стратегия и тактика управления для безопасности народного хозяйства»; *Д.А. Кононова, А.А. Тимошенко, Л.В. Богатыревой* «Проблема неопределенности при исследовании правоохранительной системы»; *О.Б. Байрамова* «О тенденциях развития микрофинансирования в России».

Проблемам обеспечения безопасности полетов, обострившимся в условиях объявленных странами Запада санкций против гражданской авиации России, посвящен доклад *Д.М. Мельника* «Моделирование авиационных происшествий на основе анализа нечеткого множества данных и событий эксплуатантов воздушных судов». Предложенный в работе метод обеспечения безопасности полетов

базируется на риск-ориентированном подходе, что, по утверждению автора, в отличие от традиционных и основанных на усредненных оценках большого множества показателей методов позволяет определять приемлемый уровень риска сложной производственной системы эксплуатантов воздушного транспорта. Рассматриваемый подход основан на применении теории нечетких множеств, что в условиях сложной интегрированной производственной системы эксплуатантов воздушного транспорта позволяет получать достоверные оценки уровня безопасности полетов, а также моделировать и исследовать прогнозные сценарии возможных авиапроисшествий, аварий и катастроф с целью выработки превентивных мероприятий по их предотвращению. Разработка сценариев осуществляется на основе анализа двух базовых групп показателей, связанных с качеством производственных процессов и безопасностью полетов воздушных судов соответственно. Информационной базой для решения рассматриваемых задач являются результаты систематических комплексных мониторинговых мероприятий производственной системы, включающих в себя аудиторские процедуры, инспекторские и квалификационные проверки, оценку производственных показателей и индикаторов безопасности, анализ полетной информации, расследование авиационных событий и т. д.

Традиционный интерес участники Конференции проявляют к проблемам обеспечения техногенной безопасности и управления ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций, о чем свидетельствует достаточно большое количество разнообразных по тематике докладов: *В.Г. Промыслов, К.В. Семенов* «Проблема обеспечения кибербезопасности критических объектов в недоверенной среде»; *В.А. Еременко, Н.И. Манаенкова* «К вопросу безопасности радиозондирования ионосферы мощными волновыми пучками»; *М.Ю. Прус, М.С. Жубанов, И.А. Лобанов, Ю.В. Прус* «Об объективизации экспертных оценок вероятностей редких событий»; *В.К. Мусаев* «Математическое моделирование ударного воздействия (переходной процесс) на десятиэтажное здание с подвалом»; *Д.И. Кацко, А.И. Кацко* «К вопросу о повышении безопасности проектирования природно-технических систем»; *В.О. Чинакал* «Об одном подходе к повышению производственно-технологической безопасности управления слож-



ными промышленными объектами»; *О.М. Лепешкин, М.А. Остроумов, О.А. Остроумов, В.В. Кулаков* «Подход к обеспечению выполнения функций и задач в сложной технической системе»; *К.В. Чернов* «Об управлении техносферной безопасностью»; *С.Ю. Карнов* «Прогнозирование оптимальной территории обслуживания с использованием геоинформационного моделирования»; *О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко* «Высокочастотная вибрация – диагностика и усталость»; *Р.Ш. Хабибуллин, Ш.К. Кадиев* «Поддержка управления реагированием на ЧС с учетом мнения специалистов центров управления в кризисных ситуациях»; *В.Г. Сидоренко* «Математические модели и методы управления безопасностью транспортных систем»; *Е.В. Кловач, В.А. Ткаченко* «Анализ как инструмент улучшения системы управления промышленной безопасностью и охраной труда»; *Д.В. Шихалев* «Мониторинг противопожарного состояния объекта в режиме реального времени»; *А.В. Панасенко, М.А. Васильев* «Анализ физико-химических свойств аэрозолей, предназначенных для тестирования пожарных извещателей».

Большая группа интересных докладов посвящена решению широкого круга проблем управления информационной и кибербезопасностью: *В.И. Меденников* «Цифровая платформа информационных научно-образовательных ресурсов как инструмент достижения заданного уровня информационной безопасности и надежности данных»; *А.О. Исхакова* «Детектирование разнородных проявлений кибератак на примерах анализа веб-ресурсов»; *Р.Э. Асратян* «Подход к созданию защищенных сетевых туннелей в распределенных системах на основе Cryptographic Message Syntax (CMS)»; *Е.А. Курако* «К вопросу безопасности отечественного программного обеспечения»; *В.А. Зорин, Ю.А. Ненашева* «Анализ уязвимостей RFID-меток СКУД на объектах КИИ»; *Л.Н. Логинова, А.Д. Королев* «Принципы обеспечения информационной безопасности в социальных сетях»; *А.Ю. Исхаков* «Анализ запросов в протоколах прикладного уровня при реализации усиленной проверки подлинности субъектов доступа»; *А.Д. Синюк, А.А. Тарасов* «Принципы открытого сетевого многоключевого согласования»; *Е.Ф. Жарко* «Управление требованиями, верификация и валидация программного обеспечения АСУ ТП АЭС»; *Ю.В. Тимиршяхова, Н.А. Шагин* «Преимущества и недостатки классических мето-

дов нахождения лиц»; *А.Д. Козлов, Н.Л. Нога* «Метод усредненных коэффициентов влияния для формирования нечеткой базы знаний при оценке рисков информационной безопасности»; *Е.А. Абдулова* «Оценка критической информационной инфраструктуры: киберцели и оценка критичности»; *Н.Д. Ходнев, А.Е. Краснов* «Хранение документов, аспекты информационной безопасности»; *С.К. Сомов* «Влияние использования архивов магнитных носителей на некоторые показатели надежности распределенных систем обработки данных»; *Л.Е. Мистров* «Метод обоснования задач информационной безопасности организационно-технических систем»; *Д.А. Еронин, А.А. Мелихов* «Разработка автоматизированного средства, предназначенного для выявления потенциально опасных конфигураций ИС малого предприятия»; *А.А. Саломатин* «Анализ характеристик аппаратного обеспечения для задач информационной безопасности».

Подробно ознакомиться с представленными работами можно в опубликованных в электронном виде материалах¹ либо на официальном сайте конференции: <https://iccss2022.ipu.ru/>.

В заключительном слове председательствующий на конференции д-р техн. наук, профессор *В.В. Кульба* сообщил о планах проведения в 2023 г. XXXI конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». По сложившейся многолетней традиции мероприятие состоится в декабре в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Телефон оргкомитета +7(495) 198-17-20, доб. 1407, e-mail: iccss@ipu.ru. Технический секретарь конференции – *Алла Фариссовна Ибрагимова*.

Ученый секретарь Оргкомитета конференции
А.Б. Шелков

Шелков Алексей Борисович – канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ abshelkov@gmail.com.

¹ Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXX Международной конференции, 14 декабря 2022 г., Москва / под общей редакцией А.О. Калашникова, В.В. Кульбы; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН Минобрнауки РФ [и др.]. – Электрон. текстовые дан. (8,3 Мб). – Москва: ИПУ РАН. – 2022.



30TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBLEMS OF COMPLEX SYSTEMS SECURITY CONTROL

A.B. Shelkov

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

✉ abshelkov@gmail.com

Abstract. The conference took place in December 2022. Scientific results presented by the conference participants are briefly outlined below. The conference sections were general theoretical and methodological issues of security support, problems of economic and sociopolitical security support, problems of information security support, cybersecurity and security aspects in social networks, ecological and technogenic security, modeling and decision-making for complex systems security control, and automatic systems and means of complex systems security support. The conference was attended by 99 authors from 33 organizations (Russia and some foreign countries), who presented 73 papers. Special attention was paid to the problems of managing the socio-economic development of Russia in modern realities.

Keywords: conference, complex systems, security control.