

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(125)/2023

4(125)/2023

PEER REVIEWED JOURNAL

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

Founder

A. Vostrikov

PublisherSaint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Board

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

M. Buzdalov,

PhD, Researcher, Saint Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD, Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Yu. Umnitsyna**Layout and composition:** Yu. Umnitsyna**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67A, Bol'shaya Morskaya, 190000, Saint Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: i-us.spb@gmail.com

Tel.: +7 - 812 494 70 02

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL*Velichko A. N., Karpov A. A. Methods and a software system
for integrative analysis of destructive paralinguistic phenomena
in colloquial speech*

2

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS*Sinuk A. D., Lepeshkin O. M., Filimonov V. A., Ostroumov O. A.
Optimization of the functioning profile of a complex technical system*

12

*Arseniev V. N., Yadrenkin A. A., Slatova E. V. Making a decision
on the most dangerous man-made object by a spacecraft
for monitoring near-Earth space*

26

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES*Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Saveliev A. I. Development
of hardware and operation algorithms for the wearable sensor device
designed for hand motor activity and gesture recognition*

35

SYSTEM ANALYSIS*Efremov A. A., Kozlov V. N. Method of synthesis of locally
permissible limited controls for the stabilization of program
motions of dynamic objects*

47

CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS*Obukhov A. D., Korobova I. L., Nazarova A. O., Zajceva D. V.
Application of machine learning in EEG analysis to detect phobic
reactions in virtual reality*

56

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

71

4(125)/2023

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

Учредитель

А. А. Востриков

ИздательСанкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения**Главный редактор**

Е. А. Крук,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Ответственный секретарь

О. В. Муравцова

Редакционная коллегия:

С. Д. Андреев,

д-р техн. наук, Тампере, Финляндия

В. Г. Анисимов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,

д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

М. В. Буэдалов,

канд. техн. наук, научный сотрудник, Санкт-Петербург, РФ

Л. С. Джайн,

д-р наук, проф., Канберра, Австралия

А. Н. Дудин,

д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

И. И. Думер,

д-р наук, проф., Риверсайд, США

А. И. Зейфман,

д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

К. Кристодело,

д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Г. Г. Матвиенко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ

А. А. Мюллари,

д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия

К. Е. Самуйлов,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Д. Себерри,

д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия

М. Б. Сергеев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Т. Сутикнуо,

д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия

М. Н. Фаворская,

д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ

Л. Фортуна,

д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. Е. Храмов,

д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ

А. А. Шалыто,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. П. Шелета,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,

акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

З. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Р. М. Юсупов,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова**Корректор:** Т. В. Звертановская**Дизайн:** М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына**Компьютерная верстка:** Ю. В. Умницына**Адрес редакции:** 190000, г. Санкт-Петербург,

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,

сайт: http://i-us.ru

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ*Величко А. Н., Карпов А. А. Методика и программная система интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи*

2

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ*Синюк А. Д., Лепешкин О. М., Филимонов В. А., Остроумов О. А. Оптимизация профиля функционирования сложной технической системы*

12

Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А., Слатова Е. В. Принятие решения о наиболее опасном техногенном объекте космическим аппаратом мониторинга околоземного космического пространства

26

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА*Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Савельев А. И. Разработка аппаратного обеспечения и алгоритмов функционирования носимого сенсорного устройства для распознавания двигательной активности руки и жестов*

35

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ*Ефремов А. А., Козлов В. Н. Метод синтеза локально допустимых ограниченных управлений для стабилизации программных движений динамических объектов*

47

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ*Обухов А. Д., Коробова И. Л., Назарова А. О., Зайцева Д. В. Применение машинного обучения при анализе ЭЭГ для выявления фобической реакции в виртуальной реальности*

56

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

71

Журнал входит в БД Scopus и в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сдано в набор 05.07.23. Подписано в печать 08.09.23. Дата выхода в свет: 15.09.2023.

Формат 60×841/8. Гарнитура CentSchbkCyrill BT. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 8,7. Уч.-изд. л. 11,9. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 365.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Распространяется бесплатно.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г. Перерегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82226 от 23 ноября 2021 г. © А. А. Востриков, 2023



Методика и программная система интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи

А. Н. Величко^а, научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-8503-8512

А. А. Карпов^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-3424-652X, karpov@iias.spb.su

^аСанкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Введение: в последнее время растет число работ, в которых разрабатываются системы паралингвистического анализа различных деструктивных явлений в речи. Однако лишь немногие работы рассматривают несколько явлений в совокупности, не смотря на то, что существуют теоретические и практические работы, в которых описываются взаимосвязи между различными паралингвистическими явлениями. **Цель:** разработать методику и программную систему интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений (лжи, агрессии, депрессии) в разговорной речи. **Результаты:** предложена методика интегрального оценивания степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи диктора. Данная методика учитывает результаты классификации каждого из трех методов определения рассматриваемых явлений (лжи, агрессии и депрессии) и на их основе вычисляет интегральную оценку с использованием ряда правил. Представленная архитектура программной системы включает в себя комплекс методов для определения рассматриваемых явлений, а также предложенную методику. На основе полученных в экспериментальных исследованиях результатов классификации деструктивных паралингвистических явлений для оценки программной системы можно вычислить интегральную среднюю F1-меру и интегральную невзвешенную среднюю полноту, которые составляют 76,8 и 75,0 % соответственно. **Практическая значимость:** использование представленной архитектуры программной системы позволяет получить интегральную оценку степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений в речи диктора. Такая программная система может применяться для первичной оценки состояния пациентов при консультации с медицинскими специалистами в качестве одного из методов оценки психологического состояния пациентов наряду с классическими подходами (опросниками, тестами и т. д.).

Ключевые слова – анализ речи, речевые технологии, компьютерная паралингвистика, деструктивные явления, автоматическое определение лжи в речи, автоматическое определение агрессии в речи, автоматическое определение депрессии в речи.

Для цитирования: Величко А. Н., Карпов А. А. Методика и программная система интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 2–11. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-2-11, EDN: FHUUWJ

For citation: Velichko A. N., Karpov A. A. Methods and a software system for integrative analysis of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-2-11, EDN: FHUUWJ

Введение

Паралингвистика изучает различные невербальные аспекты речи и коммуникации человека, а компьютерная паралингвистика, в свою очередь, использует автоматизированные средства для усовершенствования систем анализа паралингвистических явлений в речи человека. В настоящее время существует множество подходов к решению задачи определения деструктивных паралингвистических явлений в речи человека по отдельным явлениям лжи, агрессии и депрессии. Эти подходы представлены как на соревнованиях по компьютерной паралингвистике (например, INTERSPEECH Computational Paralinguistics Challenge, Audio/Visual Emotion Challenge and Workshop и др.), так и вне рамок этих соревнований (например, [1–3]). Однако большинство известных подходов имеют ряд ограничений: недостаток обучающих данных ввиду сложности

при записи речевых корпусов, содержащих рассматриваемые паралингвистические явления; дисбаланс данных для обучения и оценивания, который является естественным из-за того, что рассматриваемые паралингвистические явления не проявляются так же часто, как нейтральное состояние, и т. д. Кроме того, существующие на данный момент программные решения по определению рассматриваемых деструктивных явлений в разговорной речи имеют следующие недостатки: 1) низкую эффективность распознавания явлений; 2) использование сложных нейросетевых архитектур, требовательных к вычислительным ресурсам; 3) большое время обучения моделей (обучение некоторых моделей может длиться нескольких суток и даже недель); 4) отсутствие программных решений, анализирующих рассматриваемые деструктивные явления в совокупности.

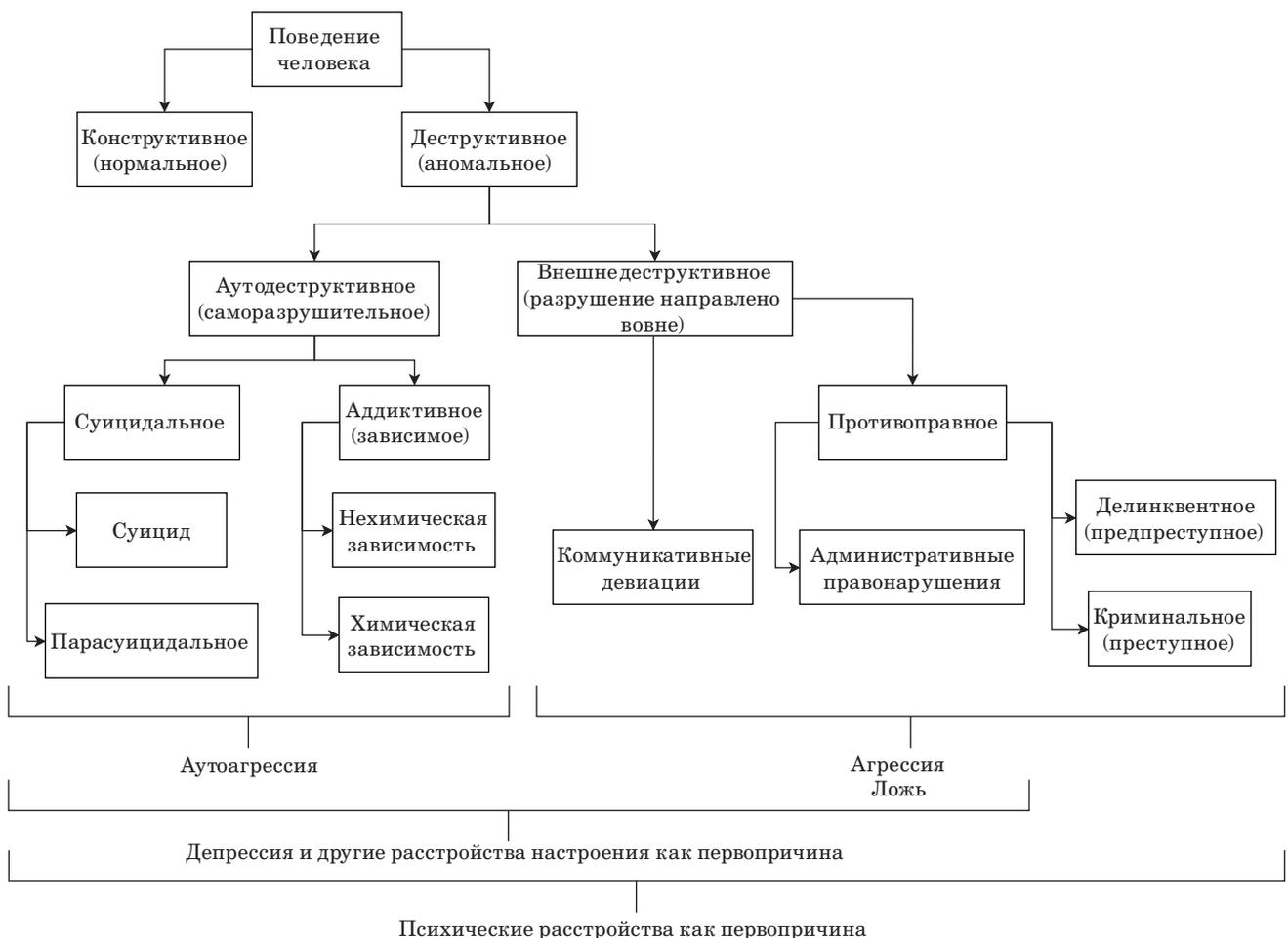
Таким образом, актуальна разработка программной системы, которая могла бы при низ-

ких требованиях к вычислительным ресурсам и малом количестве обучающих данных эффективно определять рассматриваемые деструктивные паралингвистические явления, в том числе с учетом взаимозависимостей между ними. Такая программная система может быть полезна при внедрении в медицинской сфере, например при скрининге расстройств тревожно-депрессивного характера в первичных звеньях здравоохранения, на которые падает основная нагрузка при том, что именно в них наблюдается нехватка ресурсов.

Современное состояние исследований

Поведение человека может быть как конструктивным, так и деструктивным. На основе матрицы социальных девиаций [4] можно обозначить место рассматриваемых в работе деструктивных явлений: лжи, агрессии и депрессии (рис. 1). Стоит отметить, что области «Психические расстрой-

ства как первопричина» и «Депрессия как первопричина» могут как являться первопричиной деструктивных явлений, так и не являться ею. То есть деструктивные явления не обязательно могут проявляться под действием какого-либо психического заболевания или расстройства настроения (в том числе депрессии). На рисунке видно, что некоторые конечные узлы дерева относятся к нескольким деструктивным явлениям, что указывает на комплексность природы этих явлений и может означать корреляцию между ними (которая подтверждается рядом теоретических и практических работ, рассматриваемых далее). К примеру, в работах [5, 6] авторы указывают на тесную связь между гневом и депрессией, а в работе [7] эта связь изучалась с помощью межиндивидуального и внутрииндивидуального анализа. В работе [8] выявлена сильная корреляция между гневом, тревогой, депрессией и негативными эмоциями, а в работе [9] отмечена связь между посттравматическим стрессовым расстройством, депрессией,



■ **Рис. 1.** Иерархическая систематизация деструктивных явлений на основе матрицы социальных девиаций (по матрице [4])
 ■ **Fig. 1.** Hierarchical systematization of destructive phenomena based on the social deviations matrix (based on the matrix [4])

враждебностью и гневом. Связь между агрессией и ложью исследовалась в работах [10, 11], где было определено, что случайный гнев способствует неэтичному поведению и приводит к более явному проявлению имплицитных установок.

Под ложью подразумевается преднамеренный акт введения собеседника в заблуждение путем передачи неверной или вводящей в заблуждение информации [12]. Основная часть работ по автоматическому определению ложной/истинной информации в речи представлена на соревнованиях по компьютерной паралингвистике INTERSPEECH ComParE в 2016 г. Для оценки качества работы систем используется показатель невзвешенной средней полноты UAR (Unweighted Average Recall). Среди работ, представленных на этих соревнованиях, стоит упомянуть [1, 13, 14], а также работы вне соревнований [15, 16]. Для решения поставленной задачи в большинстве работ используются экспертные акустические признаки и детерминированные методы машинного обучения.

Согласно данным ВОЗ [17], депрессия является распространенным психическим расстройством и одной из основных болезней, которые приводят к ухудшению жизнедеятельности человека. Задача определения депрессии была неоднократно предложена на соревнованиях AVEC (Audio-Visual Emotion Challenge). Для оценки качества работы систем используются показатели CCC (Concordance Correlation Coefficient), RMSE (Root Mean Squared Error), F1-мера и др. Среди лучших работ за последние годы можно отметить [18–20], представленные на соревнованиях AVEC в 2019 г., и [2, 21–24], представленные вне соревнований. В них авторы используют как экспертные, так и нейросетевые акустические признаки, а для классификации и регрессии в большинстве работ используются нейросетевые методы машинного обучения либо со сверткой, либо с механизмами внимания.

Под термином агрессия в европейской культуре подразумевается деструктивное поведение, которое является мотивированным и противоречит нормам сосуществования людей. Такое поведение может быть направлено как вовне (нанесение вреда или психологического дискомфорта окружающим людям, животным, предметам), так и на себя (самоповреждение, самобичевание). Среди работ по определению агрессии за последние годы можно выделить некоторые, представленные на соревнованиях INTERSPEECH ComParE в 2021 г. Для оценки качества работы систем используется показатель UAR. Авторы лучших работ [3, 25–27] использовали как экспертные, так и нейросетевые акустические признаки, а для классификации применяли как детерминированные, так и нейросетевые методы машинного обучения.

Таким образом, можно заключить, что задача автоматического определения деструктивных

паралингвистических явлений представляется комплексной, и не существует универсального подхода к определению всех паралингвистических явлений, рассматриваемых в работе. Далее перейдем к формальной постановке задачи.

Описание разработанного подхода. Формальная постановка задачи классификации объектов (аудиозаписей)

Пусть имеется множество аудиозаписей $S = (s_1, \dots, s_m)$ и множество меток классов $Y = (y_1, \dots, y_m)$ этих аудиозаписей. Существует неизвестная целевая зависимость — отображение $A: X \rightarrow Y$, при этом ее метки классов известны только для векторов объектов-признаков аудиозаписей конечной обучающей выборки $X = \{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_m, y_m)\}$, а X получен с использованием метода вычисления акустических признаков из аудиозаписей $F: S \rightarrow X$. Тогда требуется найти метод $A: X \rightarrow \hat{Y}$, который сможет классифицировать вектор объекта-признака \mathbf{x} множества X . Здесь множество меток классов $Y = (y_1, \dots, y_m)$ описывает истинные значения классов объектов обучения, а множество меток классов $\hat{Y} = (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_m)$ описывает значения результатов классификации.

В нашем случае необходимо найти множество $A = \{A_{dec}, A_{agg}, A_{depr}\}$, состоящее из методов определения ложной/истинной информации, агрессии и депрессии в речи (A_{dec} — deception, A_{agg} — aggression, A_{depr} — depression):

$$\begin{aligned} A_{agg} : X_{agg} &\rightarrow \hat{Y}_{agg}, \quad A_{dec} : X_{dec} \rightarrow \hat{Y}_{dec}, \\ A_{depr} : X_{depr} &\rightarrow \hat{Y}_{depr}, \end{aligned} \quad (1)$$

где входные данные представлены вектором объектов-признаков множества $X = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_l)$ длины l , а целевые значения меток классов \hat{y} множества \hat{Y} представлены либо бинарными значениями $\{0, 1\}$, где для множества \hat{Y}_{dec} 0 обозначает истинное высказывание, а 1 — ложное, для множества \hat{Y}_{depr} 0 обозначает отсутствие депрессии, а 1 — ее наличие; либо конечным множеством $\{0, 1, 2\}$, где для множества \hat{Y}_{agg} 0 обозначает низкий уровень агрессии или ее отсутствие, 1 — средний уровень агрессии, а 2 — высокий уровень агрессии.

Методика интегрального оценивания степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи

Для интегрального оценивания наличия и степени выраженности деструктивных пара-

лингвистических явлений в разговорной речи предложена методика (рис. 2), основанная на вычислении формулы

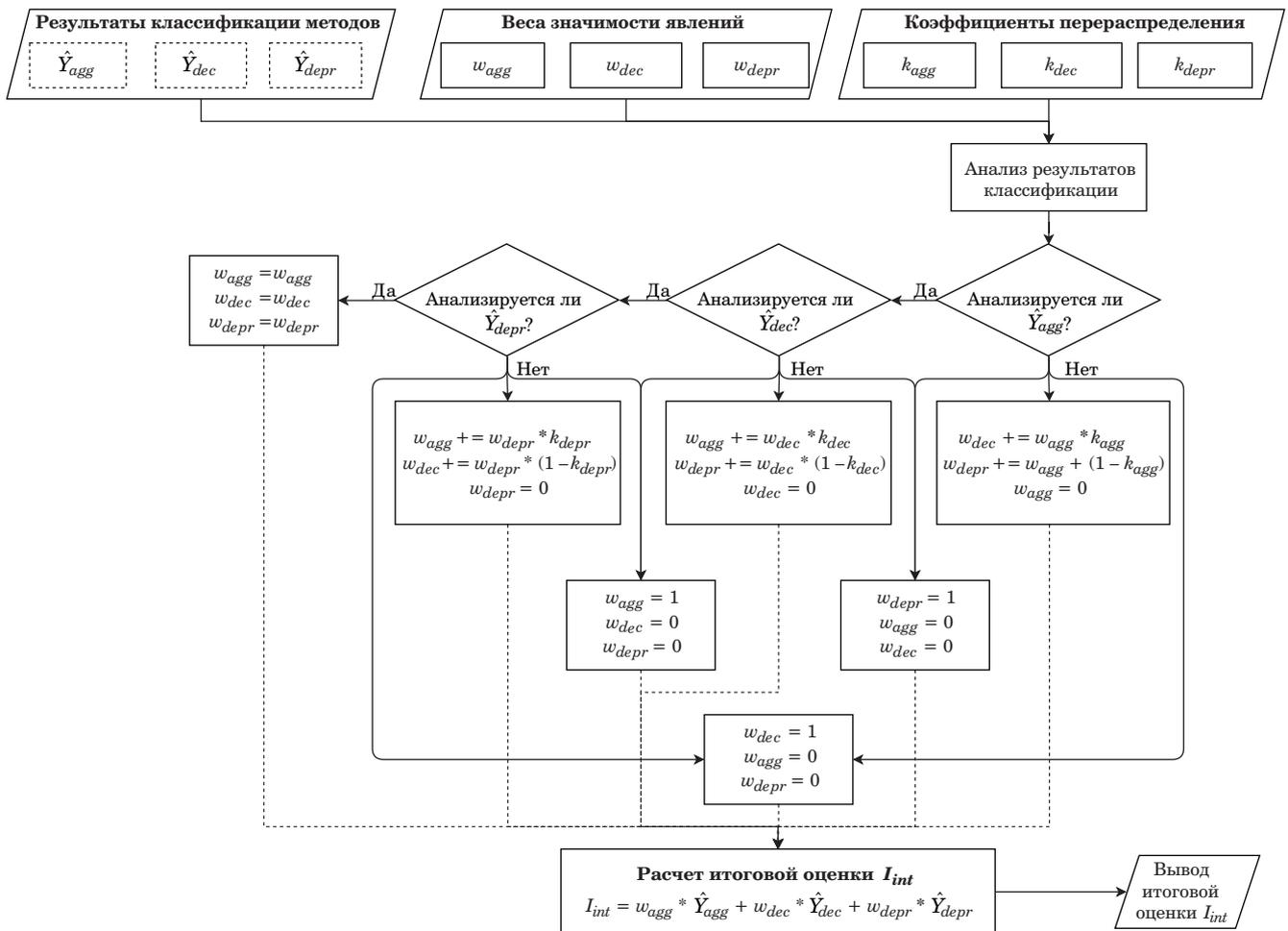
$$I_{int} = I_{agg} + I_{dec} + I_{depr} = w_{agg} \cdot \hat{y}_{agg} + w_{dec} \cdot \hat{y}_{dec} + w_{depr} \cdot \hat{y}_{depr}, \quad (2)$$

где I_{int} – интегральная оценка, $I_{int} = (I_1, \dots, I_3)$, w_i – весовые коэффициенты (веса) значимости деструктивных явлений множества весовых коэффициентов значимости $W = (w_1, \dots, w_3)$; \hat{y}_i – результаты классификации методов определения деструктивных паралингвистических явлений множества $\hat{Y} = (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_3)$.

В нашем случае имеется три частных результата классификации \hat{y} , на основе которых вычисляется интегральная оценка: ложность/истинность высказывания (\hat{y}_{dec}), наличие агрессии в высказывании (\hat{y}_{agg}) и наличие состояния депрессии у диктора (\hat{y}_{depr}).

Входными данными настоящей методики являются результаты классификации \hat{Y} , веса значимости явлений W , интегральная оценка степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений I_{int} в речи диктора.

Результаты классификации методов определения ложности/истинности и депрессии могут принимать бинарные значения $\{0, 1\}$, а результаты классификации метода определения агрессии могут принимать значения из множества $\{0, 1, 2\}$. Для удобства вычислений их необходимо привести к бинарному виду. Результат со значением 0 означает отсутствие агрессии в речевом высказывании, а значения 1 и 2, означающие средний и высокий уровни агрессии соответственно, преобразуются в значение 1 – наличие агрессии в речи. Кроме того, результатами могут быть не только результаты классификации, усредненные по всему речевому сообщению, но и результаты классификации сегментов записи, а также вероятности принадлежности записи или



■ **Рис. 2.** Методика интегрального оценивания степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений в речи диктора
 ■ **Fig. 2.** An approach for integral evaluation of destructive paralinguistic phenomena severity in speech

сегментов к классам. Значения весов значимости удовлетворяют условию $w_{dec} + w_{agg} + w_{depr} = 1$. Входные данные обрабатываются с использованием ряда формальных правил, которые основаны на экспертных оценках и теоретическом базисе корреляции между рассматриваемыми паралингвистическими явлениями. Затем обработанные данные подаются на вход блока расчета интегральной оценки I_{int} для ее вычисления (2).

Предложенная методика позволяет анализировать как все три результата классификации методов определения деструктивных паралингвистических явлений, так и отсутствие результатов классификации одного или двух методов с использованием коэффициента перераспределения весов. В случае, когда не анализируются какие-либо результаты классификации, коэффициент перераспределения весов k равен $1/2$ для депрессии и $1/3$ для ложности и агрессии.

Выходными данными предложенной методики является интегральная оценка I_{int} , десятичные значения которой могут варьироваться в диапазоне $[0, 1]$. При этом значения интегральной оценки можно разделить по уровням выраженности деструктивных паралингвистических явлений: значения до $0,30$ означают низкий уровень, от $0,31$ до $0,6$ — средний уровень, выше $0,61$ — высокий уровень.

Архитектура программной системы интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи

Анализ работ на предмет наличия корреляций между рассматриваемыми явлениями показал, что существуют связи между всеми рассматриваемыми явлениями, а значит, эти связи должны учитываться при разработке программной системы.

Разработанная программная система интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи (рис. 3) построена по модульному принципу. Ее архитектура включает в себя несколько независимых программных модулей (блоков): 1) предобработки исходных данных; 2) вычисления наборов акустических признаков из аудиоданных; 3) обработки полученного вектора акустических признаков с использованием нормализации (и аугментации) данных, а также уменьшения размерности признакового пространства; 4) получения итогового результата классификации от каждого модуля; 5) вычисления интегральной оценки анализа деструктивных явлений в речи диктора. Стоит отметить, что обучение происходит в иерархическом порядке: сначала парал-

лельно работают модуль определения ложной/истинной информации и модуль определения агрессии, а затем их результаты классификации в бинарном виде $\{0, 1\}$ добавляются в качестве дополнительных признаков в признаковое пространство, которое подается на вход модуля определения депрессии. При этом гипотезы о ложности и агрессии приобретают более высокий вес по сравнению с остальными признаками. После чего все три результата работы модулей выступают в качестве входных данных в методике интегральной оценки степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений в речи диктора.

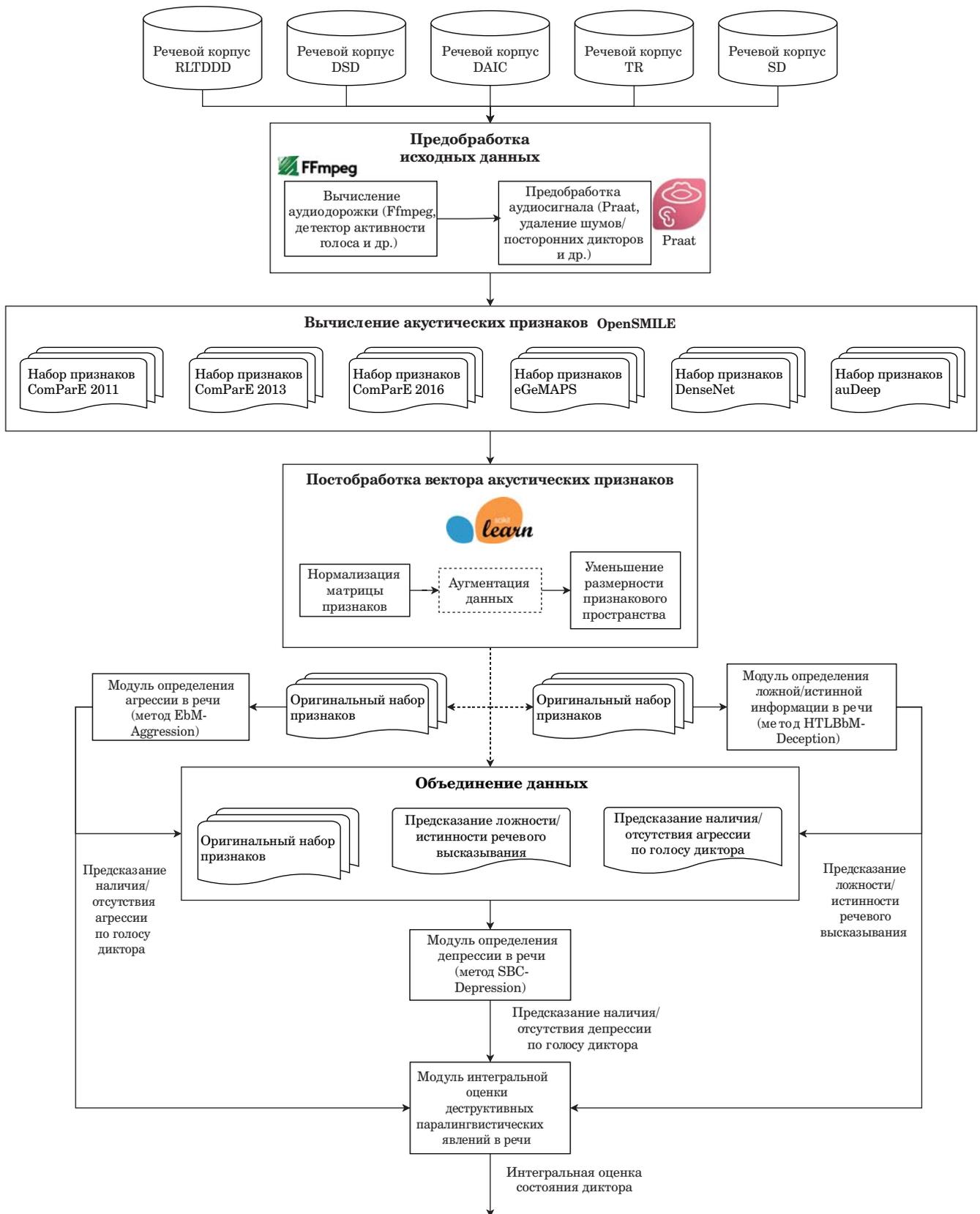
С использованием предложенной программной системы можно получить как результат классификации деструктивных паралингвистических явлений с применением отдельных методов, так и результат определения депрессии в речи с учетом корреляции акустических признаков в речевом сегменте с другими деструктивными явлениями (лжи/истинности и агрессии).

Для разработки программной системы выбран объектно ориентированный язык программирования высокого уровня Python версии 3.8 [28]. Кроме того, были использованы программные библиотеки как для обработки данных и вычисления признаков (Scikit-learn, OpenSMILE), так и для реализаций методов машинного обучения (Keras, Catboost, XGBoost, LightGBM, TabNet).

Эксперименты

Результаты приведенных в таблице экспериментальных исследований подробнее описаны в работах [29–31]. В качестве данных для обучения и оценивания методов определения деструктивных паралингвистических явлений в речи были использованы следующие речевые и модальные корпуса: 1) корпус DSD (1059 аудиозаписей) [32] и корпус RLTD (121 запись) [33] для метода определения ложной/истинной информации; 2) корпус DAIC (219 записей) [34] для метода определения депрессии; 3) корпуса SD и TR (893 записи) [35] для метода определения агрессии. Все экспериментальные исследования были проведены с пятикратной перекрестной валидацией. Для количественного оценивания эффективности работы предложенных методов выбраны показатели F1-мера и UAR.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что некоторые методы определения деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи, входящие в состав предложенной архитектуры программной системы, в ряде случаев превосходят



■ **Рис. 3.** Архитектура программной системы интегрального анализа деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи

■ **Fig. 3.** An architecture of the software system for integral analysis of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech

■ Результаты экспериментальных исследований методов определения деструктивных паралингвистических явлений в речи

■ Results of the experimental studies on the methods for destructive paralinguistic detection in speech

Метод определения явления	Результаты классификации, %
Ложной/истинной информации в разговорной речи	$F1 = 88,4 \pm 1,5$ $UAR = 88,5 \pm 1,3$
Депрессии в разговорной речи	$F1 = 64,0 \pm 0,7$ $UAR = 60,0 \pm 0,5$
Агрессии в разговорной речи	$F1 = 78,0 \pm 1,5$ $UAR = 76,5 \pm 1,3$

известные аналоги по эффективности. На основе полученных результатов классификации можно вычислить интегральную среднюю F1-меру ($F1_{int}$) и интегральную невзвешенную среднюю полноту (UAR_{int}) для оценки предложенной программной системы:

$$F1_{int} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 F1_i = 76,8\%; \quad (3)$$

$$UAR_{int} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 UAR_i = 75,0\%, \quad (4)$$

где $F1_i$, UAR_i — показатели i -го метода из трех методов.

Заключение

Предложенные в работе методика и архитектура программной системы интегрального оценивания степени выраженности деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи рассматривают в совокупности несколько деструктивных паралингвистических явлений (ложь, агрессию и депрессию), а также учитывают корреляцию между ними. Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о практической значимости предложенных методики и архитектуры программной системы и позволяют сделать вывод, что в задаче определения деструктивных паралингвистических явлений необходимо учитывать тесные взаимосвязи между ними. Это поможет улучшить результаты определения рассматриваемых явлений как по отдельности, так и в совокупности.

При проведении экспериментальных исследований был преодолен ряд ограничений технического характера, а именно: 1) относительно небольшое количество обучающих данных ввиду

того, что сбор специфичных данных является трудоемким и сложным процессом; 2) дисбаланс в классах, поскольку в реальной жизни рассматриваемые явления встречаются реже, чем нормальное состояние человека. Для преодоления этих ограничений были использованы аугментация данных, выбор информативных признаков, а также показатели точности работы системы, учитывающие дисбаланс в данных.

В дальнейшем планируется разработка пользовательского интерфейса программной системы, после чего будет возможна апробация в реальных условиях под контролем специалистов в области психологии. Вероятными ограничениями при практическом применении можно назвать условия записи речи (различные характеристики устройств записи, шумы при записи и т. д.), которые могут оказать влияние на качество работы моделей определения деструктивных явлений. Способами преодоления этих ограничений являются: 1) использование качественного оборудования и (или) методов цифровой обработки данных (удаление шумов из записи); 2) сбор нового речевого корпуса, содержащего все рассматриваемые деструктивные явления (и последующее дообучение существующих моделей с использованием собранных данных). Также одним из направлений продолжения исследований является совершенствование моделей и повышение качества определения деструктивных явлений. Помимо ограничений технического характера при практическом внедрении, стоит также упомянуть ограничения теоретического характера, которые включают в себя возможные упущения авторов при разработке предложенной методики ввиду отсутствия профессиональных знаний из областей психологии и психиатрии, что решается тесной работой со специалистами в этих областях.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 22-11-00321).

Литература

1. Montacié C., Caraty M.-J. Prosodic cues and answer type detection for the deception sub-challenge *Proc. of INTERSPEECH-2016*, 2016, pp. 2016–2020. doi:10.21293/1818-0442-2016-19-2-56-60
2. Huang Zh., Epps J., Joachim D., Joachim D., Stasak B., Williamson J. R., Quatieri T. F. Domain adaptation for enhancing speech based depression detection in natural environmental conditions using di-

- lated CNNs. *Proc. of INTERSPEECH-2020*, 2020, pp. 4561–4565. doi:10.21437/Interspeech.2020-3135
3. **Egas-López J. V., Vetráb M., Tóth L., Gosztolya G.** Identifying conflict escalation and primates by using ensemble X-vectors and Fisher vector features. *Proc. of INTERSPEECH-2021*, 2021, pp. 476–480. doi:10.21437/Interspeech.2021-1173
 4. **Майсак Н. В.** Матрица социальных девиаций: классификация типов и видов девиантного поведения. *Современные проблемы науки и образования*, 2010, № 4, с. 78–86. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4505> (дата обращения: 10.03.2023).
 5. **Balsamo M.** Anger and depression: Evidence of a possible mediating role for rumination. *Psychological Reports*, 2010, no. 106, pp. 3–12. doi:10.2466/PRO.106.1.3-12
 6. **Luutonen S.** Anger and depression – theoretical and clinical considerations. *Nordic Journal of Psychiatry*, 2007, no. 61, pp. 246–251. doi:10.1080/08039480701414890
 7. **Robbins P., Tanck R.** Anger and depressed affect: Interindividual and intraindividual perspectives. *The Journal of Psychology*, 1997, no. 131, pp. 489–500. doi:10.1080/00223989709603537
 8. **Ng T., Sorensen K., Zhang Y., Yim F. H. K.** Anger, anxiety, depression, and negative affect: Convergent or divergent? *Journal of Vocational Behavior*, 2018, no. 110, pp. 186–202. doi:10.1016/j.jvb.2018.11.014
 9. **Bhardwaj V., Angkaw A., Franceschetti M., Rao R., Baker D. G.** Direct and indirect relationships among posttraumatic stress disorder, depression, hostility, anger, and verbal and physical aggression in returning veterans. *Aggressive Behavior*, 2019, no. 45(4), pp. 417–426. doi:10.1002/ab.21827
 10. **Huntsinger J. R.** Anger enhances correspondence between implicit and explicit attitudes. *Emotion*, 2013, no. 13(2), pp. 350–357. doi:10.1037/a0029974
 11. **Yip J. A., Schweitzer M. E.** Mad and misleading: Incidental anger promotes deception. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2016, no. 137, pp. 207–217. doi:10.1016/j.obhdp.2016.09.006
 12. **Горшков Ю. Г., Дорофеев А. В.** Речевые детекторы лжи коммерческого применения. *Информационный мост (ИНФОРМОСТ). Радиоэлектроника и Телекоммуникация*, 2003, № 6, с. 13–15.
 13. **Kaya H., Karpov A.** Fusing acoustic feature representations for computational paralinguistics tasks. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, 2016, pp. 2046–2050. doi:10.21437/Interspeech.2016-995
 14. **Pan X., Zhao H., Zhou Y.** The application of fractional Mel cepstral coefficient in deceptive speech detection. *PeerJ*, 2015. doi:10.7717/peerj.1194
 15. **Levitan S. I., Levitan Y., An G., Levine M., Levitan R., Rosenberg A., Hirschberg J.** Identifying individual differences in gender, ethnicity, and personality from dialogue for deception detection. *Proc. NAACL Workshop on Computational Approaches to Deception Detection*, 2016, pp. 40–44. doi:10.18653/v1/W16-0806
 16. **Zhang J., Levitan S. I., Hirschberg J.** Multimodal deception detection using automatically extracted acoustic, visual, and lexical features. *Proc. of INTERSPEECH-2020*, 2020, pp. 359–363. doi:10.21437/Interspeech.2020-2320
 17. *Depression and Other Common Mental Disorders: Global Health Estimates*. Technical Report. World Health Organization, 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/254610> (дата обращения: 10.03.2023).
 18. **Kaya H., Fedotov D., Dresvyanskiy D., Doyran M., Mamontov D., Markitantov M., Salah A. A. A., Kavcar E., Karpov A., Salah A. A.** Predicting depression and emotions in the cross roads of cultures, paralinguistics, and non-linguistics. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 27–35. doi:10.1145/3347320.3357691
 19. **Makiuchi M. R., Warnita T., Uto K., Shinoda K.** Multimodal fusion of BERT-CNN and gated CNN representations for depression detection. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 55–63. doi:10.1145/3347320.3357694
 20. **Fan W., He Z., Xing X., Cai B., Lu W.** Multi-modality depression detection via multi-scale temporal dilated CNNs. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 73–80. doi:10.1145/3347320.3357695
 21. **Haque A., Guo M., Miner A. S., Fei-Fei L.** Measuring depression symptom severity from spoken language and 3D facial expressions. *Machine Learning for Health (ML4H) Workshop at NeurIPS 2018*, 2018. <http://arxiv.org/abs/1811.0859> (дата обращения: 10.03.2023).
 22. **Niu M., Tao J., Liu B., Fan C.** Automatic depression level detection via lp-norm pooling. *Proc. of INTERSPEECH-2019*, 2019, pp. 4559–4563. doi:10.21437/Interspeech.2019-1617
 23. **Rohanian M., Hough J., Purver M.** Detecting depression with word-level multimodal fusion. *Proc. of INTERSPEECH-2019*, 2019, pp. 1443–1447. doi:10.21437/Interspeech.2019-2283
 24. **Zhao Z., Li Q., Cummins N., Liu B., Wang H., Tao J., Schuller B. W.** Hybrid network feature extraction for depression assessment from speech. *Proc. of INTERSPEECH-2020*, 2020, pp. 4956–4960. doi:10.21437/Interspeech.2020-2396
 25. **Lefter I., Jonker C. M.** Aggression recognition using overlapping speech. *Seventh Intern. Confe. on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, 2017, pp. 299–304. doi:10.1109/ACII.2017.8273616
 26. **Sahoo S., Routray A.** Detecting aggression in voice using inverse filtered speech features. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2018, no. 9(2), pp. 217–226. doi:10.1109/TAFFC.2016.2615607
 27. **Zhou Z., Xu Y., Li M.** Detecting escalation level from speech with transfer learning and acoustic-lexical in-

- formation fusion. *arXiv Preprints*, 2021. doi:10.48550/arXiv.2104.06004
28. *About Python*. Python.org, 2022. <https://www.python.org/about/> (дата обращения: 10.03.2023).
29. Величко А. Н. Метод анализа речевого сигнала для автоматического определения агрессии в разговорной речи. *Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии*, 2022, № 4, с. 180–188. doi:10.17308/sait/1995-5499/2022/4/180-188
30. Velichko A., Markitantov M., Kaya H., Karpov A. Complex paralinguistic analysis of speech: Predicting gender, emotions and deception in a hierarchical framework. *Proc. of INTERSPEECH-2022*, 2022, pp. 4735–4739. doi:10.21437/Interspeech.2022-11294
31. Velichko A. N., Karpov A. A. Automatic detection of deceptive and truthful paralinguistic information in speech using two-level machine learning model. *Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proc. of the Intern. Conf. "Dialogue 2021"*, 2021, no. 20(27), pp. 698–704. doi:10.28995/2075-7182-2021-20-698-704
32. Schuller B., Steidl S., Batliner A., Hirschberg J., Burgoon J. K., Baird A., Elkins A., Zhang Y., Coutinho E., Evanini K. The INTERSPEECH 2016 computational paralinguistic challenge: Deception, sincerity & native language. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, 2016, pp. 2001–2005. doi:10.21437/Interspeech.2016-129
33. Pérez-Rosas V., Abouelenien M., Mihalcea R., Burzo M. Deception detection using real-life trial data. *Proc. of the 2015 ACM Intern. Conf. on Multimodal Interaction*, 2015, pp. 59–66. doi:10.1145/2818346.2820758
34. Gratch J., Artstein R., Lucas G., Stratou G., Scherer S., Nazarian A., Wood R., Boberg J., DeVault D., Marsella S., Traum D., Rizzo S., Morency L.-P. The distress analysis interview corpus of human and computer interviews. *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Language Resources and Evaluation (LREC'14)*, 2014, pp. 3123–3128.
35. Ringeval F., Schuller B., Valstar M., Cummins N., Cowie R., Tavabi L., Schmitt M., Alisamir S., Amiriparian S., Messner E. -M., Song S., Liu S., Zhao Z., Mallol-Ragolta A., Ren Z., Soleymani M., Pantic M. AVEC 2019 workshop and challenge: State-of-mind, detecting depression with AI, and cross-cultural affect recognition. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 3–12. doi:10.1145/3347320.3357688

UDC 004.934.2

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-2-11

EDN: FHUWJ

Methods and a software system for integrative analysis of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech

A. N. Velichko^a, Research Fellow, orcid.org/0000-0002-8503-8512

A. A. Karpov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3424-652X, karpov@iias.spb.su

^aSt. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14th Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: There has been a growth in the number of studies devoted to the systems for paralinguistic analysis of various destructive phenomena in speech. However, only a few of them consider several phenomena altogether, despite the fact that there are also some theoretical and practical studies that describe the relationships between different paralinguistic phenomena. **Purpose:** To develop an approach, methods and a software system for integrative analysis of destructive paralinguistic phenomena (deception, aggression, depression) in colloquial speech. **Results:** We present an approach for the integrated evaluation of destructive paralinguistic phenomena in speech. This approach takes into account classification results from each of the three methods for detecting the abovementioned paralinguistic phenomena (deception, aggression and depression) and uses them to calculate the integrated score according to the set of rules. The proposed architecture of a software system includes a complex of methods for the detection of paralinguistic phenomena and the proposed approach. On the basis of the experimental classification results of the detection of destructive paralinguistic phenomena, we can calculate the integral average F1-measure and integral unweighted average recall which result in 76.8% and 75.0% accordingly. **Practical relevance:** The use of the proposed architecture of the software system makes it possible to make integrated evaluation of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech. Such a software system can be applied by medical professionals during an initial assessment of patients in consultation as one of the methods of psychological evaluation as well as other classical approaches (questionnaires, tests, etc.).

Keywords – speech analysis, speech technologies, computational paralinguistics, destructive phenomena, automatic deception detection in speech, automatic aggression detection in speech, automatic depression detection in speech.

For citation: Velichko A. N., Karpov A. A. Methods and a software system for integrative analysis of destructive paralinguistic phenomena in colloquial speech. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-2-11, EDN: FHUWJ

Financial support

This work was supported financially by the Russian Science Foundation (project No. 22-11-00321).

References

- Montacié C., Caraty M.-J. Prosodic cues and answer type detection for the deception sub-challenge. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, 2016, pp. 2016–2020. doi:10.21293/1818-0442-2016-19-2-56-60
- Huang Zh., Epps J., Joachim D., Joachim D., Stasak B., Williamson J. R., Quatieri T. F. Domain adaptation for enhancing speech based depression detection in natural environmental conditions using dilated CNNs. *Proc. of INTERSPEECH-2020*, 2020, pp. 4561–4565. doi:10.21437/Interspeech.2020-3135
- Egas-López J. V., Vetráb M., Tóth L., Gosztolya G. Identifying conflict escalation and primates by using ensemble X-vectors and Fisher vector features. *Proc. of INTERSPEECH-2021*, 2021, pp. 476–480. doi:10.21437/Interspeech.2021-1173
- Maysak N. V. The matrix of social deviations: classification of types and sorts of deviant behaviour. *Modern Problems of Science and Education*, 2010, no. 4, pp. 78–86. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4505> (accessed 10 March 2023) (In Russian).
- Balsamo M. Anger and depression: Evidence of a possible mediating role for rumination. *Psychological Reports*, 2010, no. 106, pp. 3–12. doi:10.2466/PRO.106.1.3-12mel
- Luutonen S. Anger and depression – Theoretical and clinical considerations. *Nordic Journal of Psychiatry*, 2007, no. 61, pp. 246–251. doi:10.1080/08039480701414890
- Robbins P., Tanck R. Anger and depressed affect: Interindividual and intraindividual perspectives. *The Journal of Psychology*, 1997, no. 131, pp. 489–500. doi:10.1080/00223989709603537
- Ng T., Sorensen K., Zhang Y., Yim F. H. K. Anger, anxiety, depression, and negative affect: Convergent or divergent? *Journal of Vocational Behavior*, 2018, no. 110, pp. 186–202. doi:10.1016/j.jvb.2018.11.014
- Bhardwaj V., Angkaw A., Franceschetti M., Rao R., Baker D. G. Direct and indirect relationships among posttraumatic stress disorder, depression, hostility, anger, and verbal and physical aggression in returning veterans. *Aggressive Behavior*, 2019, no. 45(4), pp. 417–426. doi:10.1002/ab.21827
- Huntsinger J. R. Anger enhances correspondence between implicit and explicit attitudes. *Emotion*, 2013, no. 13(2), pp. 350–357. doi:10.1037/a0029974
- Yip J. A., Schweitzer M. E. Mad and misleading: Incidental anger promotes deception. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2016, no. 137, pp. 207–217. doi:10.1016/j.obhdp.2016.09.006
- Gorshkov Yu. G., Dorofeev A. V. Rechevye detektory lzhi kommercheskogo primeneniya. *Informacionnyj most (INFORMOST). Radioelektronika i Telekommunikaciya*, 2003, no. 6, pp. 13–15 (In Russian).
- Kaya H., Karpov A. Fusing acoustic feature representations for computational paralinguistics tasks. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, 2016, pp. 2046–2050. doi:10.21437/Interspeech.2016-995
- Pan X., Zhao H., Zhou Y. The application of fractional Mel cepstral coefficient in deceptive speech detection. *PeerJ*, 2015. doi: 10.7717/peerj.1194
- Levitan S. I., Levitan Y., An G., Levine M., Levitan R., Rosenberg A., Hirschberg J. Identifying individual differences in gender, ethnicity, and personality from dialogue for deception detection. *Proc. NAACL Workshop on Computational Approaches to Deception Detection*, 2016, pp. 40–44. doi:10.18653/v1/W16-0806
- Zhang J., Levitan S. I., Hirschberg J. Multimodal deception detection using automatically extracted acoustic, visual, and lexical features. *Proc. of INTERSPEECH-2020*, 2020, pp. 359–363. doi:10.21437/Interspeech.2020-2320
- Depression and Other Common Mental Disorders: Global Health Estimates*. Technical Report. World Health Organization, 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/254610> (accessed 10 March 2023).
- Kaya H., Fedotov D., Dresvyanskiy D., Doyran M., Mamonov D., Markitantov M., Salah A. A., Kavcar E., Karpov A., Salah A. A. Predicting depression and emotions in the crossroads of cultures, paralinguistics, and non-linguistics. *Proc. of the 9th ACM International Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 27–35. doi:10.1145/3347320.3357691
- Makiuchi M. R., Warnita T., Uto K., Shinoda K. Multimodal Fusion of BERT-CNN and Gated CNN Representations for Depression Detection. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 55–63. doi:10.1145/3347320.3357694
- Fan W., He Z., Xing X., Cai B., Lu W. Multi-modality depression detection via multi-scale temporal dilated CNNs. *Proc. of the 9th ACM International Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 73–80. doi:10.1145/3347320.3357695
- Haque A., Guo M., Miner A. S., Fei-Fei L. Measuring depression symptom severity from spoken language and 3D facial expressions. *Machine Learning for Health (ML4H) Workshop at NeurIPS 2018*, 2018. Available at: <http://arxiv.org/abs/1811.0859> (accessed 10 March 2023).
- Niu M., Tao J., Liu B., Fan C. Automatic depression level detection via lp-norm pooling. *Proc. of INTERSPEECH-2019*, 2019, pp. 4559–4563. doi:10.21437/Interspeech.2019-1617
- Rohanian M., Hough J., Purver M. Detecting depression with word-level multimodal fusion. *Proc. of INTERSPEECH-2019*, 2019, pp. 1443–1447. doi:10.21437/Interspeech.2019-2283
- Zhao Z., Li Q., Cummins N., Liu B., Wang H., Tao J., Schuller B. W. Hybrid network feature extraction for depression assessment from speech. *Proc. of INTERSPEECH-2020*, 2020, pp. 4956–4960. doi:10.21437/Interspeech.2020-2396
- Lefter I., Jonker C. M. Aggression recognition using overlapping speech. *Seventh Interna. Conf. on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, 2017, pp. 299–304. doi:10.1109/ACII.2017.8273616
- Sahoo S., Routray A. Detecting aggression in voice using inverse filtered speech features. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2018, no. 9(2), pp. 217–226. doi:10.1109/TAFFC.2016.2615607
- Zhou Z., Xu Y., Li M. Detecting escalation level from speech with transfer learning and acoustic-lexical information fusion. *arXiv Preprints*, 2021. doi:10.48550/arXiv.2104.06004
- About Python*. Python.org., 2022. Available at: <https://www.python.org/about/> (accessed 10 March 2023).
- Velichko A. N. A speech signal analysis method for automatic aggression detection in colloquial speech. *Proc. of Voronezh State University. Ser.: Systems Analysis and Information Technologies*, 2022, no. 4, pp. 180–188 (In Russian). doi:10.17308/sait/1995-5499/2022/4/180-188
- Velichko A., Markitantov M., Kaya H., Karpov A. Complex paralinguistic analysis of speech: Predicting gender, emotions and deception in a hierarchical framework. *Proc. of INTERSPEECH-2022*, 2022, pp. 4735–4739. doi:10.21437/Interspeech.2022-11294
- Velichko A. N., Karpov A. A. Automatic detection of deceptive and truthful paralinguistic information in speech using two-level machine learning model. *Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Proc. of the Intern. Conf. "Dialogue 2021"*, 2021, no. 20(27), pp. 698–704. doi:10.28995/2075-7182-2021-20-698-704
- Schuller B., Steidl S., Batliner A., Hirschberg J., Burgoon J. K., Baird A., Elkins A., Zhang Y., Coutinho E., Evanini K. The INTERSPEECH 2016 computational paralinguistic challenge: Deception, sincerity & native language. *Proc. of INTERSPEECH-2016*, 2016, pp. 2001–2005. doi:10.21437/Interspeech.2016-129
- Pérez-Rosas V., Abouelenien M., Mihalcea R., Burzo M. Deception detection using real-life trial data. *Proc. of the 2015 ACM Intern. Conf. on Multimodal Interaction*, 2015, pp. 59–66. doi:10.1145/2818346.2820758
- Gratch J., Artstein R., Lucas G., Stratou G., Scherer S., Nazarian A., Wood R., Boberg J., DeVault D., Marsella S., Traum D., Rizzo S., Morency L.-P. The distress analysis interview corpus of human and computer interviews. *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Language Resources and Evaluation (LREC'14)*, 2014, pp. 3123–3128.
- Ringeval F., Schuller B., Valstar M., Cummins N., Cowie R., Tavabi L., Schmitt M., Alisamir S., Amiriparian S., Messner E.-M., Song S., Liu S., Zhao Z., Mallol-Ragolta A., Ren Z., Soleymani M., Pantic M. AVEC 2019 workshop and challenge: State-of-mind, detecting depression with AI, and cross-cultural affect recognition. *Proc. of the 9th ACM Intern. Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge (AVEC'19)*, 2019, pp. 3–12. doi:10.1145/3347320.3357688



Оптимизация профиля функционирования сложной технической системы

А. Д. Синюк^а, доктор. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-0608-4359

О. М. Лепешкин^а, доктор. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-0362-0446

В. А. Филимонов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0006-2297-9338

О. А. Остроумов^а, канд. техн. наук, oleg-26stav@mail.ru

^аВоенная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064, РФ

Введение: в условиях ограниченности ресурсов системы возникает необходимость максимально эффективно их использовать. При проектировании и построении системы используется ее структурная оптимизация, при которой она может быть избыточна по выполняемым функциям и задачам. Это неэффективно и требует больших затрат ресурсов. **Цель:** разработать алгоритм оптимизации использования ресурсов и выполнения профиля функционирования сложной технической системы, характеризующего ее целевое предназначение. **Результаты:** разработан новый алгоритм оптимизации использования ресурсов и выполнения профиля функционирования сложной технической системы, основанный на потребности в выполнении системой функций и задач. Он позволит в любой момент времени получить оптимальные сценарии выполнения функции и задачи системы независимо от влияния дестабилизирующих факторов и меняющейся обстановки и своевременно обеспечивать функциональную устойчивость системы. Предлагается осуществлять поиск множества вариантов задействования ресурсов для выполнения каждой задачи системы с последующим выбором из этого множества оптимального сценария для нее. Выбор производится на основании оценки суммарной эффективности использования ресурсов для выполнения каждой задачи. Представлены результаты использования алгоритма для выбора оптимального сценария выполнения ограниченного набора задач системы, основанные на формировании множества матриц оптимального выполнения задач и матриц выполнения целевого предназначения системы. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы при проектировании и построении систем управления, контроля, поддержки принятия решений для расчета и выбора наиболее эффективного варианта выполнения задач, функций, целевого предназначения системы.

Ключевые слова – оптимизация, функциональная устойчивость, надежность, критичность элементов системы, критичность системы, система связи, система управления, сложная техническая система, профиль функционирования системы, регламент функционирования системы, эффективность функционирования, состояние системы, сценарий выполнения задачи.

Для цитирования: Синюк А. Д., Лепешкин О. М., Филимонов В. А., Остроумов О. А. Оптимизация профиля функционирования сложной технической системы. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 12–25. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25, EDN: ABOZFA

For citation: Sinuk A. D., Lepeshkin O. M., Filimonov V. A., Ostroumov O. A. Optimization of the functioning profile of a complex technical system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 12–25 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25, EDN: ABOZFA

Введение

Процесс функционирования сложной технической системы (СТС) в режиме реального времени и в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов сопряжен с наступлением событий нарушения этого процесса [1, 2]. Современные системы функционируют в постоянно меняющихся условиях, которые, как и состояние системы, носят случайный характер. Динамика изменения условий очень высокая, при этом критичность отдельных систем, объектов и элементов определяет необходимость системы быстро обнаруживать возникающие в ней конфликты, реагировать на них и устранять. Конфликты, как правило, обусловлены противоречием между наступлением событий, нарушающих функционирование системы и ее

элементами, и потребностями в их устойчивом функционировании [3, 4]. Возникает задача обеспечения устойчивого функционирования системы, решение которой возможно за счет реализации адекватных управленческих решений. В процессе реализации таких решений осуществляется управление ресурсами системы для выполнения требуемого целевого предназначения. При этом время, необходимое для выявления и реакции системы на возникающие конфликты, должно стремиться к нулю, что требует построения качественно новых интегрированных систем контроля и мониторинга, позволяющих не только выявлять конфликт в системе, но и предвидеть его наступление [5, 6]. Для контроля и мониторинга состояния системы и определения ее способности выполнить свое целевое предназначение предлагается использовать профиль

функционирования системы (ПФС) [7]. Профиль представляет собой набор характеристик и правил, описывающих процесс функционирования СТС. Использование профиля позволит своевременно выявить конфликты, отреагировать на них и обеспечить функциональную устойчивость системы.

Анализ работ по оценке устойчивости систем

Устойчивость выступает как одно из требований, предъявляемых к любой технической системе. Традиционно она оценивается через надежность [8–11], живучесть [12–13], помехоустойчивость [14–16] и киберустойчивость [17–22]. Показатели, характеризующие устойчивость, как правило, не учитывают динамику процессов, происходящих в системе, и изменение обстановки.

В работе [8] представлен подход к оценке надежности интеллектуальных транспортных систем, учитывающий их особенности. Показаны результаты тестирования систем, способствующие обнаружению и исключению ошибок в системе контроля, что позволяет обеспечить требуемую надежность.

В [9] рассматривается надежность программных приложений, используемых в технических системах. На основе анализа надежности программных компонентов приложения оценивается надежность всего приложения. Полученные результаты оценки позволяют прогнозировать изменения надежности приложений под действием различных факторов.

Проблема обеспечения устойчивости и надежности систем в условиях ограниченности ресурсов рассмотрена в [10, 11]. Предлагаются алгоритмы использования и распределения ограниченных ресурсов в различных условиях при соблюдении требований к надежности сети, системы и к эффективности их функционирования.

В [12] оценка емкостной устойчивости осуществляется через надежность и живучесть телекоммуникационных сетей, она учитывает их пропускную способность. Анализируется влияние неоднородностей в сети на интегрированный показатель емкостной устойчивости.

В работе [13] оценка живучести критической инфраструктуры городской среды производится с точки зрения влияния на устойчивость уровня компетентности персонала. Предложены профили теоретической подготовки специалистов.

Критичность систем, необходимость противодействия компьютерным атакам на них способствовали развитию направления, связанного с исследованием киберустойчивости систем. В [19] представлена методология управления

энергетической системой, позволяющая противодействовать компьютерным атакам на ее инфраструктуру. В [20–22] рассматривается устойчивость объектов критической информационной инфраструктуры. В [20] исследуется общесистемная проблема обеспечения устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры. В [21] на основе математического аппарата теории игр и теории принятия решений разработана модель оценки безопасности и устойчивости интеллектуальной сети.

Одним из методов противодействия атакам и обеспечения устойчивости сетей и систем связи является использование систем обнаружения атак. Предложенная модель [23] такой системы на основе нейронной сети позволяет обнаруживать вторжения путем разделения пакетов на обычные и вредоносные. В процессе функционирования системы происходит ее самообучение.

Прогнозирование изменения состояния системы исследуется в работе [24]. Для повышения устойчивости систем управления предлагается переход от иерархической структуры ее построения к сетевой. Работа носит общесистемный характер и направлена на формирование практических рекомендаций, которые позволяют повысить устойчивость системы управления.

Методологические подходы к обеспечению устойчивости систем и объектов исследуются в работах [25–27]. В [25] методология основана на оценке устойчивости элементов системы. Представленный подход включает формирование и выбор оптимальных сценариев выполнения процессов из множества удовлетворяющих требованиям. Кроме этого, осуществляется поиск параметров, изменение значений которых оказывает существенное влияние на устойчивость с последующим обеспечением соответствия их требованиям.

Функциональная устойчивость системы

Изучение работ привело к выводу, что количественная оценка выполнения системой функций и задач, определяющая ее функциональную устойчивость, а также анализ использования оптимального и эффективного вариантов задействования ресурсов системы не проводятся, и требуется исследование данного вопроса.

Функционально устойчивое состояние СТС — это такое состояние системы, в котором она способна выполнить заданный профилем перечень целей, функций, задач, требования, предъявляемые к системе и ее элементам, при этом в ней имеется необходимый для этого ресурс.

В качестве ресурса могут рассматриваться элементы системы, технические средства, пер-

сонал, а также производные их деятельности, например пропускная способность [28], память, частотный, энергетический, каналный и т. д. ресурсы.

В процессе функционирования СТС переходит из состояния в состояние. Такой переход может происходить под воздействием на нее различных дестабилизирующих факторов, что может снижать ее функциональную устойчивость. Концептуально процесс обеспечения функциональной устойчивости СТС можно представить в виде совокупности взаимосвязанных множеств: множества целей СТС $A = \{A_1, A_2, \dots, A_a\}$, где a – количество выполняемых системой целей; множества требований, предъявляемых к СТС и ее элементам, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, где n – количество требований, предъявляемых к системе и ее элементам (целям, функциям, задачам, ресурсам); множества функций $F = \{F_1, F_2, \dots, F_c\}$, где c – количество выполняемых системой функций; множества задач $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_q\}$, где q – количество выполняемых системой задач; множества ресурсов системы $E = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, где m – количество ресурсов системы, обеспечивающих ее функционирование [7, 29, 30].

В процессе формирования профиля каждый элемент системы может быть разбит на подцели, подфункции, подзадачи, а также дополнительно иметь главную цель, характеризующую ее целевое предназначение. Профиль представляет собой набор матриц, каждая из которых бинарная, при этом $b_{ij} \in \{0, 1\}$:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент имеется;} \\ 0, & \text{если элемент отсутствует.} \end{cases}$$

При формировании профиля функционирования системы для каждой матрицы возможен случай, когда один и тот же ресурс может быть использован для выполнения разных задач, одна и та же задача участвует в выполнении различных функций, одна и та же функция участвует в выполнении разных целей. Частично уйти от такого состояния можно формированием матриц согласованности использования ресурса, выполнения задач, функций и целей по времени, т. е. формированием регламентов в системе.

Формируемый ПФС будет адекватным, если для матриц задействования ресурсов, выполнения задач, функций, требований и целей существует такая подстановка μ , для которой диагональное произведение элементов каждой из матриц окажется не нулевым:

$$\exists \mu_k : \prod_{i=1}^n b_{i, \mu_k} \neq 0, \quad i \in (1, 2, \dots, n), \quad k \in (1, 2, \dots, n!),$$

где n – количество профилей.

Формируемый для СТС ПФС будет выполнимым, если для всех матриц профиля существует хотя бы один вариант выполнения всех и каждого одиночных, групповых профилей, входящих в ПФР, при отсутствии пересечения по времени задействования ресурсов для их выполнения:

$$\exists b_{i, \mu_k} = 1, \forall i \in (1, 2, \dots, n), \forall k \in (1, 2, \dots, n!) | t \neq t_i.$$

Состояние системы, описываемое ПФС, можно рассматривать как функционально устойчивое, если для профиля существует хотя бы один вариант его выполнения.

Система называется абсолютно устойчивой, если в результате нарушения ее функционирования она способна перейти из текущего состояния в состояние $s_{i+1} \in S$. Множество устойчивых состояний S состоит из элементов, удовлетворяющих условиям

$$S = \{s_i(A)\}, \quad \lim_{t_\phi \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow \infty} \lim_{F_\phi \rightarrow \infty} f(x) = A$$

при $x = \frac{F_\phi(r, t)}{F_{\phi, \text{треб}}}$, $F_\phi(r, t)$ – количество функций,

выполняемых системой в процессе функционирования, $F_{\phi, \text{треб}}$ – требуемое количество функций, которые должна выполнить система в процессе функционирования, $\frac{t_\phi}{t_{\phi, \text{треб}}} \rightarrow 1$, t_ϕ – время

функционирования системы, $t_{\phi, \text{треб}}$ – требуемое время функционирования системы, $r \in E$, $\forall i \in (1, 2, \dots, n), \forall j \in (1, 2, \dots, m)$.

Любое состояние системы называется условно устойчивым, если в результате воздействия на нее различных дестабилизирующих факторов система способна выполнять свое целевое предназначение, однако нарушается качество выполнения одной и более задач $\exists Z_{q\phi} Q(Z_{q\phi}) \notin Q(Z_{q\phi, \text{треб}})$ или функций $\exists F_{q\phi} Q(F_{q\phi}) \notin Q(F_{q\phi, \text{треб}})$, где функция $Q(*)$ характеризует выполнение профиля, при этом система переходит из состояния $s_i \in S$ в состояние $s_{v+1} \in S_{y.u.}$. Множество условно устойчивых состояний $S_{y.u.}$ будет включать элементы, для которых выполняется следующее условие:

$$S_{y.u.} = \{s_v(A)\}, \quad \lim_{t_\phi \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow \infty} \lim_{F_\phi \rightarrow \infty} f(x) = A$$

при $x = \frac{F_\phi(r, t)}{F_{\phi, \text{треб}}}$, $\frac{t_\phi}{t_{\phi, \text{треб}}} \rightarrow 1$, $r \in E$, $\forall i \in (1, 2, \dots,$

$n), \forall j \in (1, 2, \dots, m)$.

Состояние системы называется функционально неустойчивым, если оно характеризуется невыполнением функций, задач, целей, требова-

ний, предъявляемых к системе и ее элементам, в любой момент времени либо нарушением выполнения целевого предназначения.

Постановка задачи на оптимизацию ресурса для выполнения профиля функционирования СТС

Рассмотрим систему, состоящую из определенного ограниченного набора элементов N . При этом система состоит из набора ресурсов, располагающихся на элементах системы и позволяющих функционировать, т. е. выполнять определенный и ограниченный набор задач. Матрица задач $Y_Z = \{y_{Zi,j}\}$ и матрица ресурсов $Y_E = \{y_{Ei,j}\}$ позволяют сформировать матрицу выполнимости задач $Y_{ZE} = \{y_{ZEi,j}\}$. Сумма всех ресурсов системы определяет способность системы выполнить целевое предназначение и условия ее синтеза

$$E = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m r_{ij}, 0 \leq E \leq qm, r_{ij} \in \{0, 1\},$$

где E – общее количество ресурсов системы, используемых в профиле; q – индекс, характеризующий номер задачи, решаемой системой в профиле; m – индекс, характеризующий номер ресурса r_{ij} , задействованного для выполнения q -й задачи.

Способность выполнить каждую q -ю задачу Z_q требует выделения r_{ij} -го ресурса. Каждой задаче Z_q поставим в соответствие характеристику качества ее выполнения w_{ij} , совокупность которых формирует множество W , при этом $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$, тогда матрица, характеризующая качество функционирования СТС, будет иметь вид $Y_W = \{y_{wi,j}\}$.

Предположим, что для достижения целевого предназначения системы необходимо выполнить ограниченное и конечное число целей, функций и задач на ограниченном интервале времени. Формальное описание целей, функций, задач можно представить в виде элементарных конъюнкций:

$$A = \bigcap_F F_i, F_i \in F, i \in \{1, 2, \dots, c\};$$

$$F = \bigcap_Z Z_i, Z_i \in Z, i \in \{1, 2, \dots, q\};$$

$$A = \bigcap_E r_i, r_i \in E, i \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

Нарушение процесса функционирования может привести к деградации системы, обусловленной изменением функционально-структур-

ного состава системы. Имеющиеся механизмы синтеза системы должны способствовать выполнению системой своего целевого предназначения с требуемым качеством за счет перераспределения ресурсов, задач, функций и целей системы, а также изменения структуры СТС, т. е.

$$W_{Z_i} \geq W_{Z_i_min} \geq W_{Z_i_треб}$$

при $E \geq E_{min} \mid k_{Z_{крит}} = 1, k_{E_{крит}} = 1,$

где $k_{Z_{крит}}$ – коэффициент выполнения критически значимых задач: $k_{Z_{крит}} = \frac{Z_{крит.вып}}{Z_{крит.треб}}$; $k_{E_{крит}}$ – коэффициент наличия и использования критически значимых ресурсов для выполнения задач: $k_{E_{крит}} = \frac{E_{крит.вып}}{E_{крит.треб}}$.

При снижении количества ресурсов, необходимых для выполнения целевого предназначения системы, ниже минимального требуемого уровня, а также при снижении качества их выполнения принимается решение о невыполнении системой той или иной задачи, функции или цели.

Потребность системы, лиц, принимающих решение, в выполнении определенного целевого предназначения, количества, типа и качества ресурсов, характеризующих возможности СТС по выполнению ее целевого предназначения, определяются структурой системы на всем множестве ее состояний. Возникает потребность оптимизации структуры системы, позволяющей выбрать такой вариант построения СТС, использование которого предоставляет в распоряжение системы максимально большой объем ресурсов, необходимых для выполнения ее целевого предназначения. Это способствует эффективному распределению ресурсов для выполнения задач, функций и целей системы.

Постановка задачи на оптимизацию профиля функционирования СТС. Оптимальное распределение ресурсов в СТС

Рассмотрим СТС, состоящую из множества элементов, позволяющих выполнить ее целевое предназначение. Система описывается совокупностью частных критериев оптимальности $W_{\Sigma} = \{W_1, W_2, \dots, W_i\}$, характеризующих качество выполнения таких элементов профиля функционирования СТС. Каждый из элементов имеет различное значение для системы. Предположим, что требуется максимизация каждого такого критерия в одной и той же области допустимых значений.

Критерий оценки оптимальной структуры профиля функционирования системы будет иметь вид

$$\max \left(\sum_{k_{di}} W_{i\Sigma}(k_{di}) \right) \text{ при } \min (E), i \in (0, E), \quad (1)$$

где k_d — степень деградации СТС (профиля функционирования) в процессе ее функционирования; $W_{i\Sigma} = \sum_{j=1}^J k_j W_j$ — сумма, определяющая степень качества выполнения элемента профиля функционирования СТС, J — количество элементов профиля функционирования СТС, k_j — коэффициент значимости элемента профиля, функции, цели системы, элемента профиля функционирования СТС, W_j — качество выполнения j -го элемента профиля функционирования СТС.

Для формального описания процесса функционирования СТС предлагается использовать теорию графов и теорию матриц. Рассмотрим граф $G(V, L, W)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ — множество вершин, характеризующих элементы процесса функционирования СТС; $L = \{l_1, l_2, \dots, l_j\}$ — множество дуг, соответствующих переходам между элементами графов — их вершинами; $W = \{w_1, w_1, \dots, w_i\}$ — множество весов дуг, характеризующих качество выполнения целей, функций, задач (профилей функционирования СТС). Каждой дуге присваивается соответствующий вес, характеризующий качество ее выполнения. Кроме этого, каждой вершине присваивается категория значимости. Наличие более чем одного маршрута достижения каждой вершины, независимо от уровня ее нахождения, определяет возможности системы по выполнению того или иного элемента ПФС, а также возможности синтеза системы в случае нарушения (пропажи, отказа) ресурса, используемого в наиболее предпочтительном варианте выполнения ПФС.

Нахождение наиболее эффективного варианта выполнения задачи, функции, цели можно свести к задаче о наибольшем потоке. Алгоритм поиска будет иметь следующие этапы.

1. Рассмотрим систему, достижение целевого предназначения которой определяется выполнением заданного набора задач $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3\}$, $Z_1 = r_1 \otimes r_2 \otimes r_3, Z_2 = r_4 \otimes r_5 \otimes r_6, Z_3 = r_8 \otimes r_9 \otimes Z_1$, где операция \otimes определяется как логическое «И».

2. Построим граф $G(V, L, W)$ и запишем матрицу инцидентий $Y = |a_{ij}|_{q \times m}$, которая его характеризует.

3. Для определения возможности выполнения представленных задач случайным образом из множества элементов системы (графа) выбира-

ется i -я вершина. Используя матрицу Y , находим дуги, которые соединены с этой вершиной и принадлежат множеству $L_{r_1}, L_{r_1} \in L$. В матрице в i -й строке, при наличии связи с другой вершиной, будут иметь значение единицы.

4. На следующем этапе для каждой вершины, которая имеет связь с i -й вершиной, находим множество дуг, которые соединяют ее с другими вершинами графа (без учета дуги в i -ю вершину). Аналогично наличие таких дуг в графе в матрице Y отображается в соответствующей ячейке в виде символа «1», при этом сами дуги принадлежат множеству $L_{r_2}, L_{r_2} \in L$.

5. Пункты 3 и 4 выполняются для всех возможных вершин и путей до достижения i -й вершины, для которой полученные дуги, например, как для первой задачи, принадлежат множеству $L_{r_3}, L_{r_3} \in L$.

6. Формируется множество маршрутов выполнения каждой задачи СТС, которые выступают в качестве множества сценариев, характеризующих способность системы выполнить эту задачу.

7. Для каждого сценария вычисляется значение W :

$$W_{Z_1} = W_{r_1}^* + W_{r_2}^* + W_{r_3}^* = k_{r_1} (W_{r_1})_i + k_{r_2} (W_{r_2})_j + k_{r_3} (W_{r_3})_q ;$$

$$W_{Z_2} = W_{r_4}^* + W_{r_5}^* + W_{r_6}^* + W_{r_7}^* = k_{r_4} (W_{r_4})_i + k_{r_5} (W_{r_5})_j + k_{r_6} (W_{r_6})_q + k_{r_7} (W_{r_7})_n ;$$

$$W_{Z_3} = W_{r_8}^* + W_{r_9}^* + W_{Z_1} = k_{r_8} (W_{r_8})_i + k_{r_9} (W_{r_9})_j + W_{Z_1},$$

где k_{r_i} — коэффициент значимости i -й вершины графа $G(V, L, W)$; i, j, q, n — индексы, характеризующие количество дуг для каждой рассматриваемой в пп. 3–5 вершины.

8. Для каждой задачи определяется максимальное значение эффективности ее выполнения путем сравнения эффективностей, характеризующих каждый сценарий.

В отечественной и зарубежной литературе [31, 32] даны различные по своей сути определения эффективности. Г. Б. Петуховым введен показатель эффективности, рассматриваемый как вероятностная мера соответствия характеристик случайных эффектов целенаправленного процесса требуемым (директивно заданным) значениям этих характеристик [33].

Эффективность функционирования системы определим как комплексное свойство, характеризующее степень достижения системой целевого предназначения (цели, функции, задачи), определяемого требованиями, предъявляемыми к нему (к ним) [33, 34]. Поиск оптимальной струк-

туры профиля сводится к поиску множества матриц, характеризующих достижение целевого предназначения системы, соответствующего выполнению условия оптимальности (1). В условиях ограниченности ресурса и необходимости реализации целевого предназначения системы при выборе оптимальной структуры СТС можно использовать несколько стратегий:

– выполнение полного набора функций с максимальной эффективностью. Такой вариант, как правило, применим в условиях большого количества ресурсов, минимального количества задач, функций, целей, обеспечивающих выполнение целевого предназначения системы, отсутствия пагубных результатов воздействия дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению функционирования системы:

$$W_{\Sigma} = \max W;$$

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma} = \max W, W_{r_i} > W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i} > W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i} > W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i} > W_{a_i \text{ треб}}, W_{r_i} = \max W_{r_i},$$

$$W_{z_i} = \max W_{z_i}, W_{f_i} = \max W_{f_i}, W_{a_i} = \max W_{a_i};$$

– выполнение в первую очередь ограниченного набора задач, функций, целей, критически важных для достижения целевого предназначения СТС, с максимальной эффективностью, остальных – с эффективностью, не ниже требуемой. В данном случае роль играют ограниченность ресурса системы, нарушения функционирования отдельных элементов, снижение качества выполнения задач, функций, целей:

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma 1} + W_{\Sigma 2 \text{ крит}};$$

$$W_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma 2 \text{ крит}} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i \text{ крит}} +$$

$$+ \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i \text{ крит}},$$

$$W_{\Sigma 2 \text{ крит}} = \max W, W_{r_i} \geq W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i} \geq W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i} \geq W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i} \geq W_{a_i \text{ треб}};$$

– выполнение всех элементов профиля функционирования системы с эффективностью, не ниже требуемой:

$$W_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma} \geq \max W_{\Sigma \text{ треб}}, W_{r_i} \geq W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i} \geq W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i} \geq W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i} \geq W_{a_i \text{ треб}};$$

– выполнение критически важных элементов профиля функционирования с эффективностью, не ниже требуемой, при этом часть запланированных к выполнению функций, задач может не выполняться для перераспределения ресурсов системы:

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma 1} + W_{\Sigma 2 \text{ крит}};$$

$$W_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i} + \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i},$$

$$W_{\Sigma 2 \text{ крит}} = \sum_{i=1}^m k_{r_i} W_{r_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^q k_{z_i} W_{z_i \text{ крит}} +$$

$$+ \sum_{i=1}^c k_{f_i} W_{f_i \text{ крит}} + \sum_{i=1}^a k_{a_i} W_{a_i \text{ крит}},$$

$$W_{\Sigma} = \max W, W_{r_i \text{ крит}} \geq W_{r_i \text{ треб}}, W_{z_i \text{ крит}} \geq W_{z_i \text{ треб}},$$

$$W_{f_i \text{ крит}} \geq W_{f_i \text{ треб}}, W_{a_i \text{ крит}} \geq W_{a_i \text{ треб}}, W_{r_i} \geq 0,$$

$$W_{z_i} \geq 0, W_{f_i} \geq 0, W_{a_i} \geq 0.$$

Выбор сценария построения СТС определяет условия действия лиц, принимающих решение, при нарушении функционирования системы для обеспечения непрерывного функционирования функционально устойчивой системы.

Распределение ресурсов в условиях нарушения функционирования СТС

Для оценки эффективности функционирования СТС в условиях нарушения функционирования СТС (ПФС) рассмотрим граф $G(V, L, W)$. Невыполнение того или иного i -го элемента профиля будем рассматривать как отсутствие дуги (дуг) l_i , связывающей его с другим (другими) элементом СТС.

Возникновение ситуаций пропадания дуг и вершин графа приведет к необходимости реконфигурации СТС [4, 35]. При отсутствии возможности провести реконфигурацию система деградирует в систему, описываемую новым графом $G'(V', L', W')$, при этом $G' \subset G$. Последующее нарушение функционирования системы и ее элементов, выход из строя отдельных элементов приведут к дальнейшей деградации системы, при этом полное отсутствие дуг, показывающих связи между элементами графа $G(V, L, W)$, соответствует пустому графу.

Степень деградации системы, определяемая отличием исходного графа от полученного, после пропадания дуг и вершин

$$k_d = \frac{v' + l'}{v + l},$$

где v' — количество вершин, пропавших из исходного графа, $v' \in V'$; l' — количество дуг, пропавших из исходного графа, $l' \in L'$; v — количество вершин исходного графа, $v \in V$; l — количество дуг исходного графа, $l \in L$.

Каждому графу $G'(V', L', W')$ ставится в соответствие коэффициент деградации k_d : $G \rightarrow k_d = 0, G'k'_d, \dots, G^i \rightarrow k_d^i = 1$.

Нарушение функционирования того или иного элемента СТС, множества элементов на разных уровнях иерархии системы может характеризоваться одинаковым коэффициентом деградации, при этом для каждого коэффициента может формироваться не один вариант построения СТС (построения графа), а множество. Для оценки эффективности функционирования СТС предлагается использовать математическое ожидание W :

$$W_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^N W_\Sigma^i}{N},$$

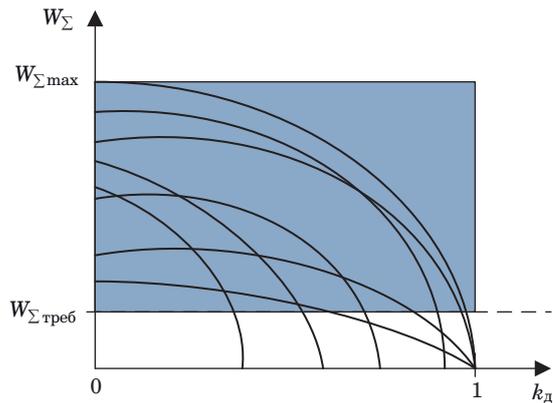
где N — возможное количество графов, описывающих СТС, с нарушенными (не выполняющимися, пропавшими) дугами и вершинами, которые можно построить для i -го коэффициента деградации k_d .

Таким образом, изменение (деградацию) состояния СТС при воздействии различных дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению функционирования СТС, можно описать тремя величинами:

$$D = \{k_d^*, G^*, W^*\}, \quad (2)$$

где k_d^* — множество, характеризующее изменение коэффициента деградации, $k_d^* = \{k_{d0}, k_{d1}, \dots, k_{di}\}$; G^* — множество, характеризующее изменение графа G , $G^* = \{G_0, G_1, \dots, G_i\}$; W^* — множество, показывающее изменение эффективности выполнения профиля функционирования СТС, $W^* = \{W_0, W_1, \dots, W_i\}$.

Изменение состояния СТС, приводящее к нарушению ее функционирования, соответствующее множеству D , определяемому по выражению (2), можно представить в виде зависимости W от k_d (рис. 1). Выбор оптимальной структуры СТС сводится к одной из четырех, представленных выше, стратегий, которая соответствует максимуму эффективности выполнения профи-



■ **Рис. 1.** Зависимость эффективности от коэффициента деградации структуры СТС
 ■ **Fig. 1.** Dependence of efficiency on the coefficient of degradation of the CTS structure

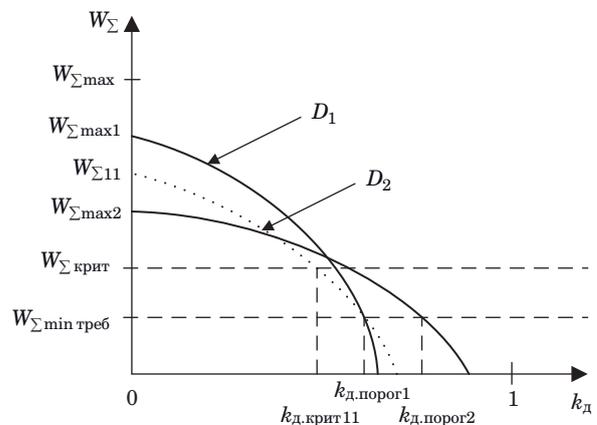
ля функционирования системы при минимальных затратах ресурса.

Пример выбора оптимальной структуры СТС

Рассмотрим два сценария D_1 и D_2 изменения состояния СТС под воздействием дестабилизирующих факторов и произведем выбор наиболее подходящего для данной СТС (рис. 2).

Предположим, что для двух сценариев $D_1(W_\Sigma, k_d) \approx D_2(W_\Sigma, k_d)$, при этом представленные на рис. 2 кривые имеют различное основание k_d . Необходимо определить оптимальную структуру СТС в условиях ее деградации.

Минимальному требуемому значению суммарной эффективности функционирования СТС для сценариев D_1 и D_2 будут соответствовать



■ **Рис. 2.** Зависимость эффективности от коэффициента деградации структуры СТС для сценариев D_1 и D_2
 ■ **Fig. 2.** Dependence of efficiency on the coefficient of degradation of the CTS structure for scenarios D_1 and D_2

коэффициенты деградации $k_{д.порог1}$ и $k_{д.порог2}$. Данные состояния системы определяют такие условия, при которых система не сможет выполнить целевое предназначение.

При рассмотрении СТС, определяемой двумя состояниями деградации, предлагается исследовать четыре предложенных в работе подхода к поиску оптимальной структуры СТС. Одним из критериев выбирается выполнение большего количества элементов профиля в условиях максимально большого количества нарушений функционирования элементов, т. е. когда $k_{д2} > k_{д1}$. Такой подход может использоваться для систем, где критичны вопросы надежности, живучести, безопасности элементов и процесса функционирования. К таким системам можно отнести системы, работающие в сфере обороны, защиты гражданского населения и т. д. Для случая, изображенного на рис. 2, по этому критерию выбираем сценарий D_2 .

Другим критерием может служить качество выполнения профиля функционирования и его элементов. При этом выбор сценария действия может осуществляться:

- по максимальному значению качества выполнения профиля. Для данного рассматриваемого случая по такому критерию оптимальным будет вариант D_2 ;
- при обеспечении качества выполнения профиля не ниже требуемого при условии максимума качества выполнения критически значимых элементов профиля;
- при обеспечении качества выполнения критически значимых элементов профиля независимо от качества выполнения профиля функционирования.

Выбор того или иного критерия происходит в зависимости от условий функционирования системы, специфики решаемых задач, целевого предназначения самой системы и профиля ее функционирования [7, 35].

Пример оптимизации использования ресурсов для выполнения задач

Рассмотрим систему, которая выполняет четыре задачи Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 , и для каждой задачи определим условия ее выполнения. Для выполнения задач в системе имеется ресурс $E = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7\}$, при этом $r_6 = r_1 + r_2$ и $r_7 = r_5 + r_4$. Эффективность и качество функционирования каждого ресурса описываются множеством состояний w_{ij} из W , изменение которых показывает нарушение и деградацию каждого ресурса системы. Предположим, что каждая задача выполняется с использованием следующих ресурсов: $Z_1 = r_6 \otimes r_3 \oplus r_7 \otimes r_1 \oplus r_6 \otimes r_5 \oplus r_4 \otimes r_2 \otimes r_3$, $Z_2 =$

$= r_1 \otimes r_3 \otimes r_4 \oplus r_5 \otimes r_1 \oplus r_7 \otimes r_2$, $Z_3 = r_2 \otimes r_7 \oplus r_5 \otimes r_2 \otimes r_3 \oplus r_3 \otimes r_1$, $Z_4 = r_6 \otimes r_7 \oplus r_1 \otimes r_3 \oplus r_2 \otimes r_3 \otimes r_4$, где операция \oplus определяется как логическое «ИЛИ».

Эффективность выполнения каждой задачи равна сумме эффективностей функционирования всех ресурсов, использующихся для выполнения данной задачи, при этом эффективность функционирования каждого ресурса определяется выражением $W_i = k_i w_i$:

$$\begin{aligned} W_{Z_1} &= (k_{r_6} W_{r_6} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_1} W_{r_1}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_6} W_{r_6} + k_{r_5} W_{r_5}) \oplus (k_{r_4} W_{r_4} + k_{r_2} W_{r_2} + k_{r_3} W_{r_3}); \\ W_{Z_2} &= (k_{r_4} W_{r_4} + k_{r_1} W_{r_1} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_5} W_{r_5} + k_{r_1} W_{r_1}) \oplus (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_2} W_{r_2}); \\ W_{Z_3} &= (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_2} W_{r_2}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_2} W_{r_2} + k_{r_5} W_{r_5} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus (k_{r_3} W_{r_3} + k_{r_1} W_{r_1}); \\ W_{Z_4} &= (k_{r_7} W_{r_7} + k_{r_6} W_{r_6}) \oplus (k_{r_1} W_{r_1} + k_{r_3} W_{r_3}) \oplus \\ &\oplus (k_{r_4} W_{r_4} + k_{r_2} W_{r_2} + k_{r_3} W_{r_3}). \end{aligned}$$

Выбор варианта выполнения задачи за счет имеющегося ресурса будет характеризоваться максимальной эффективностью одного из вариантов задействования ресурсов для выполнения этой задачи.

Для формирования матрицы выполнения задач проверяется условие: если ресурс необходим для выполнения задачи или может использоваться в каком-либо сценарии ее выполнения, то в ячейку матрицы записывается значение «1», иначе значение «0». Кроме этого, для каждой задачи матрицу выполнимости можно показать, используя только те строки и столбцы, на пересечении которых в матрице присутствует значение «1», т. е. используя только те элементы, которые влияют на выполнение рассматриваемой задачи.

Для описания качества функционирования ресурсов системы предлагается сформировать матрицу эффективности. Значения в ячейках данной матрицы могут изменяться от 1 до 0, где значению «1» соответствует 100%-я эффективность функционирования ресурса, а значению «0» – прекращение функционирования ресурса.

Формирование матрицы состояния системы в каждый момент времени сводится к выполнению логической операции «ИЛИ» над соответствующими элементами матриц выполнения задач и нарушения выполнения задач: $|Y| = |Y_{ZE}| \oplus |Y_{ZE}^*|$, для данного выражения определены операции исключающего «ИЛИ» $0 \oplus 0 = 0$, $1 \oplus 0 = 1$, $0 \oplus 1 = 1$, $1 \oplus 1 = 0$.

Таким образом, при переходе из одного состояния системы в другое, обусловленное нарушением функционирования СТС, происходит деградация системы, при этом вариант (сценарий) задействования ресурсов для выполнения каждой задачи пересчитывается в соответствии с матрицей эффективности (качества функционирования) системы. Для выполнения каждой задачи в любой момент времени в системе выбирается вариант, обладающий наибольшей эффективностью функционирования, для которого требуется минимальное количество ресурсов. Данному варианту ставится в соответствие оптимальная матрица выполнения задач.

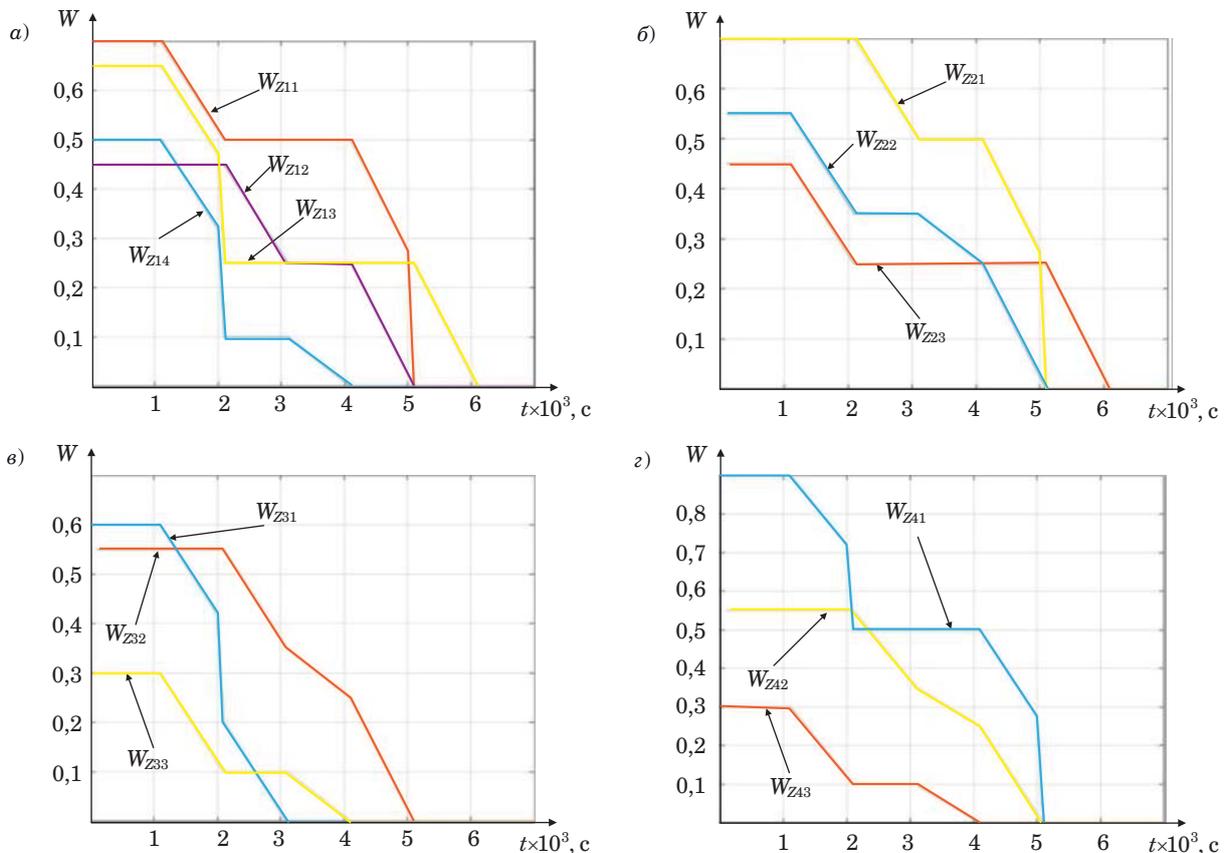
Представленный в работе подход был реализован в MatLab. В качестве исходных данных выбраны следующие: стратегия максимальной эффективности выполнения задачи; моделирование проводилось для ресурсов $E = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7\}$; коэффициенты значимости задаются матрицей $k_i = \{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7\} = \{0,2, 0,2, 0,1, 0,25, 0,25, 0,2, 0,25\}$; время моделирования 10^4 с. Полученные результаты для задач Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 (рис. 3, а-г) показывают основание вы-

бора того или иного сценария задействования ресурсов системы, позволяющих выполнить задачу с максимальной эффективностью.

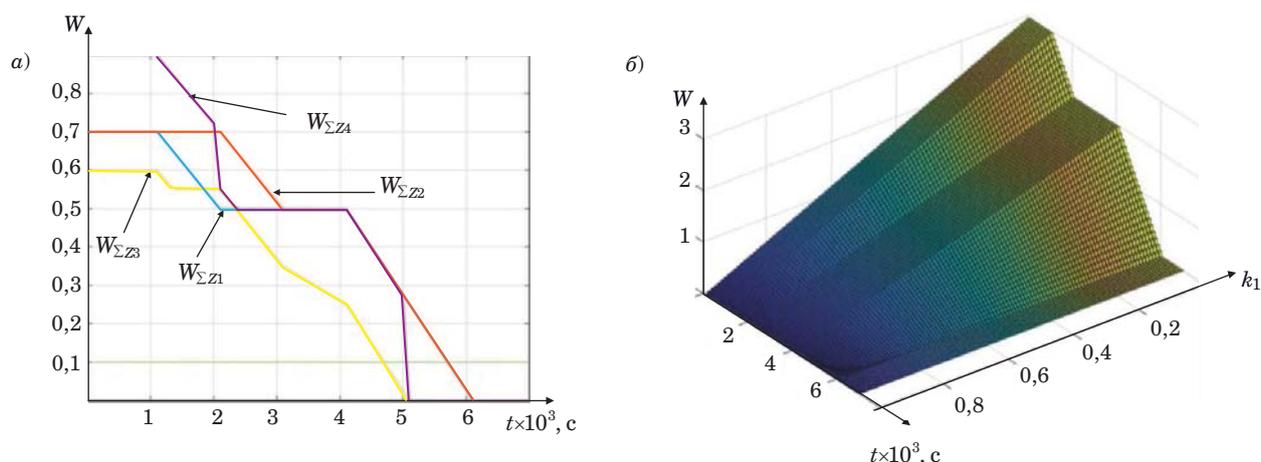
Результаты выбора сценария для каждой задачи представлены на рис. 4, а. Таким образом, с увеличением коэффициента деградации системы и нагрузки на оставшиеся ресурсы происходит снижение эффективности функционирования ресурсов и выполнения задач.

Для каждой задачи построены графики зависимости эффективности их выполнения от времени функционирования (коэффициента деградации) и коэффициента значимости ресурсов системы. Видно из рис. 4, б для первой задачи, что с увеличением значимости уменьшается эффективность выполнения задачи, что обусловлено возрастающей нагрузкой на ресурсы системы при нарушении функционирования ее элементов.

Результатом моделирования для каждого варианта исходных данных в любой момент времени моделирования будет оптимальное задействование ресурсов системы для каждой задачи, например, для $t_1 = 1200$ с и $t_2 = 2200$ с:



■ **Рис. 3.** Зависимость эффективности выполнения первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) задачи от времени моделирования с использованием различных сценариев задействования ресурсов
 ■ **Fig. 3.** Dependence of the efficiency of the first (а), second (б), third (в) and fourth (г) task using different scenarios of resource involvement on the simulation time



■ **Рис. 4.** Зависимость эффективности выполнения задач: *a* – от времени моделирования; *б* – от времени моделирования и значимости задачи

■ **Fig. 4.** Dependence of the efficiency of task execution: *a* – on the simulation time; *б* – on the modeling time and the significance of the task

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Y}_{\text{opt1}} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \\
 \mathbf{Y}_{\text{opt2}} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Как видно из матриц (3), с увеличением времени функционирования (моделирования) системы для одних задач сценарий их выполнения (задействования ресурса) не меняется, для других может происходить его смена. На времени моделирования t_1 и t_2 для задач Z_1 и Z_2 сценарий остается прежним (см. рис. 3, *a*, *б*), а для задач Z_3 и Z_4 меняется (см. рис. 3, *в*, *г*).

Заключение

Изменение состояния системы и ее элементов из-за отказов, поломок, последствий воздействия различных факторов приводит к постепенной деградации системы, неспособности ее выполнить свое целевое предназначение. Выполнение целевого предназначения в условиях ограниченности ресурса и необходимости формировать резерв средств системы наряду с потребностями лиц, принимающих решение, в получении результатов функционирования системы с максимальным качеством определяют актуальность исследования, а также необходимость оптимизации СТС в условиях меняющейся обстановки.

Особенностью алгоритма оптимизации структуры СТС является учет процесса функционирования системы и ее элементов, определение связей между ними и оценка влияния пропадания элементов ПФС на качество функционирования системы. Предлагается использовать четыре возможных варианта оптимизации структуры, в том числе на основе учета обеспечения выполнения критически значимых элементов ПФС. Предложенный в работе алгоритм разработан в развитие идей авторов, представленных в [1, 5, 7] и направленных на обеспечение функциональной устойчивости СТС.

Литература

1. **Остроумов О. А.** Проблема обеспечения функциональной устойчивости систем критически важных объектов. *Электросвязь*, 2022, № 1, с. 14–18. doi:10.34832/ELSV.2022.26.1.005
2. **Burlov V., Lepeshkin O., Lepeshkin M.** Parameters of the synthesized model of management of technosphere safety in the region. *E3S Web of Conferences, Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019)*, 2020, vol. 164, pp. 7–11. doi:10.1051/e3sconf/202016407011
3. **Burlov V., Uzun O., Grachev M., Faustov S., Sipovich D.** Web-based Power Management and Use Model. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258 AISC, pp. 629–641. doi:10.1007/978-3-030-57450-5_54
4. **Бородакий Ю. В., Тарасов А. А.** О функциональной устойчивости информационно-вычислительных систем. *Известия ТРТУ*, 2006, № 7 (62), с. 5–12.

5. Кондрашов Ю. В., Сатдинов А. И., Синюк А. Д., Остроумов О. А. Концептуальная модель контроля функций системы связи для выявления конфликтных ситуаций. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2022, т. 16, № 5, с. 21–27. doi:10.36724/2072-8735-2022-16-5-21-27
6. Петренко С. А. Концепция поддержания работоспособности киберсистем в условиях информационно-технических воздействий. *Труды ИСА РАН*, 2009, т. 41, с. 175–193.
7. Лаута О. С., Баленко Е. Г., Федоров В. Х., Лепешкин О. М., Остроумов О. А. Метод построения профиля функционирования сложной технической системы. *Инженерный вестник Дона*, 2023, № 2. ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2023/8183 (дата обращения: 10.05.2023).
8. El-Mowafy A. On detection of observation faults in the observation and position domains for positioning of intelligent transport systems. *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93(4). doi:10.1007/s00190-019-01306-1
9. ChauPattnaik S., Ray M., Nayak M. Component based reliability prediction. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2021, vol. 12, pp. 391–406. doi.org/10.1007/s13198-021-01079-x
10. Si S., Zhao J., Cai Z., Dui H. Recent advances in system reliability optimization driven by importance measures. *Frontiers of Engineering Management*, 2020, vol. 7(1), pp. 335–358. doi:10.1007/s42524-020-0112-6
11. Debnath S., Arif W., Roy S., Baishya S., Sen D. A comprehensive survey of emergency communication network and management. *Wireless Personal Communications*, 2022, vol. 124, pp. 1375–1421. doi:10.1007/s11277-021-09411-1
12. Kabadurmus O., Smith A. E. Evaluating reliability/survivability of capacitated wireless networks. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 26–40. doi:10.1109/TR.2017.2712667
13. Brauner F., Claßen M., Fiedrich F. Competence as Enabler of Urban Critical Infrastructure Resilience Assessment. In: *Urban Disaster Resilience and Security*. A. Fekete, F. Fiedrich (eds). The Urban Book Series Springer, Cham., 2018, pp. 171–184. doi:10.1007/978-3-319-68606-6_11
14. Савищенко Н. В., Остроумов О. А. Расчет оптимального и рационального числа ветвей разнесения в каналах связи с аддитивным белым гауссовым шумом и общими замираниями Райса — Накагами. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 6, с. 71–80. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.71
15. Pashintsev V. P., Chipigs A. F., Koval S. A., Skorik A. D. Analytical method for determining the interval of spatial correlation of fading in single-beam decimeter radio line. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 89–104. doi:10.1615/TELECOMRADENG.2021038432
16. Макаренко С. И. *Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография*. СПб., Научно-технические технологии, 2020. 337 с.
17. Haque M. A., Shetty S., Krishnappa B. ICS-CRAT: A cyber resilience assessment tool for industrial control systems. *2019 IEEE 5th Intl Conf. on Big Data Security on Cloud (Big Data Security), IEEE Intl Conf. on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conf. on Intelligent Data and Security (IDS)*, Washington, DC, USA, 2019, pp. 273–281. doi:10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS.2019.00058
18. Haque M. A., De Teyou G. K., Shetty S., Krishnappa B. Cyber resilience framework for industrial control systems: concepts, metrics, and insights. *2018 IEEE Intern. Conf. on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, Miami, FL, USA, 2018, pp. 25–30. doi:10.1109/ISI.2018.8587398
19. Kotenko I., Saenko I., Laut O., Karpov M. Methodology for management of the protection system of smart power supply networks in the context of cyber-attacks. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18. doi:10.3390/en14185963
20. Kete N., Punzo G., Linkov I. Enhancing resilience within and between critical infrastructure systems. *Environment Systems and Decisions*, 2018, vol. 38, pp. 275–277. doi:10.1007/s10669-018-9706-5
21. Zhu Q. Multilayer Cyber-Physical Security and Resilience for Smart Grid. In: *Smart Grid Control. Power Electronics and Power Systems*. J. Stoustrup, A. Annaswamy, A. Chakraborty, Z. Qu (eds). Springer, Cham. 2019, pp. 225–239. doi:10.1007/978-3-319-98310-3_14
22. Bassam Moussa, Parisa Akaber, Mourad Debbabi, Chadi Assi. Critical links identification for selective outages in interdependent power-communication networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 472–483.
23. Shaikh A., Gupta P. Real-time intrusion detection based on residual learning through ResNet algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022. doi:10.1007/s13198-021-01558-1
24. Афонин И. Е., Петров С. В., Макаренко С. И. Переход к адаптивно-сетевой структуре системы управления воздушно-космической обороной, как один из основных путей повышения ее устойчивости. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, 2021, № 19, с. 159–178. doi:10.24412/2500-4352-2021-19-159-178. <https://vva.mil.ru/upload/site21/B7st1fUZlu.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).
25. Hatim Q., Saldaña Ch., Shao G., Kim D. B., Morris K., Witherell P., Rachuri S., Kumara S. A decision support methodology for integrated machining process and operation plans for sustainability and productivity assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, pp. 3207–3230. doi:10.1007/s00170-019-04268-y

26. Kumari J., Karim R., Thaduri A., Pierre D. A framework for now-casting and forecasting in augmented asset management. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022, vol. 13, pp. 2640–2655. doi:10.1007/s13198-022-01721-2
27. Hammad A. W. A., Haddad A. Infrastructure Resilience: Assessment, Challenges and Insights. In: *Industry, Innovation and Infrastructure. Series: Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. W. L. Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. L. Salvia, T. Wall (eds). Springer, Cham. 2021, pp. 1–13. doi:10.1007/978-3-319-71059-4_25-1
28. Sinjuk A. D., Ostroumov O. A. Theorem about key capacity of a communication network. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 79–87. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-79-87
29. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 8th Intern. Scientific Conf. "TechSys 2019" – Engineering, Technologies and Systems*, 2019, vol. 618, pp. 12–88. 10.1088/1757-899X/618/1/012088
30. Юсупов Р. М., Мусаев А. А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий. *Тр. СПИИРАН*, 2017, вып. 1(51), с. 5–34. doi:10.15622/sp.51.1
31. Арсеньев В. Н., Хомоненко А. Д., Ядренкин А. А. Взвешенный учет априорной и опытной информации в задаче оценивания эффективности функционирования системы управления при распределении числа испытаний по закону Паскаля. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 3, с. 39–47. doi:10.31799/1684-8853-2020-3-39-47
32. Беляков М. И. Модель процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры в задаче оценивания его эффективности. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму*, 2020, № 11–12 (149–150), с. 71–75.
33. Сухов А. М. Оценивание эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности на основе теории стохастической индикации. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 3, с. 31–44. doi:10.31799/1684-8853-2022-3-31-44
34. Сухов А. М., Крупенин А. В., Якунин В. И. Методы анализа и синтеза исследования эффективности процессов функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак. *Автоматизация процессов управления*, 2021, № 4 (66), с. 4–14.
35. Смирнов А. В., Левашова Т. В., Петров М. В. Базовый сценарий поддержки принятия решений на основе моделей жизни пользователей в цифровой среде. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 4, с. 47–60. doi:10.31799/1684-8853-2021-4-47-60

UDC 621.39

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25

EDN: ABOZFA

Optimization of the functioning profile of a complex technical systemA. D. Sinuk^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-0608-4359O. M. Lepeshkin^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0362-0446V. A. Filimonov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0006-2297-9338O. A. Ostroumov^a, PhD, Tech., orcid.org/0000-0003-1674-6248, oleg-26stav@mail.ru^aS. M. Budenny Military Academy of Communication, 3, Tikhoretskii Pr., 190064, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Under the conditions of limited resources of a system, there is a need to use them as efficiently as possible. When designing and building a system, its structural optimization is used, in which it can be redundant in terms of the functions and tasks performed. This is inefficient and requires a lot of resources. **Purpose:** To develop an algorithm for optimizing the use of resources and fulfilling the profile of the functioning of a complex technical system to ensure the fulfillment of its intended purpose. **Results:** We develop a new algorithm for optimizing the use of resources and fulfilling the functioning profile of a complex technical system, based on the need for the system to perform its functions and tasks. This will allow one to obtain optimal scenarios for the performance of the function and task of the system anytime, regardless of the influence of destabilizing factors and changing conditions, and to ensure the functional stability of the system in a timely manner. We propose to search for a set of options allowing to use resources to perform each task of the system and then to choose the optimal scenario for it from this set. The choice is made on the basis of an assessment of the total efficiency of resource use for each task. We present the results of using the algorithm to select the optimal scenario for the execution of a limited set of system tasks, the results being based on the formation of a set of matrices for optimal task performance and performance matrices for the intended purpose of the system. **Practical relevance:** The results of the study can be used in the design and construction of management, control, decision support systems for calculating and choosing the most effective option for performing tasks, functions, and intended purpose of a system.

Keywords – optimization, functional stability, reliability, criticality of system elements, system criticality, communication system, control system, complex technical system, system functioning profile, system functioning regulation, functioning efficiency, system state, task execution script.

For citation: Sinuk A. D., Lepeshkin O. M., Filimonov V. A., Ostroumov O. A. Optimization of the functioning profile of a complex technical system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 12–25 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-12-25, EDN: ABOZFA

References

- Ostroumov O. A. The problem of ensuring the functional stability of systems of critically important objects. *Elektrosvyaz*, 2022, no. 1, pp. 14–18 (In Russian). doi:10.34832/ELSV.2022.26.1.005
- Burlov V., Lepeshkin O., Lepeshkin M. Parameters of the synthesized model of management of technosphere safety in the region. *E3S Web of Conferences, Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019)*, 2020, vol. 164, pp. 7–11. doi:10.1051/e3sconf/202016407011
- Burlov V., Uzun O., Grachev M., Faustov S., Sipovich D. *Web-based Power Management and Use Model*. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258 AISC, pp. 629–641. doi:10.1007/978-3-030-57450-5_54
- Borodaki Yu. V., Tarasov A. A. On the functional stability of information and computing systems. *Izvestiya Taganrogsogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 62, no. 7, pp. 5–12 (In Russian).
- Sinyuk A. D., Satdinov A. I., Kondrashov Yu. V., Ostroumov O. A. Communication system functions control conceptual model for detecting conflict situations. *T-Comm*, 2022, vol. 16, no. 5, pp. 21–27 (In Russian). doi:10.36724/2072-8735-2022-16-5-21-27
- Petrenko S. A. The concept of maintaining the cyber systems operability in conditions of information and technical influences. *Proc. of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 41, pp. 175–193 (In Russian).
- Lauta O. S., Balenko E. G., Fedorov V. Kh., Lepeshkin O. M., Ostroumov O. A. Method for constructing a profile of the functioning of a complex technical system. *Engineering Journal of Don*, 2023, no. 2. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2023/8183 (accessed 10 May 2023) (In Russian).
- El-Mowafy A. On detection of observation faults in the observation and position domains for positioning of intelligent transport systems. *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93(4). doi:10.1007/s00190-019-01306-1
- ChauPattnaik S., Ray M., Nayak M. Component based reliability prediction. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2021, vol. 12, pp. 391–406. doi.org/10.1007/s13198-021-01079-x
- Si S., Zhao J., Cai Z., Dui H. Recent advances in system reliability optimization driven by importance measures. *Frontiers of Engineering Management*, 2020, vol. 7(1), pp. 335–358. doi:10.1007/s42524-020-0112-6
- Debnath S., Arif W., Roy S., Baishya S., Sen D. A comprehensive survey of emergency communication network and management. *Wireless Personal Communications*, 2022, vol. 124, pp. 1375–1421. doi:10.1007/s11277-021-09411-1
- Kabadurmus O., Smith A. E. Evaluating reliability/survivability of capacitated wireless networks. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 26–40. doi:10.1109/TR.2017.2712667
- Brauner F., Claßen M., Fiedrich F. *Competence as Enabler of Urban Critical Infrastructure Resilience Assessment*. In: *Urban Disaster Resilience and Security*. A. Fekete, F. Fiedrich (eds). The Urban Book Series Springer, Cham., 2018, pp. 171–184. doi:10.1007/978-3-319-68606-6_11
- Savischenko N. V., Ostroumov O. A. Calculation of optimal and reasonable number of diversity branches in communication channels with additive white Gaussian noise and common Rice – Nakagami fading. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 71–80 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.71
- Pashintsev V. P., Chipigs A. F., Koval S. A., Skorik A. D. Analytical method for determining the interval of spatial correlation of fading in single-beam decimeter radio line. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 89–104. doi:10.1615/TELECOMRADENG.2021038432
- Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyah prednamerennykh destabilizirujushchih vozdeystvij i vedenija razvedki* [Models of communication systems in conditions of deliberate destabilizing impacts and intelligence]. Saint-Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2020. 337 p. (In Russian).
- Haque M. A., Shetty S., Krishnappa B. ICS-CRAT: A cyber resilience assessment tool for industrial control systems. *2019 IEEE 5th Intl Conf. on Big Data Security on Cloud (Big Data Security), IEEE Intl Conf. on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conf. on Intelligent Data and Security (IDS)*, Washington, DC, USA, 2019, pp. 273–281. doi:10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS.2019.00058
- Haque M. A., De Teyou G. K., Shetty S., Krishnappa B. Cyber resilience framework for industrial control systems: concepts, metrics, and insights. *2018 IEEE Intern. Conf. on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, Miami, FL, USA, 2018, pp. 25–30. doi:10.1109/ISI.2018.8587398
- Kotenko I., Saenko I., Lauta O., Karpov M. Methodology for management of the protection system of smart power supply networks in the context of cyberattacks. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18. doi:10.3390/en14185963
- Kete N., Punzo G., Linkov I. Enhancing resilience within and between critical infrastructure systems. *Environment Systems and Decisions*, 2018, vol. 38, pp. 275–277. doi:10.1007/s10669-018-9706-5
- Zhu Q. *Multilayer Cyber-Physical Security and Resilience for Smart Grid*. In: *Smart Grid Control. Power Electronics and Power Systems*. J. Stoustrup, A. Annaswamy, A. Chakraborty, Z. Qu (eds). Springer, Cham, 2019, pp. 225–239. doi:10.1007/978-3-319-98310-3_14
- Bassam Moussa, Parisa Akaber, Mourad Debbabi, Chadi Assi. Critical links identification for selective outages in interdependent power-communication networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 472–483.
- Shaikh A., Gupta P. Real-time intrusion detection based on residual learning through ResNet algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022. doi:10.1007/s13198-021-01558-1
- Afonin I. E., Petrov S. V., Makarenko S. I. Transition to the adaptive network structure of the aerospace defense control system as one of the main ways to increase its stability. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*, 2021, no. 19, pp. 159–178. doi:10.24412/2500-4352-2021-19-159-178. Available at: <https://vva.mil.ru/upload/site21/B7st1fUZlu.pdf> (accessed 10 May 2023) (In Russian).
- Hatim Q., Saldana Ch., Shao G., Kim D. B., Morris Kc., Witherell P., Rachuri S., Kumara S. A decision support methodology for integrated machining process and operation plans for sustainability and productivity assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, pp. 3207–3230. doi:10.1007/s00170-019-04268-y
- Kumari J., Karim R., Thaduri A., Pierre D. A framework for now-casting and forecasting in augmented asset management. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2022, vol. 13, pp. 2640–2655. doi:10.1007/s13198-022-01721-2
- Hammad A. W. A., Haddad A. *Infrastructure Resilience: Assessment, Challenges and Insights*. In: *Industry, Innovation and Infrastructure. Series: Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. W. L. Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. L. Salvia, T. Wall (eds). Springer, Cham, 2021, pp. 1–13. doi:10.1007/978-3-319-71059-4_25-1
- Sinjuk A. D., Ostroumov O. A. Theorem about key capacity of a communication network. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 79–87. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-79-87
- Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Gomazov F. A. The control model of safety management systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 8th Intern. Scientific Conf. "TechSys 2019" – Engineering, Technologies and Systems*, 2019, vol. 618, pp. 12–88. doi:10.1088/1757-899X/618/1/012088
- Yusupov R. M., Musaev A. A. Efficiency of information systems and technologies: Features of estimation. *SPIIRAS Proc.*, 2017, vol. 2, no. 51, pp. 5–34 (In Russian). doi:10.15622/sp.51.1
- Arseniev V. N., Khomonenko A. D., Yadrenkin A. A. Weighed ranking of aprioristic and experimental data in control system functioning efficiency estimation problem with Pascal-distributed number of tests. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 39–47 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-39-47
- Belyakov M. I. The information security system functioning process model of a critical information infrastructure object in the assessment of its effectiveness. *Military Enginry. Iss. 16: Counter-terrorism Technical Devices*, 2020, no. 11–12 (149–150), pp. 37–40 (In Russian).

33. Sukhov A. M. Evaluating the effectiveness of the information security system process based on the theory of stochastic indicators. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 3, pp. 31–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-3-31-44
34. Sukhov A. M., Krupenin A. V., Yakunin V. I. The analysis and synthesis methods of research of the operation processes efficiency of the computer attacks detection, prevention and consequences elimination system. *Automation of Control Processes*, 2021, no. 4 (66), pp. 4–14 (In Russian).
35. Smirnov A. V., Levashova T. V., Petrov M. V. Scenario model of intelligent decision support based on user's digital life models. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 4, pp. 47–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-4-47-60
-
-

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.



Принятие решения о наиболее опасном техногенном объекте космическим аппаратом мониторинга околоземного космического пространства

В. Н. Арсеньев^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-6424-5320, vladar56@mail.ru

А. А. Ядренкин^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-2089-7460

Е. В. Слатова^а, соискатель ученой степени канд. техн. наук, orcid.org/0009-0004-1177-1932

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Введение: для предотвращения столкновений техногенных объектов с функционирующими в верхних слоях атмосферы Земли космическими аппаратами проводится непрерывное наблюдение за этими объектами с использованием наземных средств. Однако их применение не позволяет предотвратить столкновения с космическим мусором. **Цель:** формирование решающего правила для выбора наиболее опасного объекта из множества наблюдаемых, обеспечивающего максимум апостериорной вероятности. **Результаты:** предложен метод выбора специализированным космическим аппаратом наиболее опасного техногенного объекта из множества наблюдаемых по результатам измерений их частных неоднородных признаков. Состав и количество измерений частных признаков для различных наблюдаемых объектов могут отличаться. В основе предложенного решающего правила лежит комплексное использование не только фактических значений частных признаков наблюдаемых объектов, полученных по результатам измерений, но и расчетных вероятностей гипотез о наиболее опасном объекте. Такой подход позволяет принять решение, обеспечивающее максимум апостериорной вероятности. Работоспособность метода продемонстрирована на примере. **Практическая значимость:** возможность принятия решения по различным совокупностям и количествам измерений частных признаков наблюдаемых объектов, а также простота решающего правила позволяют на борту специализированного космического аппарата мониторинга околоземного космического пространства оперативно определять наиболее опасный техногенный объект.

Ключевые слова — техногенные космические объекты, специализированный космический аппарат, наблюдение, частные признаки, комбинированный признак, решающее правило.

Для цитирования: Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А., Слатова Е. В. Принятие решения о наиболее опасном техногенном объекте космическим аппаратом мониторинга околоземного космического пространства. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 26–34. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34, EDN: BHIXTF

For citation: Arseniev V. N., Yadrenkin A. A., Slatova E. V. Making a decision on the most dangerous man-made object by a spacecraft for monitoring near-Earth space. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 26–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34, EDN: BHIXTF

Введение

Для функционирующих в околоземном космическом пространстве космических аппаратов (КА) серьезную опасность представляет скопившийся там в большом количестве космический мусор, имеющий искусственное происхождение (отработавшие элементы средств выведения, разгонные блоки, неиспользуемые космические аппараты, фрагменты, образовавшиеся в результате их столкновений, и т. д.) [1, 2]. Для предотвращения столкновений техногенных объектов с функционирующими КА используются наземные средства, осуществляющие непрерывное наблюдение за обстановкой в верхних слоях атмосферы [3, 4]. В настоящее время рассматривается программа построения системы обзора на базе космических аппаратов (КАСО) [5], оснащенных специальной аппаратурой [6]. По результатам наблюдения за космическими объектами (КО) формируется единый классификатор опасных ситуаций, которые могут возникнуть в верхних

слоях атмосферы [7]. Он позволяет определить характерные признаки космических объектов, представляющих опасность для функционирующих КА [8]. Эти признаки содержат координатную и некоординатную информацию о геометрической форме, размерах КО, спектральных и энергетических характеристиках излучаемых или отраженных ими сигналов, параметрах движения и т. д. и имеют различную физическую природу [9]. В зависимости от расстояния и ракурса наблюдения для одних КО удаётся определить одну совокупность признаков, для других — другую, количество измерений одних и тех же признаков для различных объектов также может отличаться.

Каждый КАСО ведет наблюдение за обстановкой в заданной области космического пространства, в которой находится функционирующий КА. В этой области, как правило, находятся другие космические объекты, представляющие угрозу КА. По результатам измерений призна-

ков, характеризующих наблюдаемые объекты, КАСО должен принять решение о наиболее опасном техногенном объекте [10]. При этом полагается, что частные признаки, характеризующие наиболее опасный техногенный объект (НОО), известны.

В настоящее время разработаны различные подходы к решению этой задачи. Большинство из них базируется на использовании обобщенного (по Колмогорову) расстояния и его частных случаев [11]. Имеются и другие методы, отличающиеся совокупностями используемых частных признаков и правилами принятия решения о НОО. Они достаточно подробно представлены в статье [12]. Отметим лишь некоторые их особенности. В качестве частных признаков, характеризующих наблюдаемые КО, в работах [13, 14] предлагается использовать их конструктивные особенности. В статье [9] используются координатные признаки КО. Автор статьи [15] предлагает для принятия решения использовать геометрические признаки наблюдаемых объектов. В статье [16] показано, что для получения координатной информации о параметрах движения техногенных объектов целесообразно использовать специальные группировки малых КА, оснащенных оптико-электронными датчиками. Для распознавания КО в работе [17] предлагается использовать орбитальные и наземные средства, включающие КА, оснащенные датчиками звезд. Авторы статьи [18] для решения задачи классификации комплексируют данные о параметрах траектории движения объекта и поляризационную информацию. В докладе [19] для различимости объектов используются цифровые телевизионные системы наблюдения. В качестве признака, характеризующего наблюдаемые объекты, используется отношение сигнал/шум. В работе [20] для принятия решения анализируется изменение во времени параметров эффективной поверхности рассеяния КО. В работах [21, 22] для распознавания объектов используется некоординатная информация в виде параметров и характеристик радиолокационных изображений объектов. Авторы статьи [23] для распознавания объектов предлагают проводить совместную обработку информации, полученной по их разносектральным изображениям. Для селекции КО в работе [10] используется критерий отношения правдоподобия, учитывающий как координатные, так и некоординатные признаки объектов и позволяющий комплексировать ограниченную разнородную информацию. В статьях [12, 24] для выбора заданного КО из множества наблюдаемых предлагается использовать комбинированные признаки в виде линейной свертки частных признаков, характеризующих наблюдаемые объекты.

Следует отметить, что применение подходов к решению задачи выбора, предложенных в ра-

ботах [15, 19–22], предполагает использование только одного типа информации (координатной или некоординатной). Для принятия решения методами, изложенными в работах [10, 13, 14, 17, 18, 23], необходим достаточно большой объем измерительной и (или) априорной информации о наблюдаемых объектах, а также время для накопления и обработки данных. Применение методов, предложенных в работах [9, 16, 17], в настоящее время ограничено в связи с отсутствием необходимых для их реализации космических средств. Одним из требований метода принятия решения о НОО, рассмотренного в работе [24], является наличие одинаковых объемов измерительной информации о частных признаках всех наблюдаемых КО. На практике это требование не всегда можно удовлетворить. Решающее правило для принятия решения о наиболее опасном КО, предложенное в статье [12], основано на использовании относительных отклонений комбинированных признаков наблюдаемых объектов от комбинированных признаков НОО и не позволяет в полном объеме использовать априорную информацию о наблюдаемых объектах.

Постановка задачи выбора наиболее опасного техногенного объекта

Рассматривается КАСО, ведущий наблюдение за некоторой областью в верхних слоях атмосферы, в которой находится функционирующий КА и объекты техногенного происхождения.

Общее число объектов, за которыми наблюдает КАСО, равно R .

Частные признаки $X_i, i = \overline{1, n}$, характеризующие наблюдаемые объекты, являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону.

Полагается, что математические ожидания погрешностей измерений частных признаков равны нулю и известны дисперсии $D_{X_i}, i = \overline{1, n}$, погрешностей бортовых измерительных средств.

В области, наблюдаемой КАСО, находится НОО с известными значениями $x_{НООi}, i = \overline{1, n}$, частных признаков.

С помощью измерительных средств КАСО проведены измерения частных признаков, характеризующих все КО, попавшие в наблюдаемую область.

Частный признак $X_i^{(r)}$ с номером i , характеризующий наблюдаемый объект с номером r , был измерен $N_i^{(r)} \geq 0$ раз. Полученные значения частных признаков обозначаются $x_{ij}^{(r)}, r = \overline{1, R}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, N_i^{(r)}}$. Если для какого-то объекта не удалось измерить ни одного частного признака, то при принятии решения о

НОО он не рассматривается, поскольку в этом случае является ненаблюдаемым.

На основе имеющейся информации необходимо из множества КО, попавших в область наблюдения КАСО, выбрать объект, который по критерию максимума апостериорной вероятности представляет наибольшую опасность функционирующему в его окрестности КА.

Предлагается следующий порядок решения данной задачи.

1. По результатам измерений частных признаков рассчитываются безразмерные комбинированные признаки, характеризующие наблюдаемые объекты, по известной формуле [12]

$$w_r = \frac{w_{\text{НОО}}}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{\text{НОО}i}}{D_{X_i}} \sum_{j=1}^{N_i^{(r)}} x_{ij}^{(r)} \right), r = \overline{1, R}, \quad (1)$$

где $w_{\text{НОО}}$ – комбинированный признак НОО, значение которого выбирается из удобства представления данных при расчетах, поскольку оно не влияет на качество решения поставленной задачи [это видно из приведенной ниже формулы (3)].

Формула (1) для вычисления значения комбинированного признака получена на основе линейной свертки значений частных признаков, коэффициенты которой минимизируют дисперсию комбинированного признака при условии, что их сумма равна $w_{\text{НОО}}$.

2. Определяются дисперсии, характеризующие точность оценивания комбинированных признаков наблюдаемых объектов, путем применения операции вычисления дисперсии к правой части формулы (1) [12]:

$$D_{w_r} = D[w_r] = \frac{w_{\text{НОО}}^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}} \right)^2} \sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}} = \frac{w_{\text{НОО}}^2}{\sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{НОО}i}^2 N_i^{(r)}}{D_{X_i}}}, r = \overline{1, R}. \quad (2)$$

3. Рассматриваются гипотезы H_r , состоящие в предположении, что r -й наблюдаемый объект является наиболее опасным, $r = \overline{1, R}$.

4. На основе формулы, позволяющей найти вероятность P_{ij} того, что i -й наблюдаемый объект ближе к НОО, чем j -й:

$$P_{ij} = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{D_{w_j}}{D_{w_i}}}, i, j = \overline{1, R}, i \neq j, \quad (3)$$

находятся расчетные вероятности $P(H_r)$ гипотез H_r , $r = \overline{1, R}$.

Формула (3) согласно работе [12] получена путем определения функции плотности распределения отношения $\frac{W_i - w_{\text{НОО}}}{W_j - w_{\text{НОО}}}$ и вычисления на ее основе вероятности

$$P_{ij} = P \left(\left| \frac{W_i - w_{\text{НОО}}}{W_j - w_{\text{НОО}}} \right| < 1 \right).$$

5. По полученным в п. 1 значениям w_r , $r = \overline{1, R}$, комбинированных признаков наблюдаемых объектов определяются условные вероятности $P(w_r/H_r)$, $r = \overline{1, R}$, характеризующие близость этих значений к комбинированному признаку $w_{\text{НОО}}$, при условии справедливости соответствующих гипотез H_r , $r = \overline{1, R}$.

6. Рассчитываются апостериорные вероятности гипотез $P(H_r/w_r)$, $r = \overline{1, R}$.

7. Наиболее опасным полагается КО, имеющий максимальное значение апостериорной вероятности.

Таким образом, для принятия решения о НОО необходимо найти расчетные вероятности $P(H_r)$ гипотез H_r и условные вероятности $P(w_r/H_r)$, характеризующие удаленность комбинированных признаков наблюдаемых объектов от комбинированного признака $w_{\text{НОО}}$.

Определение расчетных вероятностей гипотез H_r , $r = \overline{1, R}$

Полагается, что в области, наблюдаемой КАСО, находится техногенный объект, представляющий наибольшую опасность функционирующему КА. Тогда гипотезы H_r , $r = \overline{1, R}$, образуют полную группу несовместных событий и сумма их вероятностей $\sum_{r=1}^R P(H_r) = 1$.

Гипотеза H_r , состоящая в том, что r -й наблюдаемый объект является наиболее опасным, будет верна, если выполняются условия

$$P_{ri} > P_{ir}, i = \overline{1, R}, i \neq r, \quad (4)$$

где вероятности P_{ri} вычисляются по формуле (3) после подстановки в нее соответствующих дисперсий комбинированных признаков, полученных по формуле (2); $P_{ir} = 1 - P_{ri}$.

Вероятность одновременного выполнения этих условий в силу независимости измерений частных признаков и, как следствие, независимости комбинированных признаков

наблюдаемых объектов определяется по формуле

$$\prod_{i=1}^R P_{ri}, i \neq r. \quad (5)$$

При нарушении любого из условий в выражении (4) гипотеза H_r отвергается. Вероятность возникновения такой ситуации можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R P_{kr} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r \\ i \neq k}}^R P_{ri} &= P_{2r}P_{r3}P_{r4} \dots P_{rR} + \\ &+ P_{r2}P_{3r}P_{r4} \dots P_{rR} + P_{r2}P_{r3}P_{4r} \dots P_{rR} + \dots + \\ &+ P_{r2}P_{r3}P_{r4} \dots P_{Rr}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что вероятности альтернативных событий, когда рассматриваемая гипотеза отвергается, определяются следующим образом:

– вероятность отвергнуть гипотезу H_1 ($r = 1$)

$$P_{21}P_{13}P_{14} \dots P_{1R} + P_{12}P_{31}P_{14} \dots P_{1R} + P_{12}P_{13}P_{41}P_{15} \dots P_{1R} + \dots + P_{12}P_{13}P_{14} \dots P_{1(R-1)}P_{R1};$$

– вероятность отвергнуть гипотезу H_2 ($r = 2$)

$$P_{12}P_{23}P_{24} \dots P_{2R} + P_{21}P_{32}P_{24} \dots P_{2R} + P_{21}P_{23}P_{42}P_{25} \dots P_{2R} + \dots + P_{21}P_{23}P_{24} \dots P_{2(R-1)}P_{R2};$$

.....
– вероятность отвергнуть гипотезу H_R ($r = R$)

$$P_{1R}P_{R2}P_{R3} \dots P_{R(R-1)} + P_{R1}P_{2R}P_{R3} \dots P_{R(R-1)} + P_{R1}P_{R2}P_{3R}P_{4R} \dots P_{R(R-1)} + \dots + P_{R1}P_{R2}P_{R3} \dots P_{(R-1)R}.$$

Тогда вероятность гипотезы H_r (события, состоящего в том, что r -й наблюдаемый объект является наиболее опасным) будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} P(H_r) &= \frac{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^R P_{ri}}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^R P_{ri} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R P_{kr} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r \\ i \neq k}}^R P_{ri}} = \\ &= \frac{1}{1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R P_{kr} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r \\ i \neq k}}^R P_{ri}} \bigg/ \frac{1}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^R P_{ri}} = \frac{1}{1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{P_{kr}}{P_{rk}}}. \end{aligned}$$

Поскольку второе слагаемое, стоящее в знаменателе последнего выражения:

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{P_{kr}}{P_{rk}} &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1 - P_{rk}}{P_{rk}} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \left(\frac{1}{P_{rk}} - 1 \right) = \\ &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1}{P_{rk}} - (R - 1) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1}{P_{rk}} - R + 1, \end{aligned}$$

то окончательно получается достаточно простая формула для расчета вероятности того, что r -й космический объект является наиболее опасным для функционирующего КА:

$$P(H_r) = \frac{1}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R \frac{1}{P_{rk}} - R + 2}. \quad (6)$$

Данная формула позволяет рассчитать вероятности гипотез для каждого наблюдаемого КО только по информации о том, какие его частные признаки удалось измерить, количествах измерений отдельных признаков и дисперсиях погрешностей задействованных измерительных средств. Поскольку сами измеренные значения частных признаков не используются, то полученные вероятности называются расчетными.

Очевидно, что если состав измеренных частных признаков и количества их измерений для всех наблюдаемых объектов одинаковые ($N_i^{(r)} = N_i, i = 1, n, r = 1, R$), то из формулы (6) следует

$$P(H_r) = \frac{1}{R}, r = \overline{1, R},$$

поскольку в этом случае согласно формулам (2) и (3) $D_{W_1} = D_{W_2} = \dots = D_{W_R}, P_{kj} = P_{jk} = 0,5, k = 1, R, j = 1, R, k \neq j$, и все гипотезы $H_r, r = \overline{1, R}$, равновероятны.

Расчетные вероятности позволяют предположить, какой из наблюдаемых объектов является наиболее опасным.

Для принятия решения, как было сказано выше, параллельно с расчетными вероятностями необходимо использовать значения $w_r, r = 1, R$, комбинированных признаков, полученные по результатам измерений частных признаков наблюдаемых объектов по формуле (1).

Правило принятия решения о наиболее опасном космическом объекте

Для каждого наблюдаемого специализированым КА объекта рассматриваются два события.

Первое событие – гипотеза H_r , о том, что r -й объект является наиболее опасным. Расчетная вероятность этого события определяется по формуле (6). Второе событие связано с полученным по результатам измерений значением w_r комбинированного признака r -го объекта. При этом могут иметь место два случая: $w_r > w_{\text{НОО}}$ и $w_r < w_{\text{НОО}}$. Если $w_r > w_{\text{НОО}}$, то второе событие состоит в том, что случайное значение (оно обозначается буквой W_r) комбинированного признака $W_r > w_r$. Если $w_r < w_{\text{НОО}}$, то второе событие эквивалентно событию $W_r < w_r$. Вероятность второго события при условии, что справедлива гипотеза H_r , имеет вид

$$P(w_r / H_r) = \begin{cases} P(W_r > w_r), & \text{если } w_r > w_{\text{НОО}}; \\ P(W_r < w_r), & \text{если } w_r < w_{\text{НОО}}, \quad r = \overline{1, R}. \end{cases}$$

Поскольку закон распределения комплексного признака r -го наблюдаемого объекта нормальный с функцией плотности распределения вероятностей

$$\varphi_{W_r}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_r}}} e^{-\frac{(w-w_{\text{НОО}})^2}{2D_{W_r}}},$$

то

$$P(w_r / H_r) = \begin{cases} \int_{w_r}^{\infty} \varphi_{W_r}(w) dw, & \text{если } w_r > w_{\text{НОО}}; \\ \int_{-\infty}^{w_r} \varphi_{W_r}(w) dw, & \text{если } w_r < w_{\text{НОО}} \end{cases}$$

или

$$P(w_r / H_r) = 0,5 - \int_{w_{\text{НОО}}}^{w_{\text{НОО}} + \Delta w_r} \varphi_{W_r}(w) dw,$$

где $\Delta w_r = |w_r - w_{\text{НОО}}|$.

После введения новой переменной $y = w_r - w_{\text{НОО}}$ получается

$$P(w_r / H_r) = 0,5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_r}}} \int_0^{\Delta w_r} e^{-\frac{y^2}{2D_{W_r}}} dy, \quad r = \overline{1, R}. \quad (7)$$

Отсюда видно, что, чем меньше отличие комбинированного признака w_r r -го наблюдаемого объекта от комбинированного признака $w_{\text{НОО}}$, т. е. чем меньше величина Δw_r , тем больше условная вероятность $P(w_r / H_r)$. Максимальное значение 0,5 условной вероятности $P(w_r / H_r)$ достигается при $w_r = w_{\text{НОО}}$.

В качестве меры, характеризующей близость r -го наблюдаемого объекта к наиболее опасному КО, можно использовать вероятность одновременного наступления двух событий: гипотезы H_r и события $W_r > w_r$ или $W_r < w_r$ – в зависимости от того, какому условию, $w_r > w_{\text{НОО}}$ или $w_r < w_{\text{НОО}}$, удовлетворяет полученный по результатам измерений комбинированный признак. Вероятность произведения этих двух событий

$$P(H_r, w_r) = P(H_r)P(w_r / H_r), \quad r = \overline{1, R}.$$

Можно заметить, что данная вероятностная мера учитывает как расчетные вероятности $P(H_r)$ гипотез H_r , так и условные вероятности $P(w_r / H_r)$, полученные по результатам реальных измерений и характеризующие близость наблюдаемых объектов к НОО.

Поскольку гипотезы H_r , $r = \overline{1, R}$, образуют полную группу несовместных событий, то для принятия решения о наиболее опасном объекте целесообразно использовать апостериорные вероятности этих гипотез. Они могут быть определены по формуле Байеса, которая с учетом введенных выше обозначений принимает вид [25]

$$P(H_r / w_r) = \frac{P(H_r, w_r)}{\sum_{i=1}^R P(H_i, w_r)} = \frac{P(H_r)P(w_r / H_r)}{\sum_{i=1}^R P(H_i)P(w_i / H_i)}, \quad r = \overline{1, R}. \quad (8)$$

Тогда наиболее опасным объектом в наблюдаемой КАСО области околоземного космического пространства считается техногенный объект, имеющий максимальное значение апостериорной вероятности (8). Иными словами, наблюдаемый объект с номером s считается наиболее опасным, если

$$P(H_s / w_s) = \max \{ P(H_r / w_r), \quad r = \overline{1, R} \}.$$

Для подтверждения работоспособности предложенного подхода к решению задачи выбора рассматривается демонстрационный пример, в котором в силу ограниченности информации исходные данные могут отличаться от реальных.

Пример

Гипотетический КАСО ведет наблюдение за некоторой областью в верхних слоях атмосферы. Он обнаружил четыре КО. Известно, что среди них есть объект, угрожающий нормальному

функционированию находящегося в его окрестности КА. Каждый наблюдаемый КАСО объект характеризуется шестью частными признаками. Известны значения частных признаков НОО: $x_{НОО1} = 100$, $x_{НОО2} = 40$, $x_{НОО3} = 25$, $x_{НОО4} = 18$, $x_{НОО5} = 10$, $x_{НОО6} = 3$.

Точность бортовых измерительных средств, используемых для измерений значений частных признаков, характеризуется дисперсиями погрешностей этих средств: $D_{X_1} = 3$, $D_{X_2} = 1,3$, $D_{X_3} = 0,8$, $D_{X_4} = 0,6$, $D_{X_5} = 0,3$, $D_{X_6} = 0,1$.

В процессе наблюдения за КО была получена следующая измерительная информация.

Для первого объекта получены одно ($N_1^{(1)} = 1$) значение $x_{11}^{(1)} = 102,65$ 1-го признака, два ($N_2^{(1)} = 2$) значения $x_{21}^{(1)} = 39,02$, $x_{22}^{(1)} = 39,34$ 2-го признака, одно ($N_3^{(1)} = 1$) значение $x_{31}^{(1)} = 24,27$ 3-го признака, одно ($N_4^{(1)} = 1$) значение $x_{41}^{(1)} = 17,65$ 4-го признака, одно ($N_5^{(1)} = 1$) значение $x_{51}^{(1)} = 9,54$ 5-го признака и одно ($N_6^{(1)} = 1$) значение $x_{61}^{(1)} = 3,43$ 6-го признака.

Для второго объекта получены одно ($N_1^{(2)} = 1$) значение $x_{11}^{(2)} = 98,94$ 1-го признака, одно ($N_2^{(2)} = 1$) значение $x_{21}^{(2)} = 41,81$ 2-го признака, два ($N_3^{(2)} = 2$) значения $x_{31}^{(2)} = 26,00$, $x_{32}^{(2)} = 23,83$ 3-го признака и одно ($N_4^{(2)} = 1$) значение $x_{41}^{(2)} = 18,69$ 4-го признака. Пятый и шестой признаки измерить не удалось ($N_5^{(2)} = 0$, $N_6^{(2)} = 0$).

Для третьего объекта получены одно ($N_1^{(3)} = 1$) значение $x_{11}^{(3)} = 99,74$ 1-го признака, одно ($N_2^{(3)} = 1$) значение $x_{21}^{(3)} = 40,06$ 2-го признака, одно ($N_3^{(3)} = 1$) значение $x_{31}^{(3)} = 25,07$ 3-го признака и одно ($N_4^{(3)} = 1$) значение $x_{41}^{(3)} = 16,72$ 4-го признака. Остальные признаки измерить не удалось ($N_5^{(3)} = 0$, $N_6^{(3)} = 0$).

Для четвертого объекта получены одно ($N_1^{(4)} = 1$) значение $x_{11}^{(4)} = 99,16$ 1-го признака, одно ($N_2^{(4)} = 1$) значение $x_{21}^{(4)} = 39,59$ 2-го признака и одно ($N_4^{(4)} = 1$) значение $x_{41}^{(4)} = 18,31$ 4-го признака. Третий, пятый и шестой признаки измерить не удалось ($N_3^{(4)} = 0$, $N_5^{(4)} = 0$, $N_6^{(4)} = 0$).

По этим данным КАСО должен принять решение о НОО.

Положив в формулах (1) и (2) $w_{НОО} = 10$, найдем комбинированные признаки и их дисперсии для всех наблюдаемых объектов:

$$\begin{aligned} w_1 &= 10,0028, w_2 = 10,0541, w_3 = 9,9268, \\ w_4 &= 9,9385; \\ D_{W_1} &= 0,0133, D_{W_2} = 0,0150, D_{W_3} = 0,0170, \\ D_{W_4} &= 0,0196. \end{aligned}$$

По полученным дисперсиям на основе формул (3) и (6) определяются расчетные вероятности гипотез H_r , $r = 1, R$, о том, что соответству-

ющий наблюдаемый объект является наиболее опасным:

$$\begin{aligned} P(H_1) &= 0,2810; P(H_2) = 0,2598; \\ P(H_3) &= 0,2400; P(H_4) = 0,2192. \end{aligned}$$

Подстановка значений комбинированных признаков и их дисперсий в формулу (7) позволяет получить условные вероятности

$$\begin{aligned} P(w_1/H_1) &= 0,3388; P(w_2/H_2) = 0,4359; \\ P(w_3/H_3) &= 0,0432; P(w_4/H_4) = 0,4791. \end{aligned}$$

Апостериорные вероятности гипотез H_r определяются по формуле (8) после подстановки в нее значений расчетных вероятностей $P(H_r)$ и условных вероятностей $P(w_r/H_r)$:

$$\begin{aligned} P(H_1/w_1) &= 0,2940; P(H_2/w_2) = 0,3497; \\ P(H_3/w_3) &= 0,0320; P(H_4/w_4) = 0,3243. \end{aligned}$$

Из полученных результатов видно, что при принятии решения только на основе расчетных вероятностей гипотез наиболее опасным объектом следует считать первый объект, поскольку $P(H_1) = \max\{P(H_r), r = 1, R\}$. При использовании только условных вероятностей — четвертый объект, для которого $P(w_4/H_4) = \max\{P(w_r/H_r), r = 1, R\}$. Если решение принимается по критерию максимума апостериорной вероятности, учитывающему как расчетную, так и условную вероятность, то наибольшую опасность для КА, функционирующего в наблюдаемой КАСО области космического пространства, представляет второй объект, поскольку $P(H_2/w_2) = \max\{P(H_r/w_r), r = 1, R\}$.

Многочисленное применение предложенного решающего правила для исходных данных рассматриваемого примера показало, что наиболее опасным объектом в 35 % случаев является 1-й объект, в 28 % — 2-й объект, в 22 % — 3-й объект и в 15 % случаев — 4-й объект.

Заключение

Предложено решающее правило для выбора наиболее опасного техногенного объекта из множества наблюдаемых специализированным КА по результатам измерений их частных признаков. Состав и количества измерений частных признаков для различных наблюдаемых объектов могут отличаться. Решение принимается на основе комплексного использования расчетных вероятностей гипотез о наиболее опасном объекте и условных вероятностей, характеризующих отличия комбинированных признаков наблюдаемых объектов, полученных по результатам

измерений, от соответствующего признака наиболее опасного объекта. Такой подход позволяет принять решение, обеспечивающее максимум апостериорной вероятности.

Работоспособность метода продемонстрирована на примере.

Возможность принятия решения по различным совокупностям и количествам измерений

частных признаков наблюдаемых объектов, а также простота решающего правила позволяющая на борту специализированного КА оперативно определять наиболее опасный техногенный объект и предотвращать его столкновение с функционирующим КА.

Литература

1. Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S. Challenging aspects in evaluation the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights. *Advances and Astrophysics*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 83–90. <https://dx.doi.org/10.22606/adap.2018.32003>
2. Zarcone G., Mariani L., Bucciarelli M., Hosseim S. H., Curiano F., Celesti P., Palo L. D. Image processing for geo detection *Proc. of 3rd Intern. Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, June 11–13, 2021, Turkey, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/HORA52670.2021.9461359
3. Шустов Б. М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз. *Вестник Российской академии наук*, 2019, т. 89, № 8, с. 777–799. doi:<http://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000>
4. Зберя В. А. Канада и США: у истоков военно-политического сотрудничества. *Россия и Америка в XXI веке*, 2020, вып. № 4, 15 с. doi:10.18254/S207054760013330-0. <https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1/> (дата обращения: 05.08.2021).
5. Menshikov V. A., Perminov A. N., Urlichich Y. M. The Conception of the International Global Monitoring Aerospace System (IGMASS). In: *Global Aerospace Monitoring and Disaster Management*. Springer, Vienna, 2012, pp. 233–261. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9_4
6. Журкин И. Г., Чабан Л. Н., Орлов П. Ю. Структурно-топологический алгоритм идентификации звезд и обнаружения объектов околоземного космического пространства. *Компьютерная оптика*, 2020, т. 44, № 3, с. 375–384. doi:10.18287/2412-6179-CO-597
7. Павлова Е. А., Стрельцов А. И., Еленин Л. В., Степаньянц В. А., Захваткин М. В. Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве. *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*, 2020, № 23, 22 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-23>. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id = 2020-23> (дата обращения: 05.08.2021).
8. Ключников В. Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора? *Воздушно-космическая сфера*, 2019, № 1(98), с. 96–107. doi:10.30981/2587-7992-2019-98-1-96-107
9. Кириченко Д. В., Багров А. В. Оперативное выявление космогенных угроз с помощью орбитальных средств контроля космического пространства. *Радиопромышленность*, 2014, № 1, с. 174–184.
10. Арсеньев В. Н., Трофимов И. А. Решение задачи выбора в условиях физической неоднородности и ограниченности наблюдаемых признаков. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 4, с. 114–118. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.114
11. Амелькин С. А., Захаров А. В., Хачумов В. М. Обобщенное расстояние Евклида – Махаланобиса и его свойства. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2006, № 4, с. 40–44.
12. Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А. Выбор заданного космического объекта из множества наблюдаемых специализированным космическим аппаратом. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 2, с. 11–19. doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19
13. Немыкин О. И. Алгоритм селекции элементов запуска при наличии априорной информации о его составе и структуре. *Вопросы радиоэлектроники*, 2018, № 3, с. 114–119. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-114-119>
14. Немыкин О. И. Исследование информативности признаков селекции КА, формируемых по результатам обработки временных реализаций некоординатной информации. *Вопросы радиоэлектроники*, 2018, № 3, с. 90–98. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-90-98>
15. Волков В. Ю. Адаптивная многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного зондирования. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 3, с. 12–24. doi:10.31799/1684-8853-2020-3-12-24
16. Afanasev A. A., Biktimirov S. N. CubeSat formation architecture for small space debris surveillance and orbit determination. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 4, с. 37–46. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-4-37-46>
17. Spiller D., Facchinetti C., Ansalone L., Tuozzi A., Magionami E., Schiattarella V., Curti F. On-orbit recognition of resident space objects by using star trackers. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 177, pp. 478–496. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.009>
18. Смирнов Е. Е., Поздняков А. А., Паршин М. С. Модель классификации объектов наблюдения в условиях пересечения их траекторий движения на основе совместного анализа траекторной и поляризационной информации. *Информационно-измерительные и управляющие системы*,

2021, т. 19, № 4, с. 14–26. doi:10.18127/j20700814-202104-02

19. Гулятьев Ю. П., Ковальчук В. С., Попов В. В.

Пути повышения различимости объектов в цифровых телевизионных системах наблюдения. *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: тр. VIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.*, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2019 г. СПб., 2019, с. 126–130.

20. Куликов С. В., Епанешников Н. М., Лиференко В. Д., Алдохина В. Н.

Обнаружение факта нарушения космических объектов на орбите по некоординатной информации наблюдаемого потока. *Вопросы радиоэлектроники*, 2020, № 6, с. 17–24. doi:10.21778/2218-5453-2020-6-17-24

21. Aldokhina V. N., Kolesnik D. Y., Liferenko V. D., Legkov K. E.

Model of recognition of cosmic objects based on informative signs obtained by radar means. *Proc. Conf. "Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems" WECNF 2020*, Saint-Petersburg, 2020, p. 9131444. doi:10.1109/WECNF-48837.2020.9131444

22. Liferenko V. D., Legkov K. E., Kolesnik D. Y.

Method for recognizing the type of space object in airspace

based on the use of radar images. *Proc. Conf. "Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications" SYNCHROINFO 2020*, Svetlogorsk, 2020, p. 9166055. doi:10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166055

23. Лепешкин С. А., Мишуков О. А.

Особенности совместной обработки разноточных изображений в автоматизированных системах дистанционного зондирования распределенных объектов. *Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского*, 2018, № 664, с. 131–140.

24. Арсеньев В. Н., Ключкин А. К., Ядренкин А. А.

Метод выбора целевого объекта по ограниченными измерениями физически неоднородных признаков. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2021, т. 64, № 10, с. 799–805. doi:10.17586/0021-3454-2021-64-10-799-805

25. Гусева М. Е., Силаев А. М.

Использование байесовских методов для макроэкономического моделирования фаз бизнес-цикла. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 2021, т. 37, вып. 2, с. 298–317. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2021.205>

UDC 623.4.016

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34

EDN: BHIXTF

Making a decision on the most dangerous man-made object by a spacecraft for monitoring near-Earth space

V. N. Arseniev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-6424-5320, vladar56@mail.ru

A. A. Yadrenkin^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-2089-7460

E. V. Slatova^a, Applicant for the degree PhD, Tech., orcid.org/0009-0004-1177-1932

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: To prevent the collisions of man-made facilities with the Earth's atmosphere, the spacecraft which function in the upper layers are continuously monitored by these objects using ground tools. However, their use does not prevent collisions with space debris. **Purpose:** To form of a decision rule to select the most dangerous object from a set of the observed ones and provide the maximum posteriori probability. **Results:** A method is proposed for a specialized spacecraft to select the most dangerous man-made object from the set of observed objects on the basis of the measurement of their inhomogeneous features. The composition and number of measurements of particular features for various observed objects may differ. The proposed decision rule is based on the complex use of not only the actual values of particular features of the observed objects, obtained from the measurement results, but also on the information about the accuracy characteristics of the involved onboard measuring instruments. This approach ensures the choice of the most dangerous object according to the criterion of the maximum posteriori probability. The efficiency of the method is demonstrated by the example. **Practical relevance:** The possibility to make a decision on various sets and quantities of measurements of particular features of the observed objects, as well as the simplicity of the decision rule, allow us to quickly detect the most dangerous man-made object onboard a specialized spacecraft used for monitoring the near-Earth space.

Keywords — space debris, specialized spacecraft, the most dangerous space object, particular features, combined features, decision rule.

For citation: Arseniev V. N., Yadrenkin A. A., Slatova E. V. Making a decision on the most dangerous man-made object by a spacecraft for monitoring near-Earth space. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 26–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-26-34, EDN: BHIXTF

References

- Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S. Challenging aspects in evaluation the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights. *Advances and Astrophysics*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 83–90. <https://dx.doi.org/10.22606/adap.2018.32003>
- Zarcone G., Mariani L., Bucciarelli M., Hosseim S. H., Curiano F., Celesti P., Palo L. D. Image processing for geo detection. *Proc. of 3rd Intern. Congress on Human-Computer In-*

teraction, Optimization and Robotic Applications (HORA), June 11–13, 2021, Turkey, 2021, pp. 1–6. doi:10.1109/HORA52670.2021.9461359

- Shustov B. M. The role of science in the study and prevention of space hazards. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 8, pp. 777–799 (In Russian). doi:http://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000

4. Zberya V. A. Canada and the United States: at the origins of politico-military cooperation. *Russia and America in the 21st Century*, 2020, iss. 4, 15 p. (In Russian). doi:10.18254/S207054760013330-0. Available at: <https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1/> (accessed 5 August 2021).
5. Menshikov V. A., Perminov A. N., Urlichich Y. M. *The Conception of the International Global Monitoring Aerospace System (IGMASS)*. In: *Global Aerospace Monitoring and Disaster Management*. Springer, Vienna, 2012, pp. 233–261. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9_4
6. Zhurkin I. G., Chaban L. N., Orlov P. Yu. Structurally topological algorithm for star recognition and near-Earth space/object detecting. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 375–384 (In Russian). doi:10.18287/2412-6179-CO-597
7. Pavlova E. A., Streltsov A. I., Elenin L. V., Stepanyants V. A., Zakhvatkin M. V. Development of the common classification for hazardous events in the near-Earth space. *Keldysh Institute Preprints*, 2020, no. 23, 22 p. (In Russian). <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-23>. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id = 2020-23> (accessed 5 August 2021).
8. Kliushnikov V. Yu. How to clear space debris from near-Earth space? *Aerospace Sphere Journal*, 2019, no. 1(98), pp. 96–107 (In Russian). doi:10.30981/2587-7992-2019-98-1-96-107
9. Kirichenko D. V., Bagrov A. V. The rapid identification of the cosmogenic threats by space-based optical-electronic means. *Radio Industry (Russia)*, 2014, no. 1, pp. 174–184 (In Russian).
10. Arseniev V. N., Trofimov I. A. Solving the choice problem in the conditions of physical diversity and limited observable signs. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 4, pp. 114–118 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.114
11. Amelkin S. A., Zakharov A. V., Khachumov V. M. Generalized Euclidean – Mahalanobis distance and its properties. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2006, no. 4, pp. 40–44 (In Russian).
12. Arseniev V. N., Yadrenkin A. A. Selection of a given space object from the multitude observed by a specialized spacecraft. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 2, pp. 11–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-2-11-19
13. Nemykin J. I. Algorithm for the selection of launching elements in the presence of a priori information about its composition and structure. *Questions of Radio Electronics*, 2018, no. 3, pp. 114–119 (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-114-119>
14. Nemykin J. I. Investigation of the informativity of the signs of selection of the spacecraft, formed by the results of processing the temporary realizations of non-coordinate information. *Questions of Radio Electronics*, 2018, no. 3, pp. 90–98 (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-3-90-98>
15. Volkov V. Yu. Adaptive multi-threshold objects selection in remote sensing images. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 3, pp. 12–24 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-3-12-24
16. Afanasev A. A., Biktimirov S. N. CubeSat formation architecture for small space debris surveillance and orbit determination. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 4, pp. 37–46. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-4-37-46>
17. Spiller D., Facchinetti C., Ansalone L., Tuozzi A., Magionami E., Schiattarella V., Curti F. On-orbit recognition of resident space objects by using star trackers. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 177, pp. 478–496. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.009>
18. Smirnov E. E., Pozdniakov A. A., Parshin M. S. Model of classification of observation objects under conditions of intersection of their motion paths based on joint analysis of trajectory and polarization information. *Information-measuring and Control Systems*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 14–26 (In Russian). doi:10.18127/j20700814-202104-02
19. Gulyaev Yu., Koval'chuk V., Popov V. Ways to improve better visibility of objects in digital video surveillance systems. *Trudy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj i nauchno-metodicheskoy konferencii "Actual'nye problemy informatsionnykh telecommunicatsyi v nauke i obrazovanii"* [Proc. of the VIII Intern. Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conf. "Actual problems of information telecommunications in science and education"]. Saint-Petersburg, 2019, pp. 126–130 (In Russian).
20. Kulikov S. V., Epaneshnikov N. M., Liferenko V. D., Aldokhina V. N. Detection of the fact of destruction of space objects in orbit using non-coordinate information of the observed flow. *Questions of Radio Electronics*, 2020, no. 6, pp. 17–24 (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-6-17-24>
21. Aldokhina V. N., Kolesnik D. Y., Liferenko V. D., Legkov K. E. Model of recognition of cosmic objects based on informative signs obtained by radar means. *Proc. Conf. "Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems" WECONF 2020*, Saint-Petersburg, 2020, p. 9131444. doi:10.1109/WECONF-48837.2020.9131444
22. Liferenko V. D., Legkov K. E., Kolesnik D. Y. Method for recognizing the type of space object in airspace based on the use of radar images. *Proc. Conf. "Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications" SYNCHROINFO 2020*, Svetlogorsk, 2020, p. 9166055. doi:10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166055
23. Lepeshkin S. A., Mishukov O. A. Features of joint processing of multi-spectral images in automated remote sensing systems for distributed objects. *Proc. of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2018, no. 664, pp. 131–140 (In Russian).
24. Arseniev V. N., Klyuchkin A. K., Yadrenkin A. A. Method for target object selecting based on a limited number of measurements of physically dissimilar features. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 799–805 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2021-64-10-799-805
25. Guseva M. E., Silaev A. M. Use of Bayesian methods for macroeconomic modelling of business cycle phases. *St Petesburg University Journal of Economic Studies*, 2021, vol. 37, iss. 2, pp. 298–317 (In Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu05.2021.205>



Разработка аппаратного обеспечения и алгоритмов функционирования носимого сенсорного устройства для распознавания двигательной активности руки и жестов

К. Д. Крестовников^а, аспирант, младший научный сотрудник, orcid.org/0000-0001-6303-0344

А. А. Ерашов^а, аспирант, младший научный сотрудник, orcid.org/0000-0001-8003-3643

А. И. Савельев^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-1851-2699, saveliev@iias.spb.su

^аСанкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Введение: разработка человеко-машинных интерфейсов является активно развивающимся направлением, и в настоящее время включает в себя задачи по поиску и использованию технических решений, позволяющих реализовать более удобные и естественные для человека формы взаимодействия. Используя несколько модальностей в интерфейсе, можно повысить точность распознавания команд, формируемых человеком. **Цель:** разработать аппаратное обеспечение и алгоритмы работы носимого устройства для повышения скорости снятия данных о жестах и двигательной активности руки человека. **Результаты:** анализ современных решений показал, что применение системы технического зрения для распознавания жестов ограничено из-за условий освещенности, применение носимой электроники зачастую требует высокопроизводительного вычислителя, кроме того, на время обработки влияет цифровая фильтрация зашумленных сигналов. Разработана структура носимого устройства, в которой используется гироскоп-акселерометр и емкостные датчики, позволяющие определять различные жесты. Предлагаемое решение представляет собой устройство ввода и может найти применение в качестве указывающего устройства или устройства, непосредственно формирующего управляющие команды. Конфигурация устройства обеспечивает реализацию интерфейса с двумя модальностями, одной из которых являются движения руки человека, а второй – жесты, формируемые кистью. Получены характеристики сенсоров прототипа, а также рассмотрены интеграции разработанного решения для управления мобильным роботом и эмуляции компьютерной мыши. **Практическая значимость:** разработанное устройство может найти применение в управлении роботами, в области интернета вещей для управления устройствами киберфизических систем, а также в медицинских приложениях. **Обсуждение:** отличительной особенностью устройства является заложенный в основу емкостный принцип работы датчиков для распознавания жестов. Ввиду статического дрейфа выходных сигналов емкостных датчиков и изменения площади прилегания устройства к руке требуются дополнительные исследования для поиска метода, с помощью которого возможно с удовлетворительной точностью определять более двух жестов.

Ключевые слова – распознавание жестов, человеко-машинный интерфейс, емкостные датчики, Bluetooth Low Energy.

Для цитирования: Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Савельев А. И. Разработка аппаратного обеспечения и алгоритмов функционирования носимого сенсорного устройства для распознавания двигательной активности руки и жестов. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 35–46. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-35-46, EDN: BMHSAH

For citation: Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Saveliev A. I. Development of hardware and operation algorithms for the wearable sensor device designed for hand motor activity and gesture recognition. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 35–46 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-35-46, EDN: BMHSAH

Введение

Наиболее распространенными устройствами ввода компьютера являются клавиатура с мышью или сенсорный дисплей. Для управления беспилотными летательными аппаратами [1] или наземными мобильными платформами с дистанционным управлением [2] чаще всего применяются специализированные контроллеры или геймпады с интерфейсами, которые не являются естественными для человека. Первыми естественными интерфейсами, получившими активное развитие и имеющими достаточно высокую эффективность работы, стали речевые и

аудиовизуальные [3, 4]. Они являются удобными, поскольку не занимают рук пользователя и не требуют специальной подготовки. Однако подобные интерфейсы не позволяют управлять динамичными объектами, так как для ввода и обработки речевых команд необходимо относительно много времени. Также значительным ограничением является наличие акустического шума или недостаток освещенности для визуальной модальности.

Движения рук и жесты являются для человека существенной частью процесса коммуникации [5, 6], а для людей с ограниченными возможностями или при проблемах со слухом — порой и

единственными. Двигательную активность рук и жесты возможно распознавать с помощью систем технического зрения [7–9]. Однако идентификация положения пальцев и рук ограничена зоной обзора камеры. Данные решения больше ориентированы на использование информации о распознанных жестах в виртуальной реальности, а не на управление физическими объектами.

Использование носимых сенсорных устройств не ограничено определенной областью пространства. Устройства размещаются на предплечье или запястье, за счет сигналов набора датчиков осуществляется распознавание жестов. Базовый принцип работы этих датчиков является основным отличием между сенсорными устройствами.

Широкое распространение получил подход с обработкой электромиографических сигналов [10–13]. Однако качественная фильтрация сигналов может привести к существенным задержкам при управлении динамичными объектами. Кроме того, при расположении устройства на предплечье ближе к локтевому сгибу существуют ограничения на измерение параметров двигательной активности руки, так как ограничивается амплитуда перемещений устройства.

Существуют разработки, основанные на трибоэлектрическом и пьезоэлектрическом принципах работы. В работе [14] импульсные датчики устанавливаются в кольца, которые надеваются на пальцы руки. Недостатками являются большие габариты и значительное количество соединительных проводов, что снижает надежность устройства. Аналогичный принцип используют сенсоры, встроенные в перчатку [15].

Устройство, представленное в [16], содержит гибкие матрицы тензодатчиков, позволяющих измерять деформации. Авторы показали, что сигналы отличаются при выполнении жестов. В устройстве не предусмотрено иных модальностей, так как нет сенсоров, преобразующих другие физические параметры.

В [17] предложены датчики давления воздуха, совмещенные с воздушным пузырем. Датчики покрывают руку, как повязка, и позволяют определять угол поворота кисти. Авторы рассматривали разработку как альтернативу гироскопу-акселерометру. При наличии мышечной активности измеряемое давление будет изменяться. В этой работе также не рассмотрено комбинирование разных модальностей.

Устройство для распознавания жестов, описанное в [18], основано на применении радиочастотного датчика, включающего в себя одну или несколько антенн, передатчик и один приемник, соединенный с аналого-цифровым преобразователем (АЦП; Analog-to-digital converter – ADC). Принцип работы устройства заключается в обработке отраженных от тканей тела пользовате-

ля радиочастотных сигналов. Есть возможность комплексирования данных с измерениями гироскопа-акселерометра.

Также существуют разработки, основанные на применении сенсоров емкостного типа. Так, в [19] используются пластинчатые электроды, вшитые в перчатку в область фаланг пальцев и ладони. Для распознавания жестов использовались данные как о касании, так и о приближении.

Можно использовать гибкие электроды емкостных датчиков. Устройство из работы [20] предназначено для людей с ограниченными возможностями, размещается на ноге в сидячем положении человека, позволяет определять касание руки и ее приближение. В работах [21, 22] гибкие электроды предлагается располагать на запястье, при этом используется только одна модальность.

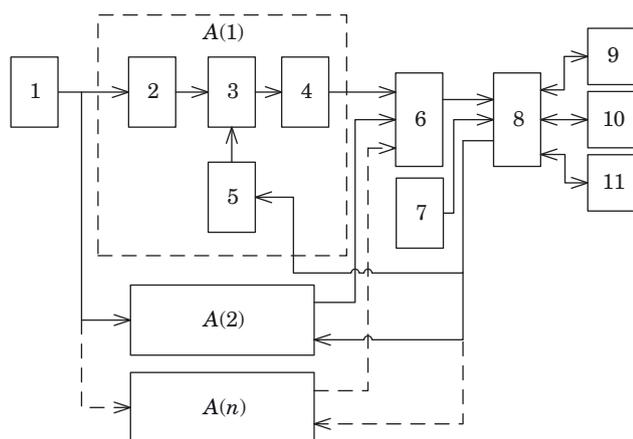
Семь гибких электродов емкостных датчиков, покрывающих практически все предплечье, применены в устройстве [23]. Недостатками являются большие размеры, сопоставимые с длиной предплечья, и использование лишь одного типа датчиков. Аналогичными недостатками обладают устройства [24, 25], которые также используют гибкие электроды емкостных датчиков.

Результаты проведенного анализа показали, что возможно применение комбинации датчиков разных типов для распознавания жестов. Полученный авторами опыт по разработке емкостных сенсоров [26], включая комбинированные решения для определения приближения объекта и его силы давления [27], а также идеи рассмотренных выше работ позволили сделать предположение о том, что ввиду физиологических особенностей при формировании жестов рельеф нижней части запястья меняется в значительной мере, данные изменения возможно преобразовать в изменение сигналов емкостных датчиков. Объединение емкостных датчиков для измерений изменения рельефа запястья с инерциальным датчиком в одном устройстве позволит улучшить распознавание жестов и увеличить их количество.

Структурная схема и аппаратная реализация прототипа носимого сенсорного устройства

В ходе серии предварительных экспериментов с емкостными датчиками [26] и моделирования аппаратной конфигурации носимого сенсорного устройства была определена структурная схема аппаратного обеспечения устройства (рис. 1).

Носимое сенсорное устройство состоит из аналоговой и цифровой частей. Аналоговая часть устройства представлена блоками 1, 2, 3, 4 и предназначена для преобразования измене-



■ **Рис. 1.** Структурная схема аппаратного обеспечения носимого сенсорного устройства: 1 – высокочастотный генератор прямоугольных импульсов; 2 – первичный емкостной преобразователь; 3 – усилитель аналогового сигнала; 4 – аналоговый фильтр; 5 – цифровой потенциометр; 6 – многоканальный АЦП; 7 – инерциальная измерительная система; 8 – вычислитель; 9 – беспроводной интерфейс; 10 – проводной интерфейс; 11 – устройство ввода/вывода; A(1) – блок «датчик и интерфейсная схема 1», включающий в себя 2–5 и объединяющий дублирующиеся части структурной схемы; A(2) – «датчик и интерфейсная схема 2»; A(n) – «датчик и интерфейсная схема n»

■ **Fig. 1.** Structural scheme of the sensor device hardware: 1 – high frequency square wave generator; 2 – primary capacitive transducer; 3 – analog signal amplifier; 4 – analog filter; 5 – digital potentiometer; 6 – multi-channel analog-to-digital converter; 7 – inertial measurement system; 8 – computer; 9 – wireless interface; 10 – wired interface; 11 – input/output device; A(1) – “sensor and interface circuit 1”, including 2–5 and combining duplicate parts of the structure scheme; A(2) – “sensor and interface circuit 2”; A(n) – “sensor and interface circuit n”

ния емкости первичного емкостного преобразователя в изменение напряжения, измеряемого многоканальным АЦП. Первичный емкостной преобразователь представляет собой пару плоских электродов определенной формы, имеющих непосредственный контакт с запястьем. Один из электродов подключен к высокочастотному генератору прямоугольных импульсов, а второй – к усилителю. Выход усилителя подключен к фильтру, который необходим для выделения полезного сигнала. Принцип работы предлагаемой аналоговой части устройства основан на изменении реактивного сопротивления первичного емкостного преобразователя в зависимости от качества прилегания электродов к запястью.

Для распознавания жестов устройство должно в своем составе иметь более одного датчика с интерфейсной схемой, что отражено наличием блоков A(2) и A(n). В состав блока датчика с интерфейсной схемой входят первичный емкостной преобразователь, усилитель, фильтр и цифровой потенциометр, который необходим для

регулировки коэффициента усиления усилителя. В зависимости от физиологических особенностей пользователя датчики носимого сенсорного устройства имеют различное качество прилегания к запястью, результатом чего являются различия в уровне чувствительности датчиков. Цифровой потенциометр предназначен для регулировки чувствительности каждого датчика и управляется вычислителем. Выходы блоков A(1)–A(n) соединены со входами многоканального АЦП. Вычислитель получает значения сигналов датчиков в цифровом виде от АЦП, а данные о двигательной активности руки – от инерциальной измерительной системы.

Вычислитель осуществляет фильтрацию и первичную обработку данных, получаемых с емкостных датчиков после АЦП и инерциальной измерительной системы. Далее данные передаются на управляемое устройство через беспроводной интерфейс. Сенсорное устройство имеет проводной интерфейс для отладки и обновления программного обеспечения и устройства ввода/вывода для взаимодействия с пользователем.

Необходимо отметить, что при разработке данного устройства преследовалась цель максимально упростить схемотехнические решения для снижения стоимости носимого устройства, которая должна быть сопоставима со стоимостью привычных к использованию человеком устройств ввода или смарт-часов. Ввиду этого реализация всех необходимых операций для подготовки сигналов с емкостных сенсоров к распознаванию жестов происходит посредством программного обеспечения микроконтроллера.

Для распознавания двигательной активности применяются известные современные методы обработки данных с гироскопа и акселерометра [28]. Применение данных модальностей в совокупности дает ряд преимуществ. Например, возможно повышение точности распознавания жеста, что позволит определять начало формирования жеста и окончание данного процесса.

Практическая реализация устройства выполнена на микроконтроллере с ядром ARM® Cortex®-M4 и имеет шесть емкостных датчиков. Применяемый микроконтроллер имеет встроенный приемопередатчик, совместимый с Bluetooth® Low Energy режимом работы, и отличается низким энергопотреблением. Li-pol аккумуляторной батареи с номинальным напряжением 3,7 В и емкостью 90 мАч достаточно на 8 ч автономной работы устройства. Внешний вид прототипа сенсорного устройства представлен на рис. 2.

Устройство выполнено в пластиковом корпусе, изготовленном с применением аддитивных технологий, имеет разъем microUSB для заряда и работы с программным обеспечением и две кнопки. Были протестированы различные варианты ре-



■ **Рис. 2.** Прототип носимого сенсорного устройства
 ■ **Fig. 2.** The prototype of the sensor device

мешков. Для достаточной чувствительности сенсоров к движениям необходимо, чтобы электроды устройства надежно прилегали к запястью, поэтому наиболее подходящим оказался тканевый эластичный ремешок с регулировкой. Размеры устройства $48 \times 46 \times 9$ мм без учета ремешка, что сопоставимо с размерами смарт-часов.

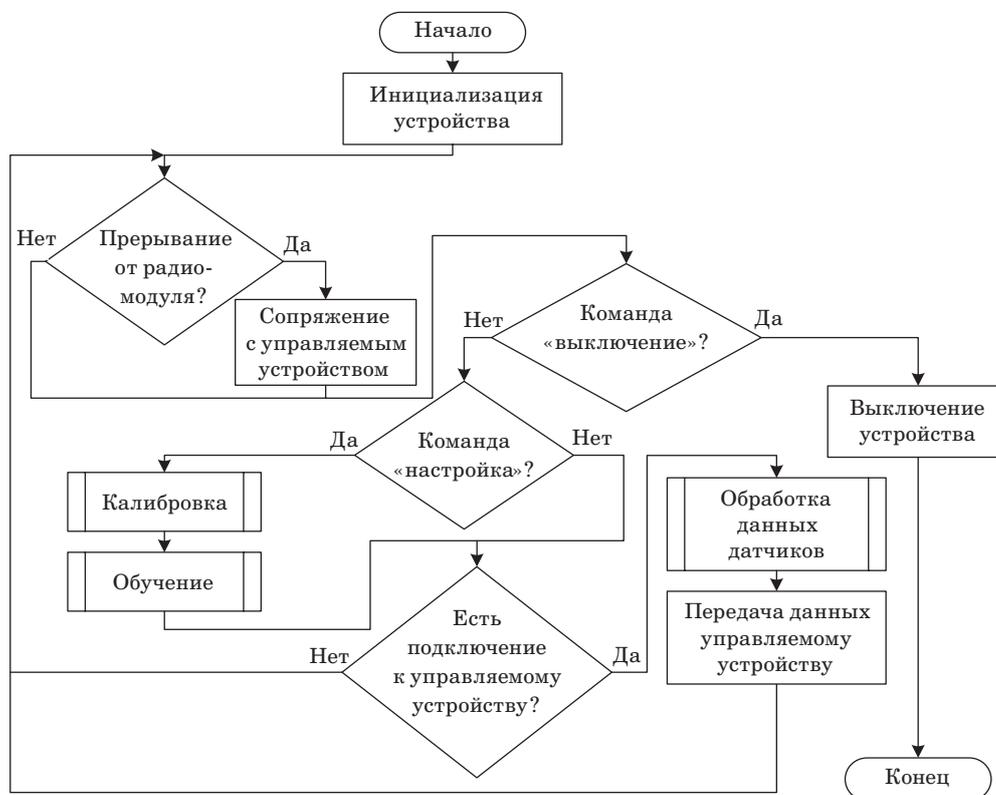
Алгоритмы калибровки и функционирования сенсорного устройства

Как упоминалось выше и следует из структурной схемы, схемотехнические решения предлагаемого устройства отличаются своей простотой,

что переносит большую часть обработки сигналов на программное обеспечение. Блок-схема алгоритма базового функционирования устройства представлена на рис. 3.

На первых шагах алгоритма осуществляется инициализация базовых возможностей микроконтроллера с его периферийными компонентами (таймерами, проводными и беспроводным интерфейсами). Помимо этого, из энергонезависимой памяти считываются данные, необходимые для функционирования устройства, которые могут быть изменены после этапов калибровки и обучения. После инициализации проверяется наличие запроса от управляемого устройства на подключение: если запрос поступил, то выполняется сопряжение устройств.

Следующие этапы алгоритма проводятся вне зависимости от того, был ли получен запрос на подключение или нет. Устройство проверяет поступление команд от пользователя. Проверка заключается в считывании сигналов, определяющих нажатие пользователем кнопок на устройстве. Длительные и короткие нажатия кнопок формируют различные команды. При длительном нажатии первой кнопки определяется команда «выключение» и устройство выключается. При длительном нажатии второй кнопки определяется команда «настройка» и выполня-



■ **Рис. 3.** Базовый алгоритм функционирования носимого сенсорного устройства
 ■ **Fig. 3.** Basic algorithm for functioning of wearable sensor device

ются следующие шаги. Сначала выполняется алгоритм калибровки, заключающийся в поиске варьируемых параметров устройства для подстройки под пользователя. После калибровки вычисляются коэффициенты и параметры модели машинного обучения для распознавания жестов и двигательной активности руки.

Далее, если подключение к управляемому устройству произошло успешно или сопряжение было выполнено ранее, возможно выполнение алгоритма обработки данных датчиков и передача данных управляемому устройству. Если подключения нет, то шаги после блока инициализации будут выполняться снова.

Рассмотрим подробнее алгоритм калибровки носимого сенсорного устройства (рис. 4). Представленный алгоритм основан на подборе такого коэффициента усиления сигналов от емкостных датчиков, при котором не будет насыщения сигналов, когда сохраняется положение руки с жестом «раскрытая ладонь». Данный жест принят в качестве такого, определение которого для управляемых устройств означает отсутствие команд или нейтральное состояние. Коэффициент усиления сигналов зависит от сопротивления в цепи обратной связи усилителя, которое формируется цифровым потенциометром. Согласно блок-схеме сопротивление цифрового потенциометра R_{fb} изменяется N раз от R_{max} до 0 до

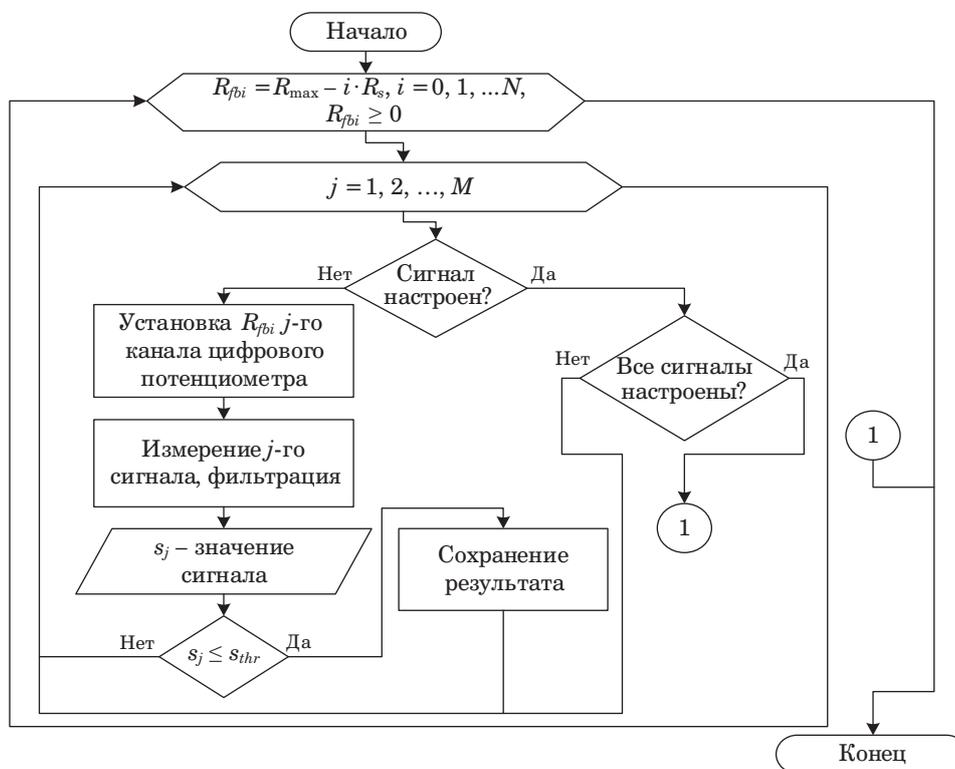
тех пор, пока все сигналы не будут настроены. Величина R_{max} определяется максимальным возможным значением сопротивления цифрового потенциометра. Число N зависит от шага изменения сопротивления R_s , которое выбирается таким, чтобы изменение сигнала превышало среднеквадратическое отклонение шума, равное d_n и измеряемое в единицах АЦП. Значение R_s выбирается в соответствии с неравенством

$$\begin{cases} \frac{\Delta U_{out} ADC_{res}}{U_{ADC}} > d_n, \\ \Delta U_{out} = f(R_s) \end{cases}, \quad (1)$$

где ΔU_{out} — величина изменения выходного напряжения усилителя при изменении сопротивления в цепи обратной связи на значение R_s ; ADC_{res} — разрядность АЦП; U_{ADC} — опорное напряжение АЦП.

Соответственно, максимальное число итераций N определяется как число, равное $N = \lfloor R_{max} / R_s \rfloor + 1$.

В каждой итерации рассматриваемого цикла выполняется вложенный цикл, представляющий собой перебор данных от емкостных сенсоров, количество которых равно числу M , номер рассматриваемого сенсора обозначается как $j = 1, 2, \dots, M$. На первом шаге данного вложенно-



■ **Рис. 4.** Алгоритм калибровки
 ■ **Fig. 4.** The calibration algorithm

го цикла проверяется, настроен ли уровень сигнала от емкостного сенсора. Если настроен, то выполнение алгоритма переходит к следующей итерации или цикл завершается. Если условие не соблюдается, то соответствующему каналу цифрового потенциометра устанавливается сопротивление $R_{fbi} = R_{\max} - iR_s$, где R_{fbi} – значение сопротивления цифрового потенциометра на итерации i основного цикла, $i = 0, 1, 2, \dots, N$.

Кроме того, для сокращения времени процесса настройки, т. е. уменьшения числа итераций, проводится проверка того, настроены ли все сигналы или нет. В случае, если сигнал не настроен, выполняется измерение сигнала с номером j , осуществляется фильтрация и получается значение сигнала s_j . Затем сравнивается полученное значение с заданной пороговой величиной s_{thr} . Если $s_j > s_{thr}$, то выполнение алгоритма переходит к следующей итерации или цикл завершается. Если $s_j \leq s_{thr}$, то для данного сигнала значение величины сопротивления соответствующего канала цифрового потенциометра сохраняется в энергонезависимую память.

За алгоритмом калибровки следует алгоритм обучения (рис. 5). Алгоритм основан на обмене данными носимого устройства с внешним устройством для обучения, которым может являться как управляемое устройство, так и иное

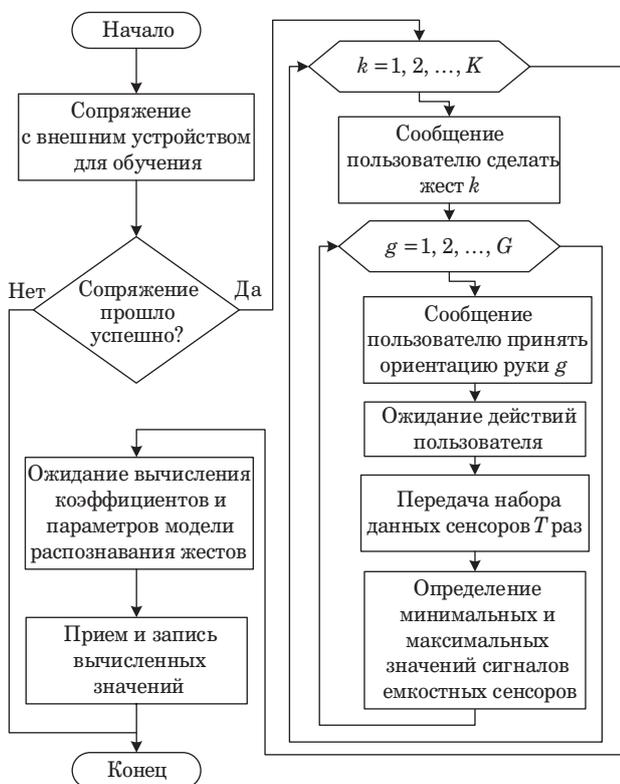
вычислительное устройство, имеющее достаточный объем памяти и производительности для вычисления коэффициентов и параметров модели машинного обучения. Следует отметить, что алгоритм отражает принятую в данной работе концепцию обучения, при этом используемая модель находится вне рамок настоящего исследования. Задача подбора соответствующей модели обучения является отдельной проблемой, которая рассматривалась в работах [29, 30] для решения задач определения типа материала и величины приложенного давления по сигналам, поступающим от емкостных датчиков с аналогичными схемотехническими решениями.

На первом шаге рассматриваемого алгоритма осуществляется сопряжение с устройством обучения. Причем алгоритм завершится, если сопряжения не будет. При успешном сопряжении выполняется цикл по сбору данных от сенсоров для обучения распознавания K жестов. Сперва отправляется уведомление на устройство обучения для вывода сообщения, чтобы пользователь выполнил жест k , $k = 1, 2, \dots, K$. Также возможно подавать условные сигналы пользователю посредством встроенных в носимое устройство светодиодов и вибромотора. Затем отправляется сообщение, чтобы рука пользователя приняла ориентацию g , $g = 1, 2, \dots, G$. После ожидания действий пользователя осуществляется передача данных сенсоров T раз. При этом каждую итерацию фиксируется минимальное и максимальное значения сигналов емкостных датчиков, что необходимо для нормализации их значений в блоке «Обработка данных датчиков», приводящем значения сигналов в диапазон от 0 до 1. Это необходимо ввиду различной чувствительности сенсоров. После сбора данных для жеста k с ориентациями G происходит переход к следующему жесту или завершение цикла.

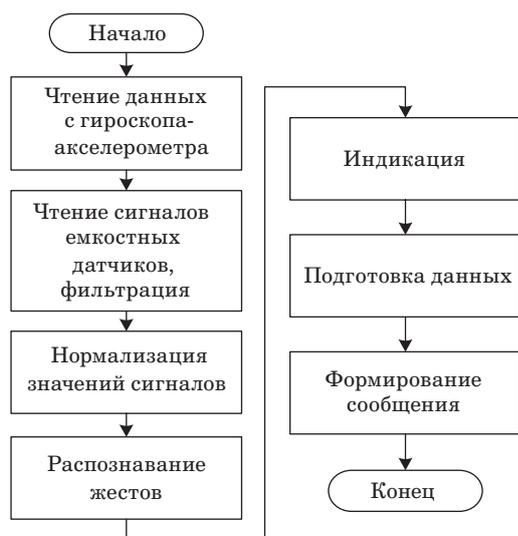
После сбора данных для обучающей выборки выполняются вычисления коэффициентов и параметров выбранной модели. При этом можно применять предобученную модель с качеством работы, удовлетворяющим пользователя, ввиду чего выполнение алгоритмов «Калибровка» и «Обучение» не является обязательным. После определения коэффициентов и параметров их значения передаются на носимое устройство для записи в энергонезависимую память.

Далее рассмотрим алгоритм обработки данных, поступающих с датчиков (рис. 6).

На первом этапе алгоритма считываются данные с гироскопа-акселерометра. Затем считываются и фильтруются сигналы от емкостных датчиков, после чего осуществляется нормализация каждого полученного значения сигнала в соответствии с выражением



■ Рис. 5. Алгоритм обучения
 ■ Fig. 5. The learning algorithm



■ **Рис. 6.** Алгоритм обработки данных, поступающих с датчиков

■ **Fig. 6.** The sensors data processing algorithm

$$s_n = \begin{cases} 0, & s < s_{\min}, \\ 1, & s > s_{\max}, \\ \frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}}, & s_{\min} \leq s \leq s_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где s_n — новое значение сигнала, $s_n \in [0; 1]$, s — значение сигнала (в единицах АЦП).

На следующем шаге выполняется распознавание жестов кисти и двигательной активности руки пользователя. При этом осуществляется индикация на устройстве, если жест или движение распознаны. Далее подготавливаются данные, необходимые для управляемого устройства, и формируется сообщение для отправки по беспроводному интерфейсу.

Эксперименты и практические приложения

Разработанное носимое сенсорное устройство размещается на запястье (рис. 7).

Первичное тестирование прототипа устройства предполагает определение корректного функционирования каждого емкостного датчика, IMU-сенсора (гироскопа-акселерометра) и другого аппаратного обеспечения. На рис. 8 представлены сигналы с емкостных датчиков для различных жестов после программной фильтрации.

На рисунке отмечены временные интервалы, которые ограничивают сформированные жесты, и участки с переходными процессами между ни-



■ **Рис. 7.** Прототип носимого сенсорного устройства, размещенного на запястье

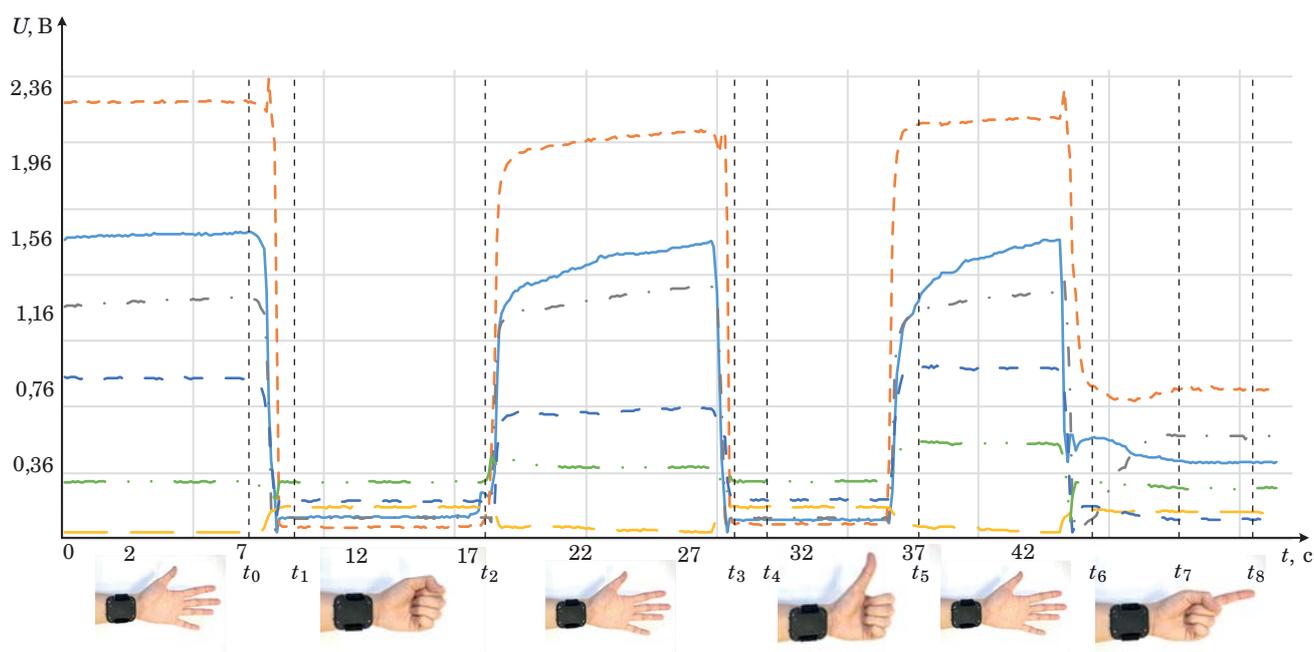
■ **Fig. 7.** The prototype of the wearable sensor device, placed on the wrist

ми. Интервалами t_0-t_1 , t_3-t_4 , t_6-t_7 отмечены границы переходного процесса при формировании жестов из исходного, в качестве которого выбрана «открытая ладонь». Представлены сигналы для четырех жестов: «сжатый кулак» (t_1-t_2), «большой палец вверх» (t_4-t_5), «указательный палец вверх» (t_7-t_8) и «открытая ладонь» ($0-t_0$, t_2-t_3 , t_5-t_6). Сравнение сигналов емкостных датчиков позволяет сделать вывод о существенных различиях в амплитудах для разных жестов. В табл. 1 приведены значения усредненных уровней сигналов сенсоров при различных жестах относительно уровней усредненных сигналов, когда был выполнен жест «открытая ладонь».

По приведенным расчетным значениям видно, что сигналы жестов «сжатый кулак» и «большой палец вверх» отличаются несущественно, что нельзя сказать о разнице значений сигналов данных жестов с сигналами жеста «указательный палец вверх», где можно наблюдать разницу в диапазоне 1,86...33,17 % от уровня сигналов жеста «открытая ладонь».

После обучения носимого устройства для распознавания жестов его можно применять как интерфейс ввода или для управления конечными устройствами. Рассмотрим вариант использования в качестве указывающего устройства.

При использовании принципов для указывающего устройства, аналогичных тем, что используются для сенсорных экранов, достаточно распознавания одного жеста. В рамках данного приложения используется жест «указательный палец вверх», который имел значение нажатия левой кнопки мыши или нажатия на сенсорный экран. Взаимодействие с данным приложением представлено в видео (<https://www.youtube.com/watch?v=J7P6mLKjYU>), а на рис. 9 показаны отдельные кадры из него: пролистывание страницы с положениями руки в пространстве и формированием жеста. В рамках данного приложения носимое сенсорное устройство можно использовать, например, для пролистывания презентаций или рисования объектов на экране.



■ **Рис. 8.** Сигналы с емкостных датчиков для различных жестов
 ■ **Fig. 8.** Signals obtained from capacitive sensors for different gestures

■ **Таблица 1.** Сравнение значений сигналов жестов относительно жеста «открытая ладонь»
 ■ **Table 1.** Gestures signals value comparison relative to the open palm gesture

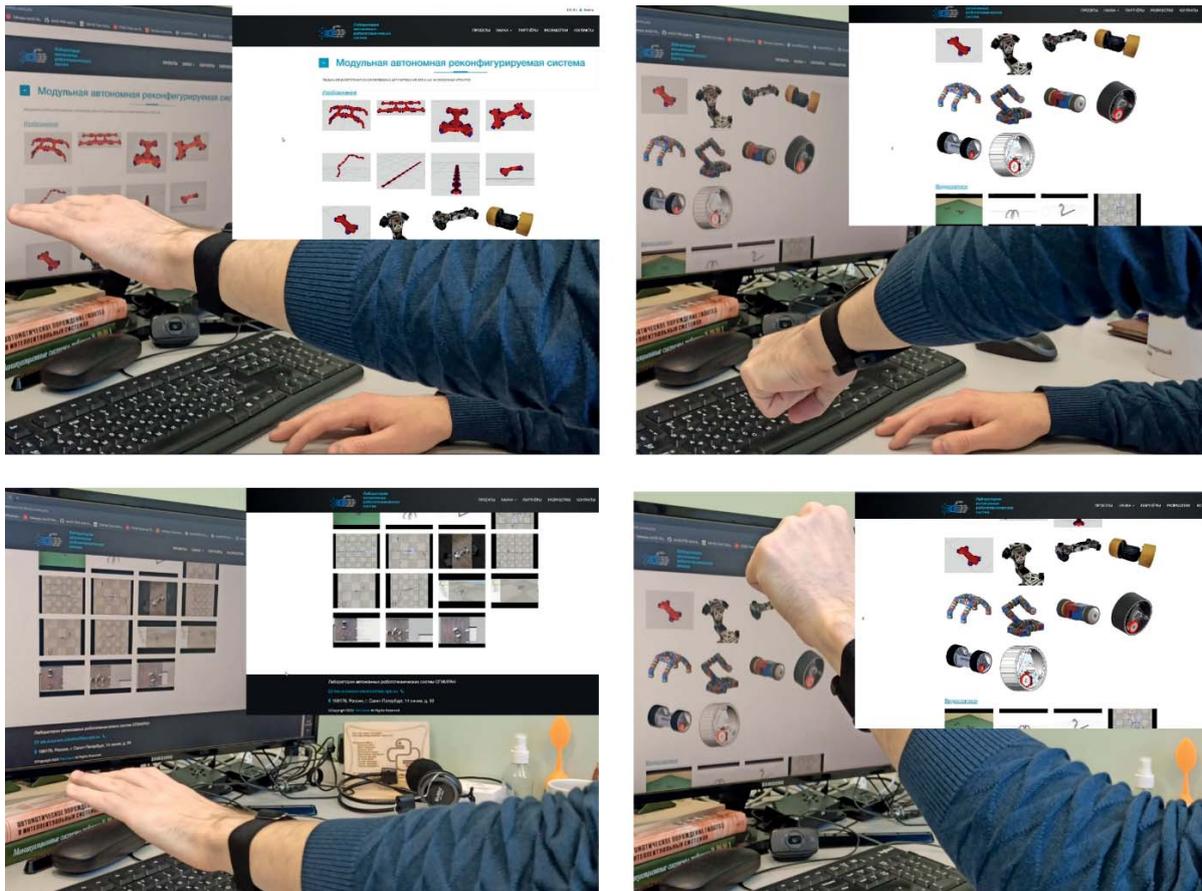
№ сенсора	Значение сигнала, %, типа		
	«сжатый кулак»	«большой палец вверх»	«указательный палец вверх»
1	94,40	95,57	74,11
2	98,75	98,00	66,01
3	93,89	93,90	60,72
4	7,43	7,43	9,30
5	78,57	77,74	90,37
6	24,38	22,99	32,08

Носимое сенсорное устройство можно использовать для формирования управляющих команд объектом управления, например коллаборативным роботом или обучающей мобильной платформой. Нами активно развивается проект обучающей мобильной платформы с распределенной системой управления, поэтому было решено представить данное приложение именно на ее основе в видео (<https://www.youtube.com/watch?v=x6X2rWRphpk>), а на рис. 10 показаны отдельные кадры.

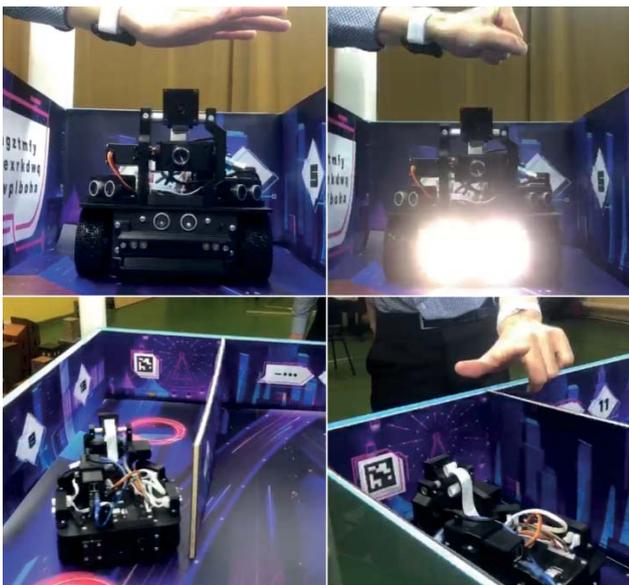
В представленной конфигурации робот предназначен для исследования трассы и имеет FPV-камеру. Перед учеником ставятся задачи

перемещения по трассе, решения головоломок и сбора меток путем считывания их камерой технического зрения или RFID-считывателем. На трассе есть закрытые участки, на которых отсутствует освещение, и ученику с помощью жеста необходимо включать головное освещение робота. Управление перемещением робота по трассе осуществляется на основе положения и движения руки в пространстве. В данном приложении распознаются два жеста, один из которых инициирует распознавание метки на трассе, а второй — включение освещения.

Сравнение устройств из рассмотренных выше работ по двум характеристикам проведено



■ **Рис. 9.** Использование разработанных решений в качестве указывающего устройства
 ■ **Fig. 9.** Using developed solutions as a pointing device



■ **Рис. 10.** Использование разработанного сенсорного устройства для управления мобильным роботом
 ■ **Fig. 10.** Using the developed sensor device for controlling the mobile robot

в табл. 2. Видно, что предлагаемое решение позволяет получать данные с сенсоров намного быстрее, чем разработки, представленные в [16, 22, 23], и при этом имеет две модальности.

■ **Таблица 2.** Сравнение характеристик устройств
 ■ **Table 2.** Comparison the characteristics of the devices

Устройство	Многомодальность	Периодичность выборки данных сенсоров, мс
[16]	–	16
[18]	+	–
[20]	+	–
[22]	–	40
[23]	–	50
[25]	–	10
Предлагаемое решение	+	10

Заключение

Предложена структура аппаратного обеспечения и алгоритмы работы носимого сенсорного устройства для распознавания жестов и двигательной активности руки человека. Разработанное решение предоставляет возможность реализовать на его основе указывающее устройство или устройство, непосредственно формирующее управляющие команды для робототехнических систем и другого оборудования. В экспериментальной части работы представлены практические применения разработанных решений в качестве указывающего устройства и для управления мобильным обучающим ро-

ботом. Потенциально предлагаемое сенсорное устройство может найти применение в медицинских приложениях, например, для оценки активности пациента и измерения частоты сердечных сокращений. Применение разработанных решений возможно для управления устройствами умного дома [31] или иными киберфизическими системами [32] и может оказать значительное влияние на их развитие.

Дальнейшие исследования будут направлены на поиск и реализацию решений в программном обеспечении, которые позволят упростить и сократить процесс обучения для распознавания жестов и сделают предлагаемое устройство более удобным для пользователя.

Литература

1. Saveliev A., Lebedeva V., Lebedev I., Uzdiaev M. An approach to the automatic construction of a road accident scheme using UAV and deep learning methods. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 13, pp. 4728. doi:10.3390/s22134728
2. Sanders D. A., Sanders H. M., Gegov A., Ndzi D. Rule-based system to assist a tele-operator with driving a mobile robot. *Proc. of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, 2018, vol. 2, pp. 599–615. doi:10.1007/978-3-319-56991-8_44
3. Dresvyanskiy D., Ryumina E., Kaya H., Markitanov M., Karpov A., Minker W. End-to-end modeling and transfer learning for audiovisual emotion recognition in-the-wild. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 11. doi:10.3390/mti6020011
4. Kagirov I., Kapustin A., Kipyatkova I., Klyuzhev K., Kudryavcev A., Kudryavcev I., Loskutov Y., Ryumin D., and Karpov A. Medical exoskeleton “Remotion” with an intelligent control system: Modeling, implementation, and testing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2021, vol. 107, pp. 102200. doi:10.1016/j.simpat.2020.102200
5. Phutela D. The importance of non-verbal communication. *IUP Journal of Soft Skills*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 43–49.
6. Kendon A. *Gesture: Visible action as utterance*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004. 412 p. doi:10.1017/CBO9780511807572
7. Толстой И. М., Савельев А. И., Денисов А. В. Разработка жестового интерфейса для взаимодействия пользователя с робототехническими средствами. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2018, № 4, с. 24–25. doi:10.31776/RTСJ.6404
8. Canal G., Escalera S., Angulo C. A real-time human-robot interaction system based on gestures for assistive scenarios. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, vol. 149, pp. 65–77. doi:10.1016/j.cviu.2016.03.004
9. Latta S., et al. *Gesture keyboarding*. Patent U.S., no. 12/391,145, 2010.
10. DelPreto J., Rus D. Plug-and-play gesture control using muscle and motion sensors. *Proc. of the 2020 ACM/IEEE Intern. Conf. on Human-Robot Interaction*, 2020, pp. 439–448. doi:10.1145/3319502.3374823
11. Козырь П. С., Савельев А. И. Анализ эффективности методов машинного обучения в задаче распознавания жестов на основе данных электромиографических сигналов. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2021, т. 13, № 1, с. 175–194. doi:10.20537/2076-7633-2021-13-1-175-194
12. Qi J., Jiang G., Li G., Sun Y., Tao B. Intelligent human-computer interaction based on surface EMG gesture recognition. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 61378–61387. doi:10.1109/ACCESS.2019.2914728
13. Tanaka A., Fistre J. *Method and apparatus for analysing gestures produced in free space, eg for commanding apparatus by gesture recognition*. Patent U.S., no. 7,333,090, 2008.
14. Sun Z., Zhu M., Shan X., Lee C. Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 5224. doi:10.1038/s41467-022-32745-8
15. Yang J., Liu S., Meng Y., Xu W., Liu S., Jia L., Chen G., Qin Y., Han M., and Li X. Self-powered tactile sensor for gesture recognition using deep learning algorithms. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, vol. 14, no. 22, pp. 25629–25637. doi:10.1021/acsami.2c01730
16. Byun S. W., Lee S. P. Implementation of hand gesture recognition device applicable to smart watch based on flexible epidermal tactile sensor array. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 10, pp. 692. doi:10.3390/mi10100692
17. Jung P. G., Lim G., Kim S., Kong K. A wearable gesture recognition device for detecting muscular activities based on air-pressure sensors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 485–494. doi:10.1109/TII.2015.2405413
18. Пат. RU0002641269C1, МПК G06F 7/00. Устройство и способ для распознавания жестов с использованием радиочастотного датчика, А. В. Кле-

- цов, А. Г. Чернокалов, С. В. Полонский (РФ). № 2017106851; заявл. 02.03.2017; опубл. 16.01.2018.
19. Pan J., Li Y., Luo Y., Zhang X., Wang X., Wong D. L. T., Heng C. H., Tham C. K., and Thean A. V. Y. Hybrid-flexible bimodal sensing wearable glove system for complex hand gesture recognition. *ACS Sensors*, 2021, vol. 6, no. 11, pp. 4156–4166. doi:10.1021/acssensors.1c01698
 20. Singh G., Nelson A., Robucci R., Patel C., Banerjee N. Inviz: Low-power personalized gesture recognition using wearable textile capacitive sensor arrays. *IEEE Intern. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2015, pp. 198–206. doi:10.1109/PERCOM.2015.7146529
 21. Cheng J., Amft O., Bahle G., Lukowicz P. Designing sensitive wearable capacitive sensors for activity recognition. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 3935–3947. doi:10.1109/JSEN.2013.2259693
 22. Liang X., Ghannam R., Heidari H. Wrist-worn gesture sensing with wearable intelligence. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 1082–1090. doi:10.1109/JSEN.2018.2880194
 23. Dankovich L. J., Bergbreiter S. Gesture recognition via flexible capacitive touch electrodes. *Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 9028–9034. doi:10.1109/ICRA.2019.8794202
 24. Truong H., Nguyen P., Nguyen A., Bui N., Vu T. Capacitive sensing 3d-printed wristband for enriched hand gesture recognition. *Proc. of the 2017 Workshop on Wearable Systems and Applications*, 2017, pp. 11–15. doi: 10.1145/3089351.3089359
 25. Wang T., Zhao Y., Wang Q. Hand gesture recognition with flexible capacitive wristband using triplet network in inter-day applications. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 30, pp. 2876–2885. doi: 10.1109/TNSRE.2022.3212705
 26. Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Быков А. Н. Разработка схемотехнического решения и конструкции емкостной матрицы датчиков давления для применения в робототехнике. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2020, т. 8, № 4, с. 296–307. doi:10.31776/RTCJ.8406
 27. Крестовников К., Ерашов А., Быков А. Development of matrix of combined force and proximity sensors for use in robotics. *6th Intern. Conf. "Interactive Collaborative Robotics"*, 2021, pp. 113–125. doi:10.1007/978-3-030-87725-5_10
 28. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. <https://forums.parallax.com/uploads/attachments/41167/106661.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).
 29. Kozыр P., Saveliev A., Kuznetsov L. Determining distance to an object and type of its material based on data of capacitive sensor signal and machine learning techniques. *Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*, IEEE, 2021, pp. 1–5. doi:10.1109/SIBCON50419.2021.9438932
 30. Козыр П. С., Яковлев Р. Н. Модель оценки величины приложенного давления на основе анализа сигналов тактильного сенсора с применением методов машинного обучения. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2021, т. 37, № 4, с. 119–130. doi:10.26117/2079-6641-2021-37-4-119-130
 31. Мозохин А. Е. Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей. *Информатика и автоматизация*, 2021, т. 20, № 6, с. 1418–1447. doi:10.15622/ia.20.6.9
 32. Мещеряков Р. В., Исаков А. Ю., Евсютин О. О. Современные методы обеспечения целостности данных в протоколах управления киберфизических систем. *Информатика и автоматизация*, 2020, т. 19, № 5, с. 1089–1122. doi:10.15622/ia.2020.19.5.7

UDC 004.5; 681.586.772

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-35-46

EDN: BMHSAH

Development of hardware and operation algorithms for the wearable sensor device designed for hand motor activity and gesture recognition

K. D. Krestovnikov^a, Post-Graduate Student, Junior Researcher, orcid.org/0000-0001-6303-0344

A. A. Erashov^a, Post-Graduate Student, Junior Researcher, orcid.org/0000-0001-8003-3643

A. I. Saveliev^a, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-1851-2699, saveliev@iias.spb.su

^aSt. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14th Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The development of human-machine interfaces is an actively developing field which now includes technical solutions that make it possible to implement the forms of interaction that are more convenient and natural for humans. The use of several modalities in the interface allows one to increase the recognition accuracy of commands formed by a human. **Purpose:** To develop hardware and algorithms for a wearable device to improve the speed of data acquisition for human hand motor activity and gestures. **Results:** The analysis of modern solutions showed that the use of machine vision systems for gesture recognition is limited due to lighting conditions, the use of wearable electronics often requires a high-performance computing device, in addition, the processing time is affected by digital filtering of noisy signals. The developed structure of the wearable device that uses a gyroscope-accelerometer and capacitive sensors allows one to identify various gestures. We offer to use an input device as a pointing device or a device directly forming control commands. The configuration of the device provides the implementation of an interface with two modalities, one of which is the human hand movements and the other is the gestures formed by the hand. The characteristics of the prototype sensors are obtained, and the integration of the developed solution for mobile robot control and computer mouse emulation is considered. **Practical relevance:** The developed device

can be used in robot control, in the Internet of Things to control the devices of cyber-physical systems, as well as in medical applications. **Discussion:** A distinctive feature of the device is based on the capacitive principle of gesture recognition sensors. Due to the static drift of capacitive sensor outputs and the variation of the device's area of contact with the hand, more research is needed to find a method with which more than two gestures can be identified with satisfactory accuracy.

Keywords — gestures recognition, human-machine interface, capacitive sensors, Bluetooth Low Energy.

For citation: Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Saveliev A. I. Development of hardware and operation algorithms for the wearable sensor device designed for hand motor activity and gesture recognition. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 35–46 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-35-46, EDN: BMHSAH

References

- Saveliev A., Lebedeva V., Lebedev I., Uzdiaev M. An approach to the automatic construction of a road accident scheme using UAV and deep learning methods. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 13, pp. 4728. doi:10.3390/s22134728
- Sanders D. A., Sanders H. M., Gegov A., Ndzi D. Rule-based system to assist a tele-operator with driving a mobile robot. *Proc. of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, 2018, vol. 2, pp. 599–615. doi:10.1007/978-3-319-56991-8_44
- Dresvyanskiy D., Ryumina E., Kaya H., Markitanton M., Karpov A., Minker V. End-to-end modeling and transfer learning for audiovisual emotion recognition in-the-wild. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 11. doi:10.3390/mti6020011
- Kagirov I., Kapustin A., Kipyatkova I., Klyuzhev K., Kudryavcev A., Kudryavcev I., Loskutov Y., Ryumin D., and Karpov A. Medical exoskeleton “Remotion” with an intelligent control system: Modeling, implementation, and testing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2021, vol. 107, pp. 102200. doi:10.1016/j.simpat.2020.102200
- Phutela D. The importance of non-verbal communication. *IUP Journal of Soft Skills*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 43–49.
- Kendon A. *Gesture: Visible action as utterance*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004. 412 p. doi:10.1017/CBO9780511807572
- Tolstoy I., Saveliev A., Denisov A. Development of gesture interface for user interaction with robotic devices. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, no. 4, pp. 24–25 (In Russian). doi:10.31776/RTCJ.6404
- Canal G., Escalera S., Angulo C. A real-time human-robot interaction system based on gestures for assistive scenarios. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, vol. 149, pp. 65–77. doi:10.1016/j.cviu.2016.03.004
- Latta S., et al. *Gesture keyboarding*. Patent U.S., no. 12/391,145, 2010.
- DelPreto J., Rus D. Plug-and-play gesture control using muscle and motion sensors. *Proc. of the 2020 ACM/IEEE Intern. Conf. on Human-Robot Interaction*, 2020, pp. 439–448. doi:10.1145/3319502.3374823
- Kozyr P., Saveliev A. Analysis of the effectiveness of machine learning methods in the problem of gesture recognition based on the data of electromyographic signals. *Computer Research and Modeling*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 175–194 (In Russian). doi:10.20537/2076-7633-2021-13-1-175-194
- Qi J., Jiang G., Li G., Sun Y., Tao B. Intelligent human-computer interaction based on surface EMG gesture recognition. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 61378–61387. doi:10.1109/ACCESS.2019.2914728
- Tanaka A., Fistre J. *Method and apparatus for analysing gestures produced in free space, eg for commanding apparatus by gesture recognition*. Patent U.S., no. 7,333,090, 2008.
- Sun Z., Zhu M., Shan X., Lee C. Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 5224. doi:10.1038/s41467-022-32745-8
- Yang J., Liu S., Meng Y., Xu W., Liu S., Jia L., Chen G., Qin Y., Han M., and Li X. Self-powered tactile sensor for gesture recognition using deep learning algorithms. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, vol. 14, no. 22, pp. 25629–25637. doi:10.1021/acsaami.2c01730
- Byun S. W., Lee S. P. Implementation of hand gesture recognition device applicable to smart watch based on flexible epidermal tactile sensor array. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 10, pp. 692. doi:10.3390/mi10100692
- Jung P. G., Lim G., Kim S., Kong K. A wearable gesture recognition device for detecting muscular activities based on air-pressure sensors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 485–494. doi:10.1109/TII.2015.2405413
- Kletsov A., et al. *Ustrojstvo i sposob dlya raspoznavaniya zhestov s ispolzovaniem radiochastotnogo datchika* [Device and method for gesture recognition using radio frequency sensor]. Patent RF, 2018.
- Pan J., Li Y., Luo Y., Zhang X., Wang X., Wong D. L. T., Heng C. H., Tham C. K., and Thean A. V. Y. Hybrid-flexible bimodal sensing wearable glove system for complex hand gesture recognition. *ACS Sensors*, 2021, vol. 6, no. 11, pp. 4156–4166. doi:10.1021/acssensors.1c01698
- Singh G., Nelson A., Robucci R., Patel C., Banerjee N. Inviz: Low-power personalized gesture recognition using wearable textile capacitive sensor arrays. *IEEE Intern. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2015, pp. 198–206. doi:10.1109/PERCOM.2015.7146529
- Cheng J., Amft O., Bahle G., Lukowicz P. Designing sensitive wearable capacitive sensors for activity recognition. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 3935–3947. doi:10.1109/JSEN.2013.2259693
- Liang X., Ghannam R., Heidari H. Wrist-worn gesture sensing with wearable intelligence. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 1082–1090. doi:10.1109/JSEN.2018.2880194
- Dankovich L. J., Bergbreiter S. Gesture recognition via flexible capacitive touch electrodes. *Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 9028–9034. doi:10.1109/ICRA.2019.8794202
- Truong H., Nguyen P., Nguyen A., Bui N., Vu T. Capacitive sensing 3d-printed wristband for enriched hand gesture recognition. *Proc. of the 2017 Workshop on Wearable Systems and Applications*, 2017, pp. 11–15. doi:10.1145/3089351.3089359
- Wang T., Zhao Y., Wang Q. Hand gesture recognition with flexible capacitive wristband using triplet network in inter-day applications. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 30, pp. 2876–2885. doi:10.1109/TNSRE.2022.3212705
- Krestovnikov K., Erashov A., Bykov A. Development of circuit solution and design of capacitive pressure sensor array for applied robotics. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 296–307 (In Russian). doi:10.31776/RTCJ.8406
- Krestovnikov K., Erashov A., Bykov A. Development of matrix of combined force and proximity sensors for use in robotics. *6th Intern. Conf. “Interactive Collaborative Robotics”*, 2021, pp. 113–125. doi:10.1007/978-3-030-87725-5_10
- An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*. Available at: <https://forums.parallax.com/uploads/attachments/41167/106661.pdf> (accessed 10 March 2023).
- Kozyr P., Saveliev A., Kuznetsov L. Determining distance to an object and type of its material based on data of capacitive sensor signal and machine learning techniques. *Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*, IEEE, 2021, pp. 1–5. doi:10.1109/SIBCON50419.2021.9438932
- Kozyr P., Iakovlev R. A model for estimating the value of the applied pressure based on the analysis of tactile sensor signals using machine learning methods. *Bulletin of KRAUNC. Physical and Mathematical Sciences*, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 119–130 (In Russian). doi:10.26117/2079-6641-2021-37-4-119-130
- Mozohin A. Methodology for ensuring a comfortable microclimate state in a smart home using an ensemble of fuzzy artificial neural networks. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 6, pp. 1418–1447 (In Russian). doi:10.15622/ia.20.6.9
- Meshcheryakov R., Iskhakov A., Evsutin O. Analysis of modern methods to ensure data integrity in cyber-physical system management protocols. *Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 1089–1122 (In Russian). doi:10.15622/ia.2020.19.5.7



Метод синтеза локально допустимых ограниченных управлений для стабилизации программных движений динамических объектов

А. А. Ефремов^а, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-0224-2412

В. Н. Козлов^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-1552-8097, kozlov_vn@spbstu.ru

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

Введение: синтез систем стабилизации программных движений объектов является актуальной задачей теории управления. Проекционно-операторные методы математического программирования служат адекватными методами синтеза управлений для указанного класса задач. **Цель:** развитие методов синтеза локально допустимых управлений для стабилизации программных движений нелинейных динамических объектов при ограничениях на фазовые координаты и управления. **Результаты:** предложен проекционный оператор управления для систем стабилизации программных движений или положений равновесия, использующий граничные значения пары множителей Лагранжа для ограничения типа неравенства и счетного числа задач конечномерного математического программирования. Для нелинейных локально управляемых разностных операторов объекта синтезированы допустимые управления, стабилизирующие программные движения при ограничениях на фазовые координаты и управления. В результате получен оператор динамической системы с проекционно-операторной обратной связью для задач стабилизации программных движений с ограничениями на векторы фазовых координат и управлений. В качестве динамического объекта для вычислительного эксперимента с синтезированным оператором использована математическая модель синхронного генератора, состоящая из системы билинейных дифференциальных уравнений с параметрами, соответствующими уравнениям в форме В. А. Веникова. Вычислительный эксперимент подтвердил теоретические обобщения, полученные в работе. **Практическая значимость:** разрабатываемые методы обобщают формулировки задач синтеза управлений для стабилизации программных движений или положений равновесия нелинейных систем управления с ограничениями на фазовые координаты и управления. Развитие проекционно-операторного метода конечномерной оптимизации имеет важное практическое значение для синтеза управлений сложными динамическими системами, включая управление совместной динамикой электромеханических и электромагнитных процессов в крупных энергетических объединениях типа Единой электроэнергетической системы Российской Федерации.

Ключевые слова – динамические системы, проекционные операторы, оптимизация, стабилизация программных движений, нелинейный разностный оператор, локально допустимые управления, ограничения на фазовые координаты и управления, синхронный генератор, математическая модель, SimInTech.

Для цитирования: Ефремов А. А., Козлов В. Н. Метод синтеза локально допустимых ограниченных управлений для стабилизации программных движений динамических объектов. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 47–55. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-47-55, EDN: DYULZH

For citation: Efremov A. A., Kozlov V. N. Method of synthesis of locally permissible limited controls for the stabilization of program motions of dynamic objects. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 47–55 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-47-55, EDN: DYULZH

Введение

Методы стабилизации заданных программных движений динамических объектов определяют решения важных задач современной теории управления [1–3]. Для их решения широко используются барьерные функции Ляпунова [4–6], методы обратных задач динамики [7], операторные методы математического программирования [8, 9] и др. [10–12].

Операторные методы математического программирования представляются перспективными для синтеза ограниченных управлений и координат. Проекционные операторные методы позволяют обобщить формулировки задач син-

теза стабилизации программных движений или положений равновесия при ограничениях с учетом нелинейностей систем по координатам и управлениям. При этом могут быть учтены требования к локальной или интервальной условной оптимизации динамики систем.

Проекционные операторы, определенные в конечномерных или функциональных пространствах, отображают параметры и модели объектов управления, а также функционалы качества в оптимальные управления с обратной связью. Основу структуры операторов составляют проекторы на линейные многообразия и ортогональные дополнения к ним в конечномерных и бесконечномерных пространствах [13].

Операторы допустимых решений для систем стабилизации программных движений

Указанный класс проекционных операторов оптимизации разработан для задач конечно-мерного математического программирования, соответствующих целям стабилизации программных движений, имеет вид: вычислить вектор [13]

$$\mathbf{x}_* = \arg \min \left\{ \varphi(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|^2 \mid \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}, \right. \\ \left. (\mathbf{x} - \mathbf{C})^T (\mathbf{x} - \mathbf{C}) \leq r^2 \right\} \in \mathbf{R}^n, \quad (1)$$

где $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^n$ – программный вектор для стабилизируемых допустимых фазовых координат.

В работе [13] на основе принципа оптимальности, следующего из лагранжевых (граничных) элементов, получено решение задачи конечно-мерной оптимизации в виде оператора

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \lambda (1 + \lambda)^{-1} \mathbf{P}^0 \mathbf{C}, \quad (2)$$

где $\mathbf{P}^0 = \mathbf{E}_n - \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}$ – ортогональный проектор на линейное многообразие $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$; $\mathbf{P}^+ = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$ – проектор на ортогональное дополнение к линейному многообразию. В равенстве (2) скалярный параметр λ является множителем Лагранжа для ограничения типа неравенства в задаче (1). В лемме 1 приведен аналитический вывод квадратного уравнения, определяющего пару множителей Лагранжа λ .

Лемма 1. Множители Лагранжа λ для ограничения-неравенства в операторе (2) определяются решением квадратного уравнения

$$a\lambda^2 + b\lambda + c = 0, \quad (3)$$

где коэффициенты определены равенствами

$$a = \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - \\ - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \mathbf{C}^T \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - r^2, \\ b = 2a, \quad c = a + g, \quad g = \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C}.$$

Доказательство: Функция Лагранжа для задачи (1) имеет вид

$$L = \|\mathbf{x}\|^2 + \lambda_0^T (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) + \lambda \left((\mathbf{x} - \mathbf{C})^T (\mathbf{x} - \mathbf{C}) - r^2 \right). \quad (4)$$

Необходимые условия для функции (4) имеют вид приравненных к нулю производных функции Лагранжа по всем аргументам:

$$L'_x = 2\mathbf{x} + \mathbf{A}^T \lambda_0 + 2\lambda (\mathbf{x} - \mathbf{C}) = \mathbf{0}_n; \quad (5)$$

$$L'_{\lambda_0} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b} = \mathbf{0}_m; \quad (6)$$

$$L'_\lambda = (\mathbf{x} - \mathbf{C})^T (\mathbf{x} - \mathbf{C}) - r^2 = 0. \quad (7)$$

Для вычисления множителя Лагранжа λ выполнена подстановка равенства (2) в условие Лагранжа (7). После преобразований указанного условия можно получить квадратное уравнение

$$\left(\mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \lambda (1 + \lambda)^{-1} \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \mathbf{C} \right)^T \times \\ \times \left(\mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \lambda (1 + \lambda)^{-1} \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \mathbf{C} \right) - r^2 = 0. \quad (8)$$

Умножив (8) на $(1 + \lambda)^2$ и выполнив поэлементное умножение, можно получить равенство

$$\mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + 2\lambda \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \\ + \lambda^2 \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - 2\lambda \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - \\ - \lambda^2 \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} + \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \\ - \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - 2\lambda \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \\ - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} + \mathbf{C}^T \mathbf{C} + 2\lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} + \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{C} - \\ - r^2 - 2\lambda r^2 - \lambda^2 r^2 = 0. \quad (9)$$

Преобразование (9) определяет квадратное уравнение

$$\lambda^2 \left(\mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \right. \\ \left. + \mathbf{C}^T \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - r^2 \right) + \lambda \left(2\mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \right. \\ \left. - 2\mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - 2\mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + 2\mathbf{C}^T \mathbf{C} - 2\mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - 2r^2 \right) + \\ + \left(\mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - \right. \\ \left. - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \mathbf{C}^T \mathbf{C} - r^2 \right) = 0. \quad (10)$$

Выполнив замену переменных, можно получить значения коэффициентов

$$a = \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} - \mathbf{b}^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b} + \\ + \mathbf{C}^T \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - r^2, \\ b = 2a, \quad c = a + g, \quad g = \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C}.$$

С учетом полученных коэффициентов уравнение (10) принимает вид

$$a\lambda^2 + b\lambda + c = 0.$$

Лемма доказана.

Решение квадратного уравнения определяет пару множителей Лагранжа для ограничения типа неравенства $\lambda_i, i = 1, 2$, которые в силу утверждения теоремы Куна – Таккера являются положительными ($\lambda_i > 0$) для задачи максимизации и отрицательными ($\lambda_i < 0$) для задачи минимизации:

$$\lambda_{1,2} = \left(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a = \left(-1 \pm \sqrt{g/\alpha} \right).$$

Подстановка множителей Лагранжа λ_i в решение задачи (2) определяет аналитическое решение задачи программной стабилизации динамической системы (1).

Метод синтеза локально допустимых управлений для динамической системы с ограничениями на фазовые координаты и управления

Метод синтеза указанных управлений для задачи стабилизации единственного стационарного положения равновесия или допустимого программного движения $\mathbf{C} = \mathbf{C}_k, k \in N$ определен для объекта, заданного разностным оператором с ограничениями на фазовые координаты и управления.

В результате задача синтеза управлений имеет вид: вычислить обобщенный вектор фазовых координат и управлений как вектор «состояний-управлений»

$$\mathbf{z}_k^* \triangleq (\mathbf{x}_{k+1} | \mathbf{u}_k)^T \in \mathbf{R}^{n+m}$$

для гарантированной стабилизации программного движения объекта, заданного вектор-функцией дискретного времени \mathbf{C}_k . При этом предполагается, что для линейного объекта выполнено ранговое условие управляемости по Р. Калману

$$\text{rang } \mathbf{S} = \text{rang} \left[\mathbf{F} | \mathbf{H}\mathbf{F} | \mathbf{H}^2\mathbf{F} | \dots | \mathbf{H}^{n-1}\mathbf{F} \right] = n, n = \dim \mathbf{R}^n.$$

Для нелинейного разностного объекта, локально управляемого по Н. Н. Петрову, требуется существование такой окрестности начала координат в пространстве \mathbf{R}^n , из каждой точки которой можно перевести объект в положение $\mathbf{x} = 0$ с помощью измеримого управления за конечное время [14–17].

Пусть нелинейный стационарный локально управляемый объект определен разностным оператором

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{H}(\mathbf{x}_k) \mathbf{x}_k + \mathbf{F} \mathbf{u}_k; \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{c}_y \mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k_0} = \mathbf{x}_0 \in \mathbf{D}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^n$ – область притяжения как множество начальных состояний, из которых система возвращается в положение равновесия. Векторы и матрицы оператора (11) имеют вид $\mathbf{x}_{k+1} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}_k \in \mathbf{D} \subset \mathbf{R}^n, \mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^j, \mathbf{u}_k \in \mathbf{R}^m, \mathbf{F} \in \mathbf{R}^{n \times m}, \mathbf{c} \in \mathbf{R}^{j \times n}; \mathbf{H}(\mathbf{x}_k) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ – матричный билинейный оператор размера $(n \times n), \mathbf{H}(0) \neq 0$.

С учетом оператора (11) линейное многообразие для задачи конечномерной операторной оптимизации запишется в виде

$$\mathbf{A} \mathbf{z}_k = \left[\mathbf{E} | -\mathbf{F} \right] \times \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k) \mathbf{x}_k = \mathbf{b}_k, \quad (12)$$

где матрица линейного многообразия в (1) с учетом оператора объекта примет вид

$$\mathbf{A} = \left[\mathbf{E} | -\mathbf{F} \right] \in \mathbf{R}^{n \times (n+m)},$$

вектор «состояний-управлений» определен равенством

$$\mathbf{z}_k = \left[\mathbf{x}_{k+1} | \mathbf{u}_k \right]^T \in \mathbf{R}^{(n+m)},$$

вектор правой части линейного многообразия

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k) \mathbf{x}_k \in \mathbf{R}^n.$$

Таким образом, представление разностного оператора объекта в виде линейного многообразия (12) позволяет синтезировать локально допустимые управления путем сведения задачи вычисления управлений к счетному числу задач проекционной операторной оптимизации.

Задача вычисления локально допустимых управлений для дискретного объекта задана конечномерной задачей операторной оптимизации, что позволяет вычислить счетное число векторов «состояний-управлений» с обратной связью. В силу сказанного структура оператора допустимых управлений определена проекционным оператором конечномерной оптимизации (2). С учетом (12) задача конечномерного математического программирования (1) преобразуется к задаче вида: вычислить «обобщенный» вектор «состояний-управлений»

$$\mathbf{z}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1}^* \\ \mathbf{u}_k^* \end{bmatrix} = \arg \min \left\{ \varphi(\mathbf{z}) = \|\mathbf{z}_k\|^2 \mid \mathbf{A}\mathbf{z}_{k+1} = [\mathbf{E} \mid -\mathbf{F}] \times \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{u}_k \end{bmatrix} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k = \right. \\ \left. = \mathbf{b}_k, [\mathbf{z}_k - \mathbf{C}_k]^T \times [\mathbf{z}_k - \mathbf{C}_k] \leq r^2 \right\} \in \mathbf{R}^{m+n}, k \in \mathbf{N}. \quad (13)$$

В результате из (13) определяется счетное множество решений задач математического программирования

$$\mathbf{z}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1}^* \\ \mathbf{u}_k^* \end{bmatrix}^T \in \mathbf{R}^{n+m}, k \in \mathbf{N}, \quad (14)$$

которое определяет векторы «состояний-управлений»

$$\hat{\mathbf{z}}_k = \hat{\mathbf{z}}_k(\mathbf{x}_k, \sigma_1, \sigma_2, \theta)$$

как образы выпуклой линейной комбинации двух «граничных операторов»

$$\hat{\mathbf{z}}_k(\mathbf{x}_k, \sigma_1, \sigma_2, \theta) = \theta \mathbf{z}_k^*(\sigma_1) + (1 - \theta) \mathbf{z}_k^*(\sigma_2), \theta \in [0; 1] \subset \mathbf{R}, \mathbf{z}_k^*(\sigma_i) = \mathbf{P}^+ \mathbf{b}_k + \sigma_i \mathbf{P}^0 \mathbf{C} \quad (15)$$

с «параметром допустимости» $\theta \in [0; 1]$ и значениями коэффициентов

$$\alpha_k = \mathbf{b}_k^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{C} - \mathbf{b}_k^T (\mathbf{P}^+)^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b}_k + \mathbf{C}^T \mathbf{P}^+ \mathbf{b}_k + \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C} - \mathbf{C}^T \mathbf{C} + r^2, \quad g = \mathbf{C}^T \mathbf{P}^0 \mathbf{C}, \quad \sigma_1 = 1 - \sqrt{\alpha/g}, \quad \sigma_2 = 1 + \sqrt{\alpha/g}.$$

Векторы $\hat{\mathbf{z}}_k = \hat{\mathbf{z}}_k(\mathbf{x}_k, \sigma_1, \sigma_2, \theta)$ проекционного оператора (15) включают «фильтруемые» с помощью матриц

$$\mathbf{T}_u = [0_{m \times n} \mid \mathbf{E}_{m \times m}], \quad \mathbf{T}_x = [\mathbf{E}_{n \times n} \mid 0_{n \times m}]$$

векторы управлений \mathbf{u}_k и векторы прогнозов координат \mathbf{x}_{k+1} , которые являются решениями счетного числа задач математического программирования (13), (14).

В результате из соотношений (11)–(15) следует оператор динамической системы с проекционно-операторной обратной связью для задач стабилизации программных движений с ограничениями на векторы фазовых координат и управлений

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \gamma \mathbf{F} \mathbf{T}_u \hat{\mathbf{z}}_k(\mathbf{x}_k, \sigma_1, \sigma_2, \theta), \\ \hat{\mathbf{z}}_k(\mathbf{x}_k, \sigma_1, \sigma_2, \theta) = \left[\theta (\mathbf{P}^+ \mathbf{b}_k + \sigma_1 \mathbf{P}^0 \mathbf{C}) + (1 - \theta) (\mathbf{P}^+ \mathbf{b}_k + \sigma_2 \mathbf{P}^0 \mathbf{C}) \right], \theta \in [0; 1] \subset \mathbf{R}, \quad (16)$$

где $\gamma \in \mathbf{R}$ – параметр проекционно-операторной обратной связи; $\sigma_1 = 1 - \sqrt{\alpha/g}$; $\sigma_2 = 1 + \sqrt{\alpha/g}$.

Вычислительный эксперимент

Далее приведены результаты вычислительного эксперимента на основе синтезированного оператора динамической системы с ограничениями на фазовые координаты и управления (16).

В качестве примера динамического объекта использована математическая модель синхронного генератора, состоящая из системы билинейных дифференциальных уравнений с параметрами, соответствующими уравнениям в форме В. А. Веникова [18] в фазовом пространстве координат:

- для электромагнитных процессов как подсистемы уравнений объекта на основе дифференциальных уравнений Горева – Парка;
- для электромеханических процессов как подсистемы уравнения моментов.

При вычислении относительных значений функциональной и числовой матриц нелинейного локально управляемого динамического объекта использованы технические параметры синхронного турбогенератора ТВВ-500-2 [19].

Используя результаты, полученные в [20], векторно-матричную модель синхронного генератора в форме Коши представим в виде

$$\begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \\ i'_f \\ i'_{rd} \\ i'_{rq} \\ \omega' \\ \varphi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,59 & 10,58\omega & -0,08 & -1,03 & -4,13\omega & 0 & 0 \\ -6,78\omega & -2,3 & 2,65\omega & 2,65\omega & -2,44 & 0 & 0 \\ -1,39 & 4,09\omega & -1,58 & 3,61 & -1,6\omega & 0 & 0 \\ -6,93 & 20,44\omega & 1,38 & -6,25 & -7,98\omega & 0 & 0 \\ -14,79\omega & -5,01 & 5,78\omega & 5,78\omega & -6,25 & 0 & 0 \\ 128i_q & -128i_d & -50i_q & -50i_q & 50i_d & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4,132 & 0 & 0,079 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2,647 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1,596 & 0 & 1,582 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7,982 & 0 & -1,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5,777 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \\ M_{mx} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

При проведении вычислительного эксперимента параметр $\theta = 0,5009$, $r = 1$, а параметр проекционно-операторной обратной связи $\gamma = -0,015$. Обобщенный вектор стабилизируемых допустимых программных движений и управлений, задающий ограничения на фазовые координаты и управления, определен равенством

$$\mathbf{C}_k = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1,001 \ 0 \ | \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,03 \ 0]^T \in \mathbf{R}^{14}$$

и в соответствии со структурой модели синхронного турбогенератора (17) ограничивает частоту ω и механический момент M_{mx} . Для вычисления напряжений u_d и u_q использована приближенная модель нагрузки [21].

В качестве инструментальной платформы для исследования динамической системы (16) и векторно-матричной модели синхронного генератора (17) использована среда динамического моделирования технических систем SimInTech от российского разработчика «ЗВ Сервис» [22].

С учетом структуры линейного многообразия (12) и векторно-матричной модели синхронного турбогенератора ТВВ-500-2 (17) вычисленный проектор на линейное многообразие имеет следующий вид:

$$\mathbf{P}^0 = \begin{bmatrix} 0,25 & 0 & 0,26 & 0,33 & 0 & 0 & 0 & -0,06 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,17 & 0 & 0 & 0,37 & 0 & 0 & 0 & -0,06 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,26 & 0 & 0,68 & -0,08 & 0 & 0 & 0 & -0,06 & 0 & 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,33 & 0 & -0,08 & 0,84 & 0 & 0 & 0 & -0,08 & 0 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,37 & 0 & 0 & 0,81 & 0 & 0 & 0 & -0,14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,06 & 0 & -0,06 & -0,08 & 0 & 0 & 0 & 0,014 & 0 & -0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,06 & 0 & 0 & -0,14 & 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0,38 & -0,13 & 0 & 0 & 0 & -0,02 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Проектор на ортогональное дополнение к линейному многообразию определен равенством

$$P^+ = \begin{pmatrix} 0,75 & 0 & -0,26 & -0,33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,83 & 0 & 0 & -0,37 & 0 & 0 \\ -0,26 & 0 & 0,32 & 0,08 & 0 & 0 & 0 \\ -0,33 & 0 & 0,08 & 0,16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,37 & 0 & 0 & 0,19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,06 & 0 & 0,06 & 0,08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,06 & 0 & 0 & 0,14 & 0 & 0 \\ -0,1 & 0 & -0,38 & 0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

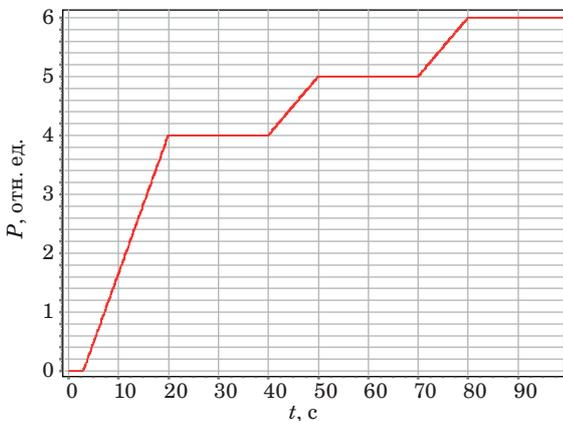
График изменения мощности в относительных единицах для синхронного генератора иллюстрирует кусочно-линейный характер с постоянными интервалами (рис. 1).

С учетом изменения мощности и заданных ограничений на фазовые координаты и управление динамика множителя Лагранжа для ограничений типа неравенства для системы (20) иллюстрируется на рис. 2.

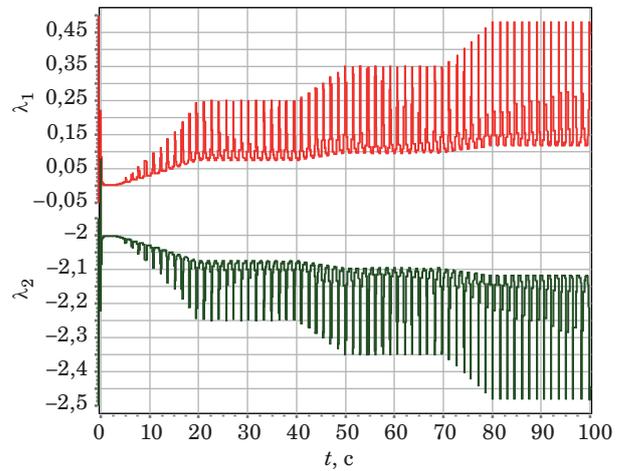
Локально допустимые управления u_f и M_{mx} , определенные оператором (16) с ограничением, заданным вектором допустимых программных движений C_k , имеют вид, представленный на рис. 3.

Изменения ограниченных фазовых координат динамической системы (16) с «графиком нагрузки» (см. рис. 1) показаны на рис. 4 и 5.

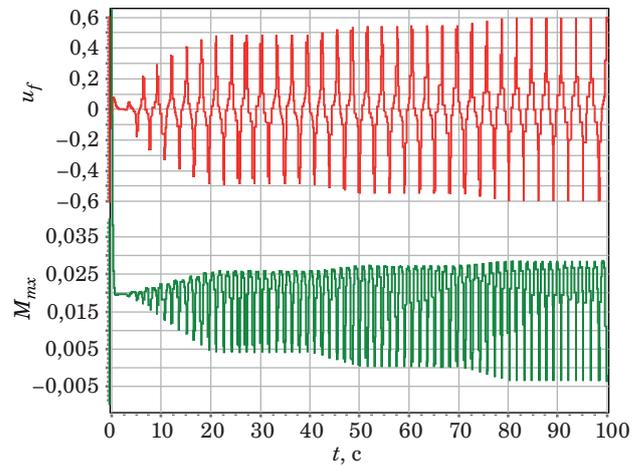
Из рис. 5 видно, что значение частоты ω , с учетом изменения мощности, соответствует допустимому вектору программных движений C_k и не превышает заданных ограничений 1,001.



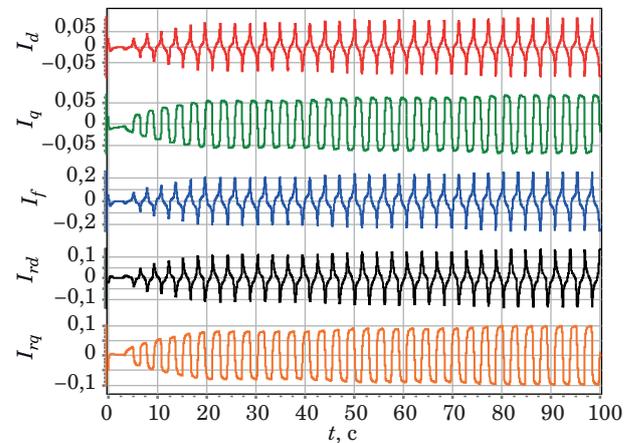
■ **Рис. 1.** Изменение мощности синхронного генератора
 ■ **Fig. 1.** Change in the power of a synchronous generator



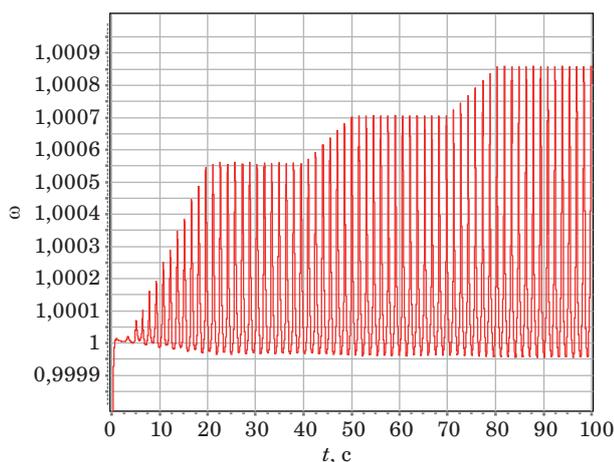
■ **Рис. 2.** Динамика пары множителей Лагранжа $\lambda \in \mathbf{R}$
 ■ **Fig. 2.** Dynamics of a pair of Lagrange multipliers $\lambda \in \mathbf{R}$



■ **Рис. 3.** Синтезированные ограниченные управляющие воздействия синхронного генератора (16)
 ■ **Fig. 3.** Synthesized limited control actions of a synchronous generator (16)



■ **Рис. 4.** Динамика токов синхронного генератора
 ■ **Fig. 4.** The dynamics of the currents of the synchronous generator



■ **Рис. 5.** Динамика допустимого ограниченного изменения «частоты» ω синхронного генератора, заданного вектором программных движений C_k

■ **Fig. 5.** Dynamics of the permissible limited change in the “frequency” ω of the synchronous generator, given by the vector of program movements C_k

Литература

- Vorob'ev E. I., Mikheev A. V., Morgunenko K. O.** Construction of program motions of relative manipulation mechanisms with three degrees of freedom. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2019, no. 6, pp. 510–516. doi:10.3103/S1052618819060104
- Мещанов А. С., Бикмурзин А. М.** Стабилизация программной посадки летательных аппаратов без шасси на подвижную платформу в атмосфере при неопределенных возмущениях. Ч. 1. *Вестник технологического университета*, 2020, т. 23, № 12, с. 109–117.
- Alekseev A., Stukonog S.** An algorithm for constructing an optimal ship's path with elements of the ship's program motion systems on the course. *Transp. Bus. Russ.*, 2022, № 2, pp. 217–221. doi:10.52375/20728689_2022_2_217/issn2072-8689
- Голубев А. Е.** Стабилизация программных движений механических систем с учетом ограничений. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*, 2023, № 4, с. 153–167. doi:10.31857/S0002338823040054
- Sachan K., Padhi R.** Lyapunov function based output-constrained control of nonlinear Euler–Lagrange systems. *15th Intern. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, IEEE, Singapore, November 18–21, 2018, 2018, pp. 686–691. doi:10.1109/ICARCV.2018.8581068
- Wang X., Xu J., Lv M., Zhang L., Zhao Z.** Barrier Lyapunov function-based fixed-time FTC for high-order nonlinear systems with predefined tracking accuracy. *Nonlinear Dyn.*, 2022, vol. 110, no. 1, pp. 381–394. doi:10.1007/s11071-022-07627-9/issn0924-090X
- Голубев А. Е.** Построение программных движений механических систем с учетом ограничений при помощи многочленов третьего порядка. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*, 2021, № 2, с. 126–137. doi:10.31857/S0002338820060049/issn0002-3388
- Kozlov V. N., Efremov A. A.** Operators of bounded locally optimal controls for dynamic systems. *Lect. Notes Networks Syst. Springer*, 2020, vol. 95, pp. 140–145. doi:10.1007/978-3-030-34983-7_14
- Kozlov V. N., Efremov A. A.** Projection-operator optimization of controls of dynamic objects. *J. Phys. Conf., Ser. IOP Publishing Ltd*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 140–145. doi:10.1088/1742-6596/1864/1/012076/issn17426596
- Александров О. В., Козик А. А.** Минимаксная оптимизация параметров стабилизации программного полета. *Вестник Московского университета. Сер. 1. Математика. Механика*, 2019, т. 3, с. 45–49.
- Andreev A. S., Kolegova L. V.** PID controllers with delay in a problem of stabilization of robotic manipulators' desired motions. *Zhurnal Sredn. Mat. Obs.*, 2022, vol. 34, no. 3, pp. 267–279. doi:10.15507/2079-6900.24.202203.267-279/issn20796900
- Котина Е. Д., Овсянников Д. А.** Математическая модель совместной оптимизации программного и возмущенных движений в дискретных системах. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*, 2021, т. 17, № 2, с. 213–224. doi:10.21638/11701/spbu10.2021.210
- Козлов В. Н.** *Проекционный метод синтеза ограниченных оптимальных управлений динамических систем энергетики*. СПб., Изд-во Политех. ун-та, 2019. 161 с. doi:10.18720/SPBPU/2/i19-277

Заключение

В работе синтезирован оператор динамической системы с проекционно-операторной обратной связью для вычисления управлений и стабилизации программных движений динамической системы с проекционно-операторной обратной связью для локально допустимого программного управления с ограничениями на фазовые координаты и управления.

На примере модели синхронного генератора, состоящей из системы билинейных дифференциальных уравнений, с параметрами, соответствующими уравнениям в форме В. А. Веникова, показана возможность применения предложенной методики для синтеза ограниченных управлений электроэнергетическими системами с проекционными операторами управления.

14. Kalman R. E. Discussion: "On the Existence of Optimal Controls" (Markus L., and Lee E. B. ASME J. Basic Eng., 1962, 84, pp. 13–20). *J. Fluids Eng.*, 1962, vol. 84. <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluid-engineering/article/84/1/21/424598/Discussion-On-the-Existence-of-Optimal-Controls> (дата обращения: 30.05.2023).
15. Петров Н. Н. Об управляемости автономных систем. *Дифференциальные уравнения*, 1968, т. 4, № 4, с. 606–617.
16. Аваков Е. Р., Магарил-Ильяев Г. Г. Локальная управляемость и оптимальность. *Математический сборник*, 2021, т. 212, № 7, с. 3–38. doi:0.4213/sm9434
17. Аваков Е. Р., Магарил-Ильяев Г. Г. Управляемость и необходимые условия оптимальности второго порядка. *Математический сборник*, 2019, т. 210, № 1, с. 3–26. doi:10.4213/sm9013
18. Веретенников Л. П. Классификация уравнений Горева – Парка. *Электричество*, 1959, № 11, с. 13–20.
19. Неклепаев Б. Н. *Электрическая часть электростанций и подстанций*. 2-е изд. М., Энергоатомиздат, 1986. 640 с.
20. Козлов В. Н., Рябов Г. А., Ефремов А. А., Тросько И. У. Структурно-инвариантные уравнения энергообъединений для синтеза систем ограничения перетоков и регулирования напряжения. *XIX Междунар. науч.-практ. конф. «Системный анализ в проектировании и управлении»*, Санкт-Петербург, 1–3 июля 2015 г., 2015, с. 207–217.
21. Леонов Г. А., Кузнецов Н. В., Андриевский Б. Р., Юлдашев М. В., Юлдашев Р. В. Математическое моделирование переходных процессов гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС. *Дифференциальные уравнения и процессы управления*, 2018, т. 4, № 4. <https://diffjournal.spbu.ru/RU/numbers/2018.4/article.1.5.html> (дата обращения: 25.05.2023).
22. Карташов Б. А., Шабаев Е. А., Козлов О. С., Щекатуров А. М. *SimInTech: среда динамического моделирования технических систем*. М., ДМК Пресс, 2017. 424 с.

UDC 681.51

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-47-55

EDN: DYULZH

Method of synthesis of locally permissible limited controls for the stabilization of program motions of dynamic objects

A. A. Efremov^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-0224-2412V. N. Kozlov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-1552-8097, kozlov_vn@spbstu.ru^aPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The synthesis of systems for the stabilization of program motions of objects is an urgent task of control theory. Projection operator methods of mathematical programming are adequate methods of control synthesis for this class of problems. **Purpose:** To develop methods of synthesis of locally admissible controls for the stabilization of program motions of nonlinear dynamic objects under restrictions on the phase coordinates and controls. **Results:** We propose a projection control operator for stabilization systems of program motions or equilibrium positions is proposed, using the boundary values of a pair of Lagrange multipliers to limit the type of inequality, a countable number of finite-dimensional mathematical programming problems. We synthesize admissible controls for nonlinear locally controlled difference operators, that stabilize program motions under restrictions on phase coordinates and controls. As a result, we have obtained an operator of a dynamical system with projection operator feedback for the tasks of stabilization of program motions with restrictions on the vectors of phase coordinates and controls. We use a mathematical model of a synchronous generator as a dynamic object, for a computational experiment with a synthesized operator. The mathematical model consists of a system of bilinear differential equations with parameters corresponding to the equations in the form elaborated by V. A. Venikov. The computational experiment confirmed the theoretical generalizations obtained in the work. **Practical relevance:** The developed methods generalize the formulations of control synthesis problems for stabilizing program motions or equilibrium positions of nonlinear control systems with restrictions on phase coordinates and controls. The development of the projection operator method of finite-dimensional optimization is of great practical importance for the synthesis of controls for complex dynamic systems, including the control of the joint dynamics of electromechanical and electromagnetic processes in large energy associations such as the Unified Electric Power System of the Russian Federation.

Keywords — dynamical systems, projection operators, optimization, stabilization of program motions, nonlinear difference operator, locally admissible controls, restrictions on phase coordinates and controls, synchronous generator, mathematical model, SimInTech.

For citation: Efremov A. A., Kozlov V. N. Method of synthesis of locally permissible limited controls for the stabilization of program motions of dynamic objects. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 47–55 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-47-55, EDN: DYULZH

References

- Vorob'ev E. I., Mikheev A. V., Morgunenko K. O. Construction of program motions of relative manipulation mechanisms with three degrees of freedom. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2019, no. 6, pp. 510–516. doi:10.3103/S1052618819060104
- Meshchanov A. S., Bikmurzin A. M. Stabilization of programmed landing of aircraft without chassis on mobile platform in atmosphere under uncertain perturbations: Part 1. *Herald of Technological University*, 2020, vol. 23, no. 12, pp. 109–117 (In Russian).

3. Alekseev A., Stukonog S. An algorithm for constructing an optimal ship's path with elements of the ship's program motion systems on the course. *Transp. Bus. Russ.*, 2022, no. 2, pp. 217–221. doi:10.52375/20728689_2022_2_217/issn2072-8689
4. Golubev A. E. Stabilization of programmed motions of mechanical systems subject to constraints. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2023, no. 4, pp. 153–167 (In Russian). doi:10.31857/S0002338823040054
5. Sachan K., Padhi R. Lyapunov function based output-constrained control of nonlinear Euler–Lagrange systems. *15th Intern. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, IEEE, Singapore, November 18–21, 2018, 2018, pp. 686–691. doi:10.1109/ICARCV.2018.8581068
6. Wang X., Xu J., Lv M., Zhang L., Zhao Z. Barrier Lyapunov function-based fixed-time FTC for high-order nonlinear systems with predefined tracking accuracy. *Nonlinear Dyn.*, 2022, vol. 110, no. 1, pp. 381–394. doi:10.1007/s11071-022-07627-9/issn0924-090X
7. Golubev A. E. Construction of programmed motions of constrained mechanical systems using third-order polynomials. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, no. 2, pp. 303–314 (In Russian). doi:10.31857/S0002338820060049/issn0002-3388
8. Kozlov V. N., Efremov A. A. Operators of bounded locally optimal controls for dynamic systems. *Lect. Notes Networks Syst.*, Springer, 2020, vol. 95, pp. 140–145. doi:10.1007/978-3-030-34983-7_14
9. Kozlov V. N., Efremov A. A. Projection-operator optimization of controls of dynamic objects. *J. Phys. Conf. Ser.: IOP, Publishing Ltd*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 140–145. doi:10.1088/1742-6596/1864/1/012076/issn17426596
10. Aleksandrova O. V., Kozik A. A. Minimax optimization of stabilization parameters during the programmed flight. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2019, vol. 74, no. 3, pp. 55–59 (In Russian). doi:10.3103/S0027133019030014
11. Andreev A. S., Kolegova L. V. PID controllers with delay in a problem of stabilization of robotic manipulators' desired motions. *Zhurnal Sredn. Mat. Obs.*, 2022, vol. 34, no. 3, pp. 267–279. doi:10.15507/2079-6900.24.202203.267-279/issn20796900
12. Kotina E. D., Ovsyannikov D. A. Mathematical model of joint optimization of program and perturbed motions in discrete systems. *Vestnik of Saint Petersburg University Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 213–224 (In Russian). doi:10.21638/11701/spbu10.2021.210
13. Kozlov V. N. *Proyektionnyy metod sinteza ogranichennykh optimal'nykh upravleniy dinamicheskikh sistem energetiki* [Projection method for the synthesis of bounded optimal controls of dynamic energy systems]. Saint-Petersburg, Polytekhnicheskij universitet Publ., 2019. 161 p. (In Russian).
14. Kalman R. E. Discussion: "On the Existence of Optimal Controls" (Markus L., and Lee E. B., 1962, ASME J. Basic Eng., 84, pp. 13–20). *J. Fluids Eng.*, 1962, vol. 84. Available at: <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article/84/1/21/424598/Discussion-On-the-Existence-of-Optimal-Controls> (accessed 30 May 2023).
15. Petrov N. N. Controllability of autonomous systems. *Differentsial'nye Uravneniya*, 1968, vol. 4, no. 4, pp. 606–617 (In Russian).
16. Avakov E. R., Magaril-II'yaev G. G. Local controllability and optimality. *Sbornik: Mathematics*, 2021, vol. 212, no. 7, pp. 3–38 (In Russian). doi:0.4213/sm9434
17. Avakov E. R., Magaril-II'yaev G. G. Controllability and second-order necessary conditions for optimality. *Sbornik: Mathematics*, 2019, vol. 210, no. 1, pp. 3–26 (In Russian). doi:10.4213/sm9013
18. Veretennikov L. P. Classification of the Gorev – Park equations. *Elektrichestvo*, 1959, no. 11, pp. 13–20 (In Russian).
19. Neklepaev B. N. *Elektricheskaya chast' elektrostantsiy i podstantsiy*. 2-ye izd. [Electrical part of power stations and substations. 2nd ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 640 p. (In Russian).
20. Kozlov V. N., Ryabov G. A., Efremov A. A., Trosko I. U. Structural-invariant equations of power interconnections for the synthesis of systems for limiting flows and voltage regulation. *XIX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sistemnyy analiz v proyektirovanii i upravlenii"* [XIX Intern. Scient. and Pract. Conf. "System Analysis in Design and Management"]. Saint-Petersburg, 2015, pp. 207–217 (In Russian).
21. Leonov G. A., Kuznetsov N. V., Andrievsky B. R., Yuldashev M. V., Yuldashev R. V. Mathematical modeling of transients of the hydraulic unit of the Sayano-Shushenskaya HPP. *Differential Equations and Control Processes*, 2018, vol. 4. Available at: <https://diffjournal.spbu.ru/EN/numbers/2018.4/article.1.5.html> (accessed 25 May 2023) (In Russian).
22. Kartashov B. A., Shabaev E. A., Kozlov O. S., Shchekaturov A. M. *SimInTech: sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem* [SimInTech: Environment for Dynamic Simulation of Technical Systems]. Moscow, DMK Press Publ., 2017. 424 p. (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>



Применение машинного обучения при анализе ЭЭГ для выявления фобической реакции в виртуальной реальности

А. Д. Обухов^а, доктор техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-3450-5213, obuhov.art@gmail.com

И. Л. Коробова^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0006-5429-6339

А. О. Назарова^а, инженер-программист, orcid.org/0000-0002-4741-1451

Д. В. Зайцева^а, аспирант, orcid.org/0000-0001-9488-0835

^аТамбовский государственный технический университет, Советская ул., 106, Тамбов, 392000, РФ

Введение: технологии виртуальной реальности применяются для моделирования различных воздействий на человека, включая стрессовые. Для объективной диагностики предрасположенности человека к фобиям с использованием виртуальной реальности помимо субъективной оценки врача-специалиста требуется разработка методов, основанных на объективной обработке медицинских данных. **Цель:** разработать подход к классификации медицинских данных электроэнцефалограмм, основанный на технологиях машинного обучения, позволяющий повысить точность определения фобической реакции при воздействии виртуальной реальности. **Методы:** поставлена задача выбора оптимального алгоритма машинного обучения для классификации данных электроэнцефалограмм (общий объем – 3996 односекундных фрагментов), полученных с группы из 15 здоровых испытуемых, не имеющих явно выраженной акрофобии, на наличие или отсутствие реакции в лобных и затылочных долях головного мозга при воздействии фобии. Предложено несколько архитектур нейронных сетей, основанных на сверточных слоях и слоях многоголового внимания (Transformer). **Результаты:** проведены сбор и анализ медицинских данных с электроэнцефалографа участников контрольной группы, которые выполняли упражнение на боязнь высоты в виртуальной реальности. В рамках поставленной задачи выбора алгоритма машинного обучения подобраны параметры алгоритмов машинного обучения (количество и глубина оценщиков, скорость обучения), а также спроектированы две модифицированные модели сверточных нейронных сетей. Для обработки собранных и размеченных фрагментов данных электроэнцефалограмм использовались различные алгоритмы машинного обучения: деревья решений, случайный лес, AdaBoostClassifier, сверточная нейронная сеть и сеть архитектуры Transformer. В ходе тестирования наилучшие результаты показали сверточные нейронные сети (при анализе двух лобных каналов точность 98 %) и сети Transformer (при обработке всех каналов точность 97,4 %). **Практическая значимость:** результаты исследований позволяют сделать выводы об эффективности сверточных нейронных сетей и сетей Transformer при обработке медицинских данных электроэнцефалограмм. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать выявление фобических реакций при воздействии виртуальной реальности.

Ключевые слова – машинное обучение, виртуальная реальность, фобические расстройства, выявление, электроэнцефалография, обработка данных, сверточные нейронные сети.

Для цитирования: Обухов А. Д., Коробова И. Л., Назарова А. О., Зайцева Д. В. Применение машинного обучения при анализе ЭЭГ для выявления фобической реакции в виртуальной реальности. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 4, с. 56–70. doi:10.31799/1684-8853-2023-4-56-70, EDN: DJQEDW

For citation: Obukhov A. D., Korobova I. L., Nazarova A. O., Zajceva D. V. Application of machine learning in EEG analysis to detect phobic reactions in virtual reality. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 56–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-56-70, EDN: DJQEDW

Введение

Тревожно-фобические расстройства – это группа расстройств, в клинической картине которых преобладают тревога, страх определенных ситуаций или объектов (внешних по отношению к субъекту) [1]. Не существует общепринятых стандартизированных методов для работы с подобными пациентами, потому что причины появления фобических расстройств у человека связаны с биологическими особенностями, темпераментом, когнитивным стилем, системой воспитания, опытом отношений и т. д. [2, 3]. Таким образом, необходимо подстраивать курс лечения индивидуально под каждого пациента.

Предварительная диагностика человека в контролируемых условиях позволяет оценить его профпригодность к деятельности, предполагающей наличие стрессовых ситуаций (например, промышленный альпинизм, пожарные, шахтерские, спасательные работы и т. д.), так как внезапная фобическая реакция в производственных условиях может как привести к прогнозируемым последствиям для самого человека [4–7], так и повлечь угрозу для жизни и здоровья окружающих, риск возникновения чрезвычайных ситуаций.

Получение реакции тревоги возможно только в условиях, максимально приближенных к реальным. Для имитации фобических стиму-

лов обосновано применение технологий виртуальной реальности (VR; Virtual Reality – VR), которые позволяют моделировать стрессовые условия, воздействуя на органы чувств. Данная технология также является полезной в случаях, когда воспроизведение стрессовой ситуации в реальных условиях невозможно [1, 8].

Виртуальная реальность является уникальным программно-аппаратным инструментом для создания новых методик и систем для диагностики и лечения целого ряда психоэмоциональных расстройств, поскольку позволяет моделировать различные виртуальные пространства. Системы VR становятся средой, где пациент может столкнуться с проблемой, которую возможно решить не только посредством общения с врачами, но и самостоятельно в симуляции с хорошо контролируемыми сенсорными стимулами [1].

При воздействии VR на испытуемого необходимо зафиксировать наличие или отсутствие у него соответствующей реакции на источник фобии. Классическим подходом является анкетирование, т. е. применение различного рода опросников для оценки уровня воздействия VR на человека во время или после прохождения виртуальной сцены [9]. Однако при анализе полученных после опроса данных следует учитывать субъективность человеческого восприятия цифровой среды, особенно при проведении опроса после снятия человеком VR-гарнитуры. Проблема с субъективными измерениями заключается в том, что они сообщаются самими людьми и, следовательно, когнитивно опосредованы, что приводит к искажениям статистических данных и снижает их достоверность [10]. Кроме того, участники могут избегать значений шкалы опросника или отвечать чрезмерно позитивно/негативно.

Поэтому для оценки воздействия VR, особенно в случае неврологических расстройств, следует применять объективные методы. К объективным подходам оценки взаимодействия с VR относятся физиологические, поведенческие методы и показатели выполнения задач.

Физиологические методы основаны на измерении различных физиологических сигналов, таких как электрокардиография (ЭКГ), электроэнцефалография (ЭЭГ) и кожно-гальваническая реакция [11]. Необходимо отметить, что достаточно сложно адекватно распознавать эмоциональное состояние пользователя, основываясь только на физиологических показателях, поскольку разные состояния могут быть обозначены очень похожими физиологическими симптомами [12]. Некоторые методы измерения физиологических сигналов (ЭЭГ) чувствительны к шуму, создаваемому движением головы [13], а более точные (например, функциональная магнитно-резонанс-

ная томография) не предполагают совместное использование с электронными устройствами.

Поведенческие методы относятся к методам, основанным на наблюдении и отслеживании поведения пользователя, такого, как физическое движение или социальное взаимодействие [10]. Отслеживая резкие перемещения тела, головы, глаз или определенные социальные паттерны действий в VR, можно классифицировать состояние человека и его реакцию на раздражитель в VR. В случае фобий данное направление требует наличия стороннего наблюдателя или продвинутого программного обеспечения для верификации физических или социальных действий как последствий воздействия источника фобии, а не запланированного заранее паттерна.

Третье направление включает такие метрики оценки, как время выполнения задач, количество ошибок, точность взаимодействия и т. д. [14]. Тогда уровень воздействия виртуального источника фобии будет характеризоваться указанными количественными метриками, так как выраженность тревожно-фобического расстройства будет напрямую оказывать влияние на эффективность выполняемых действий.

Таким образом, проведенный анализ показывает необходимость использовать объективные методы оценки состояния человека после воздействия на него VR для выявления фобической реакции. Под фобической реакцией в рамках данного исследования будем понимать условно патологические паттерны в зрительных и вестибулярных зонах, а также их влияние на лобные доли головного мозга. Актуальность данного исследования заключается в повышении точности классификации медицинских данных ЭЭГ за счет разработки новых моделей машинного обучения или совершенствовании существующих подходов. В рамках данного исследования в качестве исходных данных предлагается использовать электроэнцефалограммы, полученные в процессе взаимодействия с виртуальной сценой, содержащей источник фобии.

Применение VR для формирования фобической реакции

Для формирования фобической реакции необходимо воздействие VR на органы чувств человека. Обратимся к источникам, анализирующим существующие исследования в этой области.

В работе [15] исследовалась реакция испытуемых на стимулы, вызывающие страх высоты посредством воздействия VR. После обработки и анализа ЭЭГ-сигналов были определены маркеры, ассоциированные с уровнем тревоги и восприимчивости испытуемого в среде VR. В основе

эксперимента — разработанная виртуальная сцена с размещением пользователя на крыше многоэтажного дома.

Методика применения электроэнцефалографа совместно с устройствами VR используется и в других работах. В исследовании [16] подтверждается, что сигнал ЭЭГ может использоваться для классификации уровня стресса субъекта при использовании VR. В качестве инструмента классификации использовались многослойная нейронная сеть и машина опорных векторов.

Авторы работы [17] проанализировали ЭЭГ-сигналы альфа- и бета-диапазонов и подтвердили гипотезу о терапевтической эффективности преднамеренно созданного виртуального опыта для управления тревогой и снижения стресса. Также стоит отметить, что если после нервно-возбудимой ситуации следовала релаксационная сессия в VR, то седативный эффект обычно появлялся с задержкой 1–2 мин. Подобные результаты с запаздыванием нервного отклика также были зарегистрированы в исследовании [18]. Отмечено, что в зависимости от программного обеспечения и VR-оборудования переходы аффективных состояний могут происходить не быстро и не требовать немедленной обратной связи с пользователем.

Эффективность использования VR для симуляции фобий отмечена в работе [19]. Выявлено, что люди, страдающие фобическим расстройством (например, арахнофобией), гораздо больше концентрировались на деталях объекта-раздражителя (пауках). Авторы также предполагают большую эффективность подхода десенсибили-

зации, при котором детали фобического стимула представляются пользователю постепенно по мере его готовности для лечения тревожно-фобических расстройств.

Таким образом, формирование фобической реакции путем воздействия VR является распространенным и апробированным подходом. Рассмотрим разработанную виртуальную среду (рис. 1), представленную авторами в работе [1], в рамках которой будут осуществляться исследования и сбор медицинских данных. Для повышения адекватности восприятия виртуальной сцены и, следовательно, предлагаемого подхода использовалась максимальная детализация виртуальных объектов, эффекты частиц, освещения, а также моделирование темного времени суток, что позволяет минимизировать аппаратные ограничения шлемов VR и дополнительно повысить реалистичность отображаемых объектов и анимации.

«В начале сцены аватар пользователя появляется в закрытом лифте (рис. 1, этап 1). Каждому пользователю предоставляется некоторое время на адаптацию к виртуальной реальности. Испытуемый может видеть свои руки при наличии контроллеров, однако, это не обязательная опция и имеет значение только как дополнительное усиление эффекта присутствия. Через некоторое время лифт поднимается на верхний этаж, двери открываются, и человек видит перед собой город (рис. 1, этап 2). Данный момент фиксируется как начало сцены. Через некоторое время человек идет к краю доски. На краю доски он должен осмотреться, после этого прыгнуть (рис. 1, этап 3),



■ **Рис. 1.** Ключевые точки в виртуальной сцене: 1 — стартовая точка; 2 — человек на краю доски; 3 — прыжок; 4 — приземление [1]

■ **Fig. 1.** Key points in the virtual scene: 1 — starting point; 2 — man on the edge of the board; 3 — jump; 4 — landing [1]

некоторое время находиться в «цифровом полете» и приземлиться (рис. 1, этап 4), что также фиксируется как аннотация в ЭЭГ файле, где отмечено начало и конец фрагмента прыжка» [1].

Поскольку человек сначала находится в закрытом лифте в темноте и тишине, то основное психологическое воздействие на пользователя оказывается в моменты, когда он может выйти из кабины лифта, рассмотреть вид на здания и дорогу с высоты, услышать звуки города и шум ветра при выходе из лифта и во время падения. Акрофобия основывается на абсолютно естественной и эволюционно возникшей реакции организма на внешние стимулы, которые угрожают его жизни или здоровью. При нахождении на большой высоте и падении человек испытывает воздействие на зрительные отделы мозга, а также вестибулярный аппарат. В рамках текущего исследования не акцентируется внимание на зависимости высоты здания на степень воздействия на мозговую активность, поэтому для создания наиболее сильного впечатления используется выбранное упражнение с падением, чтобы полностью сосредоточить человека на происходящих событиях.

На основе разработанной сцены VR необходимо осуществить сбор и разметку медицинских данных ЭЭГ, после чего решить задачу их классификации. Формализуем основные составляющие данной задачи в общем виде.

Постановка задачи исследования

Обозначим через $x_i \in X$ фрагмент медицинских данных, где X – множество всех фрагментов медицинских данных. Введем следующие обозначения:

- протокол обследования как совокупность множества фрагментов медицинских данных: $X_t \subset X, X_t = \{x_i\}$;

- категория протокола (ЭКГ, ЭЭГ, электромиография и др.): $X_t \rightarrow c_q, c_q \in C, C$ – множество категорий (типов) протоколов;

- категория фрагмента медицинских данных (норма, шум, артефакт, патология и т. д.): $x_i \rightarrow y_j, y_j \in Y, Y$ – множество категорий фрагментов медицинских данных.

В рамках данного исследования рассматриваются только протоколы, полученные с ЭЭГ, что не отменяет возможности анализа данных с различных источников в дальнейшем.

Поскольку виртуальная сцена предполагает, что человеку приходится поворачивать голову, то происходит соответствующее искажение сигнала, что влечет за собой некорректность данных. Артефакты, как правило, усиливаются, когда субъект находится в движении (например,

когда пользователь делает несколько шагов к краю лифта), это означает, что получение надежных данных во время упражнений по своей сути проблематично. Таким образом, в результате этапа фильтрации исходный фрагмент медицинских данных x_i будет обработан фильтром F_k , что приведет к получению отфильтрованных данных, которые будем обозначать как $F_k(x_i)$. При выборе фильтра F_k необходимо учитывать, что фильтрация может серьезно изменить внешний вид сигналов и тем самым повлиять на получаемые результаты. К общепринятым в данной предметной области относятся фильтры нижних и верхних частот, фильтры устранения артефактов и другие, используемые в исследовании фильтры будут рассмотрены далее.

Обозначим через $p(F_k(x_i), y_j)$ вероятность того, что фрагмент медицинских данных x_i относится к категории y_j .

Для автоматизации процесса принятия решений о наличии и отсутствии фобической реакции необходимо реализовать некоторую регрессионную зависимость между исходными данными x_i и соответствующими им категориями y_j . Данная зависимость может быть аппроксимирована с помощью некоторого алгоритма машинного обучения или нейронной сети. Тогда поставим задачу исследования в следующем формализованном виде: необходимо найти оптимальный алгоритм машинного обучения M и его параметры, при которых точность классификации A наличия или отсутствия фобической реакции достигает максимума:

$$A(M) = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где TP – количество истинно положительных результатов, TN – истинно отрицательных, FP – ложноположительных и FN – ложноотрицательных.

Таким образом, точность – это доля правильных ответов алгоритма ($TP + TN$) к общему количеству результатов. Помимо точности, при оценке алгоритмов машинного обучения рекомендуется использовать матрицу ошибок (в которой приводятся по отдельности метрики TP, TN, FP, FN), а также F-меру F_1 для дополнительной верификации результатов:

$$F_1 = 2 \times \frac{\text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}},$$

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad \text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (2)$$

Тогда для успешного решения поставленной задачи необходимо выбрать оптимальный алго-

ритм машинного обучения и его параметры, при которых метрики (1) и (2) достигают максимальных значений.

Процедура сбора экспериментальных данных ЭЭГ

Далее для решения поставленной задачи необходимо найти зависимость между входными данными (фрагментами ЭЭГ) и выходными классами, соответствующими наличию или отсутствию фобической реакции.

Рассмотрим процедуру формирования базы данных медицинских сигналов, зарегистрированных у контрольной группы пользователей в условиях погружения в среду VR.

Для сбора информации о состоянии и реакции человека на события виртуальной сцены использовался электроэнцефалограф компании Neurosoft со следующими характеристиками: 21 канал ЭЭГ, частота дискретизации данных 500 Гц. Для анализа собранных данных применяется программное обеспечение от Neurosoft «Нейрон-Спектр.NET». Монтаж отведений выполнялся в соответствии со схемой «Монокулярный 21».

Сбор информации может производиться в ручном режиме: в этом случае данные записываются с использованием «Нейрон-Спектр.NET» и сохраняются в базе данных, после чего могут быть импортированы в формате TXT, EDF и др. Дальнейшая обработка осуществляется уже с использованием разработанного авторами программного обеспечения для открытия и разметки ЭЭГ в формате EDF на основе библиотек MNE и

PyQt. Вторым вариантом заключается в использовании протокола LSL, позволяющего осуществлять трансляцию данных из «Нейрон-Спектр.NET» в стороннее программное обеспечение в режиме реального времени. Для получения потока информации предлагается использовать библиотеку pylsl (Python), позволяющую организовать подключение к нескольким устройствам, транслирующим поток данных по протоколу LSL.

Схема установки оборудования на человека представлена на рис. 2. Шлем VR был закреплен поверх шлема для снятия ЭЭГ таким образом, чтобы элементы VR-шлема не прерывали контакт электродов ЭЭГ с кожей испытуемого. Для погружения в VR используется шлем HTC Vive Cosmos, не требующий базовых станций. Электроэнцефалограф работает от батареи, сам прибор закрепляется в рюкзаке на спине испытуемого, что исключает натяжение проводов при перемещении, но обеспечивает необходимую мобильность.

Контрольная группа включает 15 человек возрастом от 18 до 25 лет, соотношение мужчин и женщин 11:4 соответственно. В ходе предварительного обследования психологических заболеваний у респондентов не выявлено. Также все участники контрольной группы имеют нормальное зрение. Все исследования были проведены согласно протоколу клинического исследования ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» с привлечением врача функциональной диагностики ОГБУЗ «Тамбовская психиатрическая клиническая больница». Все испытуемые были информированы о цели исследования, подписав информированное согласие.



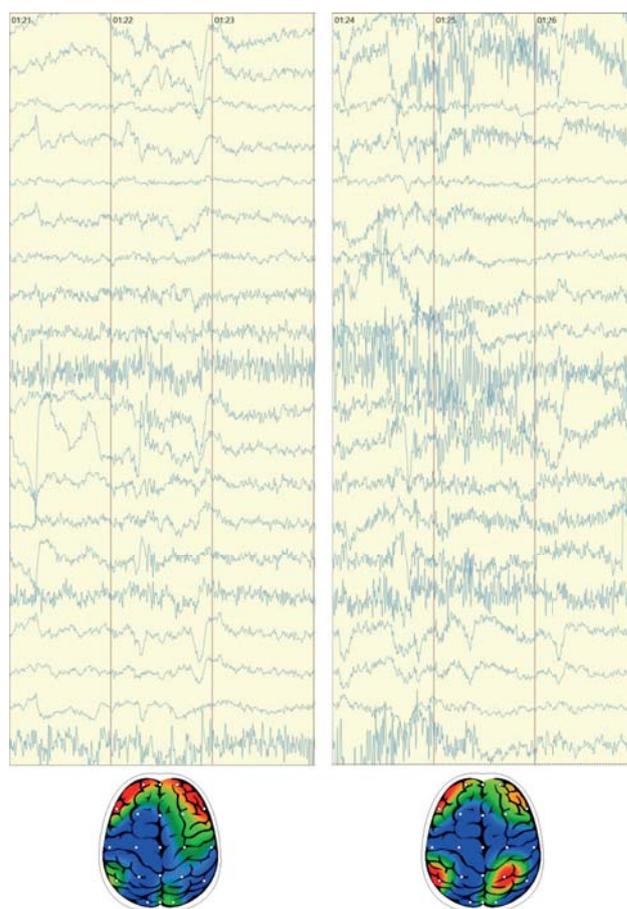
■ **Рис. 2.** Схема установки шлемов VR и ЭЭГ
 ■ **Fig. 2.** Scheme of putting on VR and EEG headsets

Для подготовки моделей машинного обучения использовались данные девяти человек, а для контрольной верификации — фрагменты ЭЭГ оставшихся шести участников, которые не будут участвовать в обучении алгоритмов машинного обучения.

Схема эксперимента имеет следующий вид. В начале любого сценария участники эксперимента по одному были приглашены в помещение. За экспериментом наблюдает врач-невролог и ассистент. На голове участника закрепляли сначала электроды, а потом надевали шлем ВР. До начала эксперимента осуществляется запись эталонных данных ЭЭГ в течение 3 мин в спокойном состоянии без воздействия ВР. Далее человек вставал на стартовую точку, после чего врач начинал эксперимент по выявлению фобической реакции. В ходе прохождения сцены записывались показания электроэнцефалографа, а также фиксировались временные метки с ключевыми событиями сцены.

После записи необходимого объема данных они были переданы врачу-неврологу для анализа и разметки. Пример фрагмента собранных данных после использования фильтра нижних и верхних частот представлен на рис. 3. На фрагменте ЭЭГ за 3 с до падения (слева) ритмическая активность характерна для взрослого бодрствующего человека, распределена зонально верно, патологических паттернов не зафиксировано. Справа отражен сам момент падения и несколько секунд после; после соприкосновения участника контрольной группы с землей наблюдается кратковременный всплеск активности, вспышка низкоамплитудного, низкочастотного альфа-диапазона, что само по себе не патология, но является фобическим паттерном. Это можно объяснить тем, что вестибулярный анализатор указывает на прямое неподвижное положение тела, а наблюдаемое оптическое поле — на обратное, вследствие чего возможна частичная или полная кратковременная дезориентация. Согласно экспертной оценке врача-невролога правый график показывает активность в каналах FP1, FP2 и O1, O2 головного мозга, которые соответствуют лобным долям и зрительным вестибулярным центрам соответственно. Таким образом, основными признаками фобической реакции являются возбуждения в затылочной и лобной областях.

По результатам анализа врача-невролога данного фрагмента сделаны следующие выводы. После падения средняя амплитуда альфа-ритма увеличилась на 5,0 %, тета-ритма — на 7,3 %, дельта-ритма — на 6,6 %, низкочастотного бета-ритма — на 16,8 %, высокочастотного бета-ритма — на 42,3 %. Увеличение амплитуды и частоты основных биоритмов головного мозга является свидетельством ирритации (возбуждения, раздражения) коры.



■ **Рис. 3.** Фрагменты ЭЭГ и амплитуда волн дельта-ритма в спокойном состоянии (слева) и во время фобической реакции (справа)

■ **Fig. 3.** Fragments of EEG with an amplitude of delta rhythm waves in a calm state (left) and during a phobic reaction (right)

На рис. 3 представлены также результаты спектрального анализа биоэлектрической активности головного мозга до (слева) и после падения (справа). В момент «до» регистрируется активность в передних отделах, т. е. там, где расположены начальные отделы зрительного анализатора, отвечающие за визуальное восприятие окружающего. Эффект падения вызывает активность в задней (таламической) области, где расположены ядра зрительного и вестибулярного анализаторов. После чего обработанный сигнал передается обратно в передние отделы головного мозга.

Таким образом, поиск паттернов акрофобии напрямую связан с работой вестибулярного и зрительного анализаторов. При нахождении на высоте либо падении с высоты глаз человека не находят ближних ориентиров, что приводит к напряжению в вестибулярном аппарате и, как следствие, потере равновесия. В результате ис-

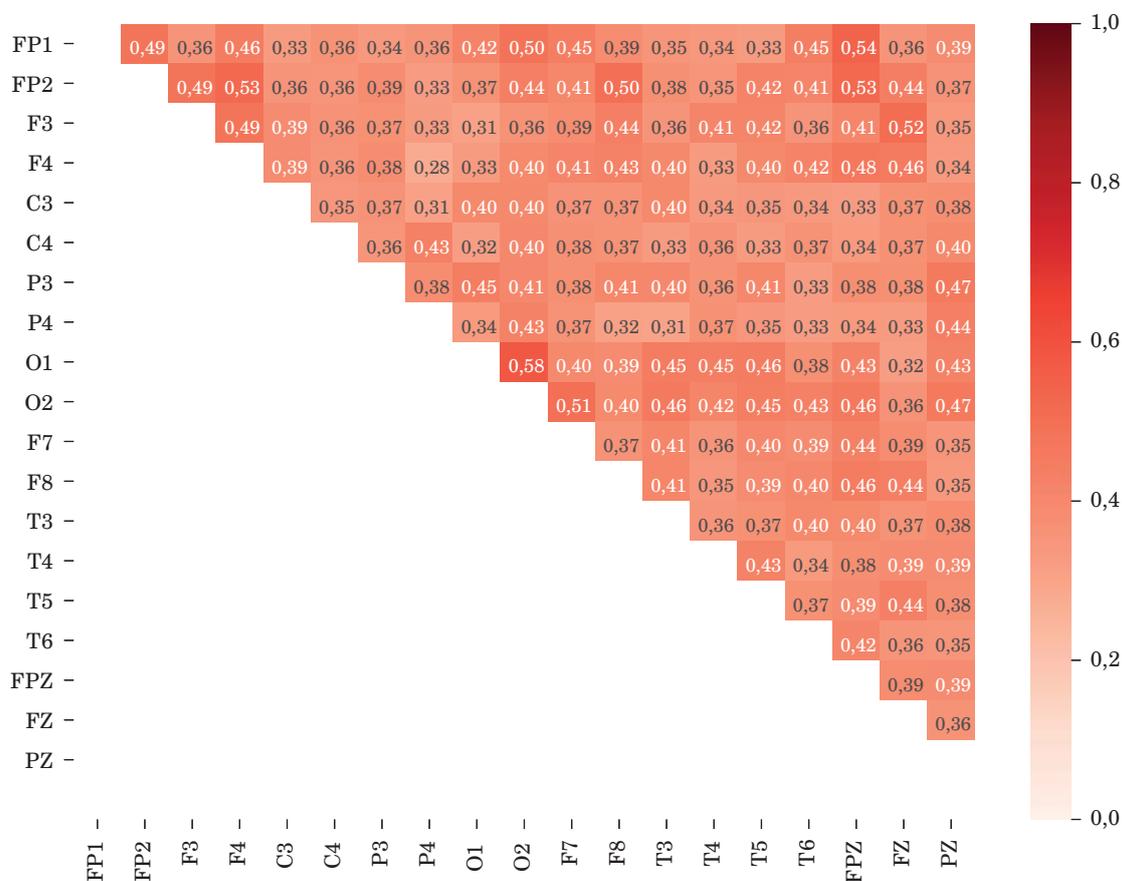
пытаний было выявлено, что люди, дольше находившиеся в лифте и дольше осматривавшие город внизу, а также те, которые самостоятельно прыгали с крыши и при этом смотрели вниз, проявляли более острую реакцию.

Поскольку основное воздействие на человека оказывается посредством трансляции изображений через экраны шлема ВР, то основные источники искажений и всплески активности следует искать в каналах ЭЭГ, соответствующих зрительным зонам головного мозга, т. е. в каналах O1, O2. С другой стороны, усиление сигнала в затылочных областях усиливает напряжение в связанным с ними отведениях ЭЭГ лобной доли, которая отвечает за мыслительную деятельность, реакцию на стресс и страх. С учетом воздействия со стороны вестибулярного аппарата наиболее корректно будет отслеживать мозговую реакцию в отведениях лобной доли (FP1, FP2), так как они позволят отследить реакцию как на зрительное воздействие, так и на другие источники стресса, страха или усиленной мозговой активности.

Для проверки данной гипотезы были построены матрицы когерентности, отражающие

взаимосвязанность электрических процессов мозга и позволяющие оценить степень синхронизации частотных составляющих ЭЭГ между различными отделами коры головного мозга. Преимуществом когерентного анализа ЭЭГ является его независимость от амплитуды колебания сигналов различных участков головного мозга. Количественно степень подобия спектров может быть выражена через безразмерный параметр сходства – коэффициент когерентности (когерентность). Показатель когерентности вычисляется как нормированный коэффициент корреляции между спектрами в выбранных парах отведений. Параметр когерентности может меняться в диапазоне от 1,0 (полная идентичность спектров) до 0 (полное несоответствие).

Усредненные матрицы когерентности построены на основе фрагментов ЭЭГ, соответствующих интервалам воздействия акрофобии (рис. 4). Можно отметить повышенные значения когерентности между затылочными зрительными каналами (O1, O2) и лобными (FP1, FP2). На лобные отведения также оказывают значительное влияние центральный лобный канал (FPZ), височные (F7, F8). Таким образом, выбор в качестве приоритет-



■ **Рис. 4.** Матрица когерентности отведений ЭЭГ при воздействии фобии

■ **Fig. 4.** Matrix coherence of EEG derivations under the influence of phobia

ных отведений для обучения алгоритмов машинного обучения FP1 и FP2, соответствующих лобной доле, является оправданным.

Полученные в ходе предварительной оценки врачом-неврологом результаты позволяют сделать вывод о наличии реакции у человека на фобическое воздействие в ВР и ее проявлении на ЭЭГ. Поэтому на следующем этапе исследований необходимо разработать и протестировать различные алгоритмы машинного обучения для повышения точности выявления фобической реакции.

Алгоритм выявления фобической реакции в ВР на основе методов машинного обучения

Вне зависимости от выбранной архитектуры модели машинного обучения при обработке медицинских данных, полученных при погружении человека в ВР, необходимо выполнить следующие шаги.

1. Предварительную обработку данных: удаление шумов и фильтрацию, разделение данных на фрагменты заданной длины.

2. Разметку данных: в записанных ЭЭГ данных фиксируются временные зоны, соответствующие спокойному состоянию и воздействию источника фобии. Разметка верифицируется экспертом (врачом функциональной диагностики).

3. Классификацию: разделение данных на классы, определяющие наличие или отсутствие фобии или стресса.

4. Валидацию обученной модели: проверку качества модели на новых данных, которые не использовались при ее обучении. При тестировании необходимо использовать матрицу ошибок классификации, чтобы оценить величину ошибок первого и второго рода.

Для устранения артефактов и помех в ЭЭГ использовался анализ независимых компонент, основанный на применении нуль-фазового полосового фильтра и реализованный в библиотеке MNE [20]. Кроме того, все данные были обработаны встроенными фильтрами программного обеспечения Neurosoft, устраняющими шумы (фильтр высоких частот = 0,5 Гц, фильтр низких частот = 70 Гц).

При разделении на фрагменты и разметке медицинских данных использовался следующий подход: из размеченных зон извлекаются последовательности из 500 значений для выбранных каналов с шагом 100 значений для спокойных зон и с шагом 50 значений для зон фобической реакции. Это позволяет многократно увеличить датасет и обучить сеть реагировать на возникновение источника фобии в произвольный момент фрагмента.

При решении задачи классификации и выборе топологии алгоритма машинного обучения необходимо также учитывать формат входных данных, так как на вход алгоритма можно подавать данные с одного зрительного канала ЭЭГ, с двух зрительных каналов или со всех отведений сразу (20 каналов, так как один из каналов является референсным). Этот выбор определяет размерность данных, которая для временных последовательностей будет определяться как кортеж (<объем выборки>, <количество каналов>, <длина фрагмента>). В ходе работы был проведен анализ отведений O1-O2, расположенных в затылочной зоне, относящейся к зрительным каналам. Однако предварительные испытания показали, что точность классификации при использовании данных каналов недостаточно высока. Кроме того, учитывая, что сигналы со зрительных каналов оказывают значительное влияние на лобные каналы (FP1, FP2), которые отвечают за мыслительную активность, реакцию на страхи и стресс, имеет смысл при выборе каналов для классификации фобической реакции использовать отведения FP1, FP2.

Далее переходим к основной задаче исследования – определению оптимального алгоритма машинного обучения для классификации данных с наибольшей точностью. В ходе предварительных испытаний были проверены различные варианты решения поставленной задачи, проанализированы топологии нейронных сетей, что позволило выделить следующие варианты для классификации фобических реакций.

1. Алгоритмы машинного обучения, используемые для классификации, например, деревья решений.

2. Ансамблевые методы машинного обучения, основанные на усреднении нескольких более простых оценщиков (случайный лес – RandomForest) либо на повышении оценок (AdaBoost).

3. Сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network – CNN) для извлечения признаков из временных последовательностей, в том числе с использованием предварительного обучения на расширенном наборе неразмеченных ЭЭГ-данных.

4. Сверточные нейронные сети-трансформеры (CNN-Transformer), включающие извлечение признаков с использованием как сверточных слоев, так и слоев внимания и пропущенных соединений.

Классические плотные многослойные нейронные сети и рекуррентные сети (LSTM, RNN, GRU) в ходе предварительных испытаний не показали корректных результатов, поэтому в итоговом сравнении не представлены. Их неэффек-

тивность может быть обусловлена отсутствием слоев сверток, позволяющих выделить из большой последовательности достаточное количество различных значений мозговой активности, а также общие паттерны для классификации состояния человека.

В соответствии с изложенным алгоритмом осуществим сбор и обработку экспериментальных данных на контрольной группе, после чего проанализируем эффективность различных топологий алгоритмов машинного обучения на различных форматах исходных медицинских данных.

Сравнение алгоритмов машинного обучения при диагностике фобических реакций

Для обучения алгоритмов машинного обучения было необходимо провести разметку данных (с привлечением врача-невролога) и поделить их на равные фрагменты ЭЭГ длительностью 1 с с последовательным сдвигом в соответствии с представленным ранее алгоритмом. После завершения экспериментальных исследований и отсева некорректно записанных данных с двадцати каналов ЭЭГ сохранено 2462 размеченных фрагментов данных для обучения и 1934 — для контрольного тестирования.

Для аппроксимации зависимости между исходными данными ЭЭГ и наличием/отсутствием фобической реакции на раздражители в ВР реализуем следующие алгоритмы машинного обучения с указанием экспериментально подобранных параметров моделей.

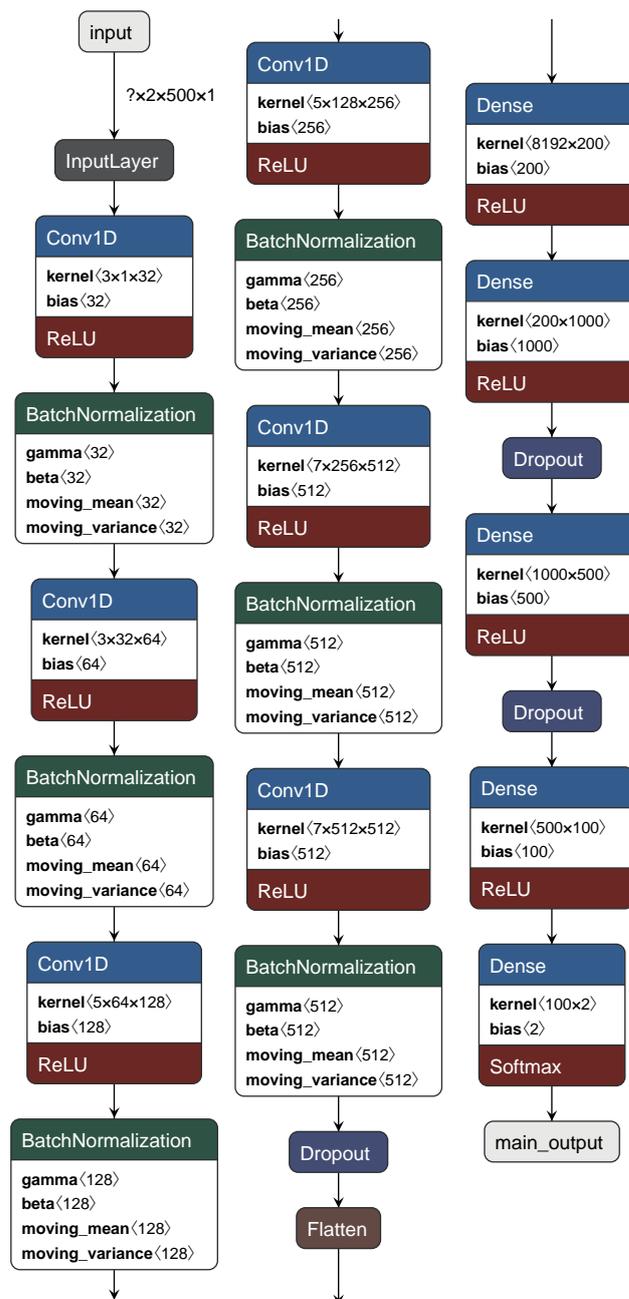
DecisionTreeClassifier — классификатор на основе дерева решений с максимальной глубиной (max_depth), равной 10.

RandomForestClassifier — ансамблевый классификатор, объединяющий набор оценщиков из деревьев решений для различных подвыборок набора данных и использующий усреднение для повышения точности прогнозирования и контроля переобучения. Оптимальные параметры: количество оценщиков — 10, максимальная глубина (max_depth) каждого равна шести.

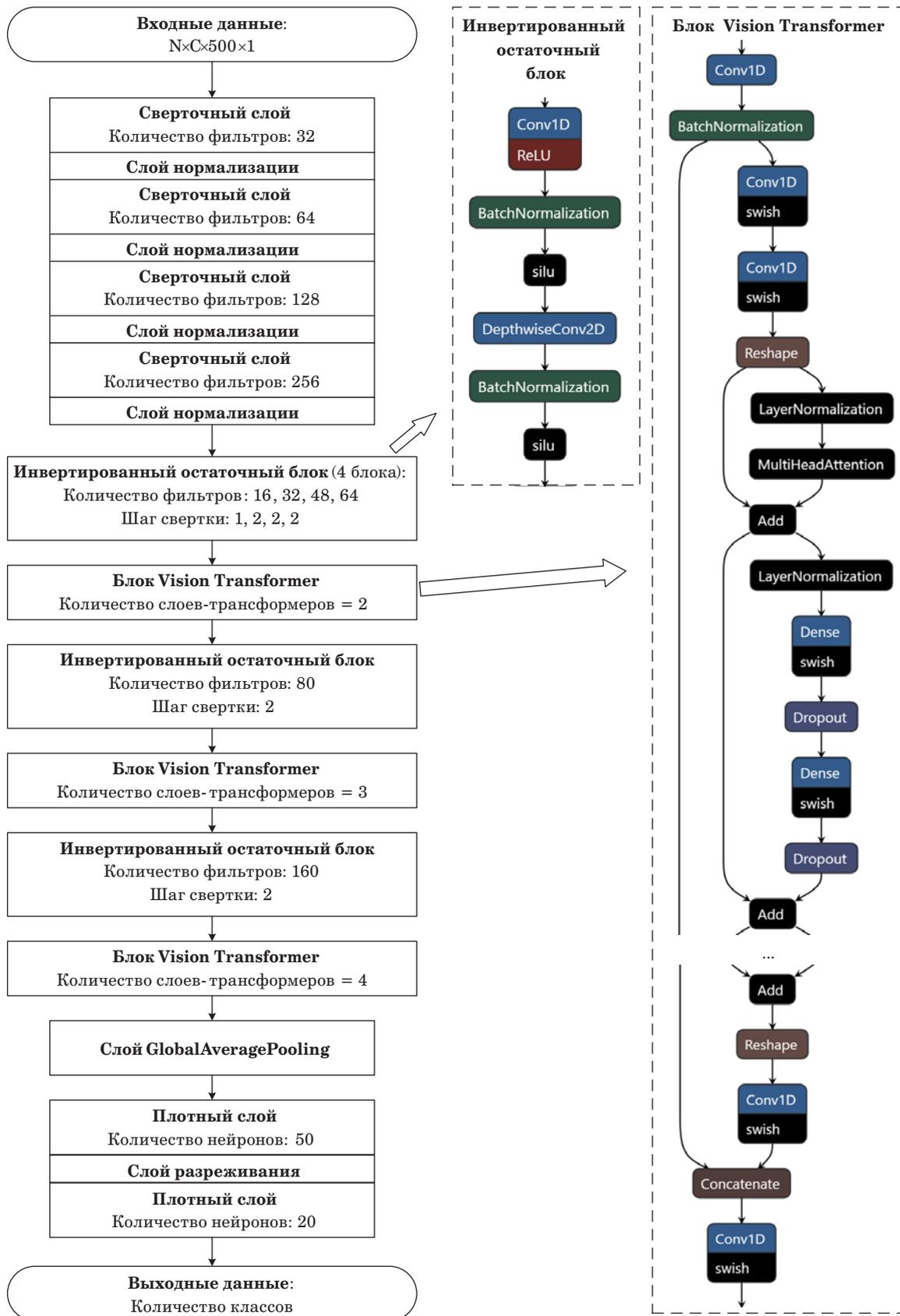
AdaBoostClassifier — ансамблевый классификатор, который объединяет слабые классификаторы (деревья решений), усиливая их за счет последовательного построения ансамблей оценщиков для различных наборов данных. Выбранные параметры: количество оценщиков — 100, скорость обучения (learning_rate) — 0,01, глубина оценщика — 10.

Сверточная нейронная сеть — многослойная сеть, включающая последовательность блоков из сверточных слоев (Conv1D) и слоев нормализации

BatchNormalization для выявления признаков из входных последовательностей. Для повышения точности классификации реализовано предварительное обучение на расширенном наборе ЭЭГ-данных с 90 человек, собранных в состоянии покоя. Процедура предварительного обучения основана на модели автоэнкодера (вход и выход модели совпадают), после чего веса энкодера замораживаются и используются как часть итоговой модели. Топология CNN представлена на рис. 5 (вариант для двух каналов ЭЭГ).



■ **Рис. 5.** Модель сверточной нейронной сети
 ■ **Fig. 5.** Model of the CNN



■ **Рис. 6.** Модель сверточной нейронной сети-трансформера
 ■ **Fig. 6.** Model of the CNN-Transformer

Сверточная нейронная сеть-трансформер – сверточная сеть, построенная по архитектуре Vision Transformer, что предполагает использование следующих слоев: сверточных для выявления общих признаков; инвертированных остаточных блоков для точечной свертки и понижения разрешения; блоков Vision Transformer, включающих сверточные слои, подблоки (patches) и их передачу на слой многоголового внимания (Multi-HeadAttention) для определения глобальных отношений между подблоками. Для формирования топологии данной сети в качестве основы использовалась архитектура, представленная в работе [21], с учетом необходимых модификаций, вызванных форматом входных данных. Итоговая топология представлена на рис. 6 (вариант для двух каналов ЭЭГ).

Необходимо отметить, что при сравнении указанных алгоритмов на временных последовательностях одного канала ЭЭГ будет обработан двойной объем данных, так как требуется проверить эффективность работы как на левом канале, так и на правом.

Также при использовании DecisionTreeClassifier, RandomForestClassifier и AdaBoostClassifier форма входных данных независимо от количе-

ства каналов была изменена на (<объем выборки>, <количество каналов> × <длина фрагмента>), что вызвано ограничениями перечисленных алгоритмов.

Далее все указанные модели машинного обучения были обучены на собранном датасете и оценены на контрольном наборе данных. Результаты точности классификации по выбранным ранее метрикам представлены в таблице для различного количества каналов. Полужирным выделены лучшие результаты в рамках каждого формата данных.

Обработка полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– DecisionTreeClassifier, RandomForestClassifier и AdaBoostClassifier – несмотря на различающиеся результаты в целом их работоспособность не подтверждена, так как до 50 % случаев наличия взаимодействия с фобией не отслеживаются, а до трети случаев без воздействия распознаются как фобия;

– CNN показывает отличные результаты на одном и двух каналах; при анализе 20 каналов эффективность значительно падает;

– CNN-Transformer отличается хорошей работоспособностью на двух и 20 каналах, причем

- Результаты сравнения качества классификации различных алгоритмов машинного обучения
- Results of the comparison of quality classification of different machine learning algorithms

Один канал						
Алгоритм	TN (2026)	FP (0)	FN (0)	TP (1842)	F-мера	A
DecisionTreeClassifier	1544	482	960	882	0,550	0,627
RandomForestClassifier	860	1166	726	1116	0,54	0,510
AdaBoostClassifier	1772	254	1453	389	0,313	0,558
CNN	1936	90	50	1792	0,962	0,963
CNN-Transformer	1924	102	633	1209	0,766	0,809
Два канала						
Алгоритм	TN (1013)	FP (0)	FN (0)	TP (921)	F-мера	A
DecisionTreeClassifier	852	161	632	289	0,421	0,589
RandomForestClassifier	489	524	563	358	0,397	0,437
AdaBoostClassifier	858	155	557	364	0,505	0,631
CNN	992	21	15	906	0,980	0,981
CNN-Transformer	974	39	78	843	0,935	0,939
20 каналов						
Алгоритм	TN (1013)	FP (0)	FN (0)	TP (921)	F-мера	A
DecisionTreeClassifier	728	285	564	357	0,456	0,561
RandomForestClassifier	691	322	636	285	0,373	0,504
AdaBoostClassifier	988	25	676	245	0,411	0,637
CNN	922	91	229	692	0,812	0,834
CNN-Transformer	1013	0	50	871	0,972	0,974

позволяет очень эффективно классифицировать фобии при загрузке всех 20 каналов, что делает подход очень универсальным; не требуется выбирать необходимые каналы для анализа за счет использования комбинации как сверточных слоев, так и слоев Transformer.

Итоги проведенного эксперимента позволяют сделать вывод, что алгоритмы машинного обучения, основанные на деревьях решений или их ансамблях, не могут эффективно классифицировать ЭЭГ-данные. С другой стороны, сверточные нейронные сети и сети Transformer показали высокие результаты и могут быть рекомендованы к использованию для решения поставленной задачи. Также выявлено, что патологические паттерны в зрительных и вестибулярных зонах, возникающие при воздействии акрофобии в VR, точнее всего определяются при анализе лобной зоны головного мозга. Однако использование таких архитектур, как Transformer, позволяет выявлять воздействие акрофобии при анализе всех каналов одновременно за счет механизма внимания.

Заключение

Проведенное сравнение существующих нейронных сетей показало, что для классификации ЭЭГ-данных на наличие фобической реакции наилучшие результаты представили сверточные нейронные сети и сети Transformer. В то же время алгоритмы машинного обучения, основанные

на деревьях решений или их ансамблях, оказались неэффективными. Также было выявлено, что для достижения высокой точности классификации можно анализировать только два зрительных канала из лобной зоны (отведения FP1, FP2). Выявлено, что нейронные сети типа Transformer эффективно обрабатывают данные большой размерности, что позволяет обеспечить высокую точность классификации при анализе 20 каналов ЭЭГ. Эти результаты могут быть полезны для разработки более эффективных методов диагностики фобических расстройств.

В дальнейшем результаты, полученные в данном исследовании, положительно скажутся на оптимизации процессов классификации ЭЭГ-данных, что позволит регистрировать наличие или отсутствие фобических паттернов в реальном времени и программно корректировать сценарий тестовой сцены для достижения лучшего результата реабилитации. Таким образом, полученные теоретические и практические результаты станут основой дальнейших исследований в области систем VR с обратной биологической связью.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» (№ 122012100103-9).

Литература

1. Назарова А. О., Теселкин Д. В., Суркова Е. О. Разработка программных средств для диагностики тревожно-фобических расстройств на основе систем виртуальной реальности. *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф.*, Тамбов, 12–14 октября 2022 г., с. 175–179.
2. Svensson M., Nilsson T., Perrin S., Johansson H., Viborg G., Falkenström F., Sandell R. The effect of patient's choice of cognitive behavioural or psychodynamic therapy on outcomes for panic disorder: A doubly randomised controlled preference trial. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 2021, vol. 90, no. 2, pp. 107–118. doi.org/10.1159/000511469
3. Freitas J. R. S., Velosa V. H. S., Abreu L. T. N., Jardim R. L., Santos J. A. V., Peres B., Campos P. F. Virtual reality exposure treatment in phobias: A systematic review. *Psychiatric Quarterly*, 2021, vol. 92, no. 4, pp. 1685–1710. doi.org/10.1007/s11126-021-09935-6
4. Hajure M., Abdu Z. Social phobia and its impact on quality of life among regular undergraduate students of Mettu University, Mettu, Ethiopia. *Adolescent Health, Medicine and Therapeutics*, 2020, vol. 11, pp. 79–87. doi.org/10.2147/AHMT.S254002
5. Sancassiani F., Romano F., Balestrieri M., Caraci F., Di Sciascio G., Drago F., Carta M. G. The prevalence of specific phobia by age in an Italian Nationwide Survey: How much does it affect the quality of life? *Clinical Practice and Epidemiology in Mental Health: CP & EMH*, 2019, vol. 15, pp. 30. doi: 10.2174/1745017901915010030
6. Sharma M., Mathur D. M., Jeenger J. Nomophobia and its relationship with depression, anxiety, and quality of life in adolescents. *Industrial Psychiatry Journal*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 231. doi:10.4103/ipj.ipj_60_18
7. Islam M. S., Ferdous M. Z., Potenza M. N. Panic and generalized anxiety during the COVID-19 pandemic among Bangladeshi people: An online pilot survey early in the outbreak. *Journal of Affective Disorders*, 2020, vol. 276, pp. 30–37. doi.org/10.1016/j.jad.2020.06.049

8. Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Бофанова Н. С., Алимуратов А. К., Овчинников Д. Л., Сотников А. М. Применение VR для контроля и коррекции фобических тревожных расстройств. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, 2021, № 4 (38), с. 84–92. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-10
9. Donker T., Van Esveld S., Fischer N., Van Straten A. OPhobia—towards a virtual cure for acrophobia: Study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, 2018, vol. 19, pp. 1–11. doi.org/10.1186/s13063-018-2704-6
10. Vlahovic S., Suznjevic M., Skorin-Kapov L. A survey of challenges and methods for Quality of Experience assessment of interactive VR applications. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 257–291. doi.org/10.1007/s12193-022-00388-0
11. Skorin-Kapov L., Varela M., Hoffeld T., Chen K. T. A survey of emerging concepts and challenges for QoE management of multimedia services. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 2018, vol. 14, no. 2s, pp. 1–29. doi.org/10.1145/3176648
12. Bouchard S., St-Jacques J., Robillard G., Renaud P. Anxiety increases the feeling of presence in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2008, vol. 17, no. 4, pp. 376–391. doi.org/10.1162/pres.17.4.376
13. Moynereau M. A., de Oliveira Jr A. A., Falk T. H. Immersive media experience: a survey of existing methods and tools for human influential factors assessment. *Quality and User Experience*, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 5. doi.org/10.1007/s41233-022-00052-1
14. Moller S., Engelbrecht K. P., Kuhnel C., Wechsung I., Weiss B. A taxonomy of quality of service and quality of experience of multimodal human-machine interaction. *2009 Intern. Workshop on Quality of Multimedia Experience*, IEEE, 2009, pp. 7–12. doi:10.1109/QOMEX.2009.5246986
15. Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Чураков П. П., Юлдашев З. М., Бофанова Н. С., Алимуратов А. К., Никитин М. С. Поиск закономерностей на ЭЭС при симуляции тревожно-фобической ситуации в среде виртуальной реальности. *Информационно-управляющие системы*, 2022, no. 4, pp. 58–67. doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67
16. Kamińska D., Smółka K., Zwoliński G. Detection of mental stress through EEG signal in virtual reality environment. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 22, pp. 2840. doi.org/10.3390/electronics10222840
17. Tarrant J., Viczko J., Cope H. Virtual reality for anxiety reduction demonstrated by quantitative EEG: A pilot study. *Frontiers in Psychology*, 2018, vol. 9, pp. 1280. doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01280
18. Kumar M., Delaney C., Krusienski D. Estimation of affective states in virtual reality environments using EEG. *Proc. of the 15th Intern. Conf. on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 2022, pp. 396–401. doi.org/10.1145/3529190.3534738
19. Clemente D., Davi L., De Monte E. Use of digital stimulation in the treatment of phobias: Results following EEG and evoked potential. *Journal of Technology in Behavioral Science*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 40–46. doi.org/10.1007/s41347-019-00111-z
20. Jas M., Larson E., Engemann D. A., Leppäkangas J., Taulu S., Hämmäläinen M., Gramfort A. A reproducible MEG/EEG group study with the MNE software: Recommendations, quality assessments, and good practices. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, vol. 12, pp. 530. doi.org/10.3389/fnins.2018.00530
21. Mehta S., Rastegari M. Mobilevit: Light-weight, general-purpose, and mobile-friendly vision transformer. *arXiv preprint arXiv:2110.02178*, 2021. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.02178

UDC 004.89

doi:10.31799/1684-8853-2023-4-56-70

EDN: DJQEDW

Application of machine learning in EEG analysis to detect phobic reactions in virtual realityA. D. Obukhov^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-3450-5213, obuhov.art@gmail.comI. L. Korobova^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0006-5429-6339A. O. Nazarova^a, Programmer Engineer, orcid.org/0000-0002-4741-1451D. V. Zajceva^a, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0001-9488-0835^aTambov State Technical University, 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russian Federation

Introduction: Researchers use virtual reality technologies to simulate various effects on a person, including stress. For an objective diagnosis of a person's predisposition to phobias, virtual reality devices are used as well as a doctor's subjective assessment. The automation of diagnostic processes requires the development of methods based on the objective processing of medical data. **Purpose:** To develop an approach to the classification of EEG data which is based on machine learning technologies and allows to increase the accuracy of the detection and identification of phobic reactions when a person is exposed to virtual reality. **Methods:** We set the task to select an optimal machine learning algorithm for the classification of electroencephalogram data (total volume: 3996 one-second fragments) obtained from the group of 15 healthy subjects without explicit acrophobia in order to detect the presence or absence of phobic reactions in the frontal and occipital lobes of the brain when a person is exposed to phobias. We propose several neural network architectures based on convolutional and transformer layer. **Results:** We have collected and analysed the medical data from the electroencephalogram of the control group participants who performed a virtual reality exercise on acrophobia (fear of heights). In the context of the task of selecting a machine learning algorithm, the parameters of the machine learning algorithms (number and depth of estimators, learning rate) were selected, and two modified models of convolutional neural networks were designed. The collected and labeled electroencephalogram data fragments were processed using various machine learning algorithms: decision trees, random forests, AdaBoostClassifier, convolutional neural networks, and transformer networks. During testing, the best results were achieved by convolutional neural networks (with an accuracy of 98% when analyzing two frontal channels) and transformer networks (with an accuracy of 97.4% when processing all channels). **Practical relevance:** The results of the study allow us to draw conclusions about the effectiveness of convolutional neural networks and Transformer networks in processing medical data received from electroencephalograms. The developed software enables the automation of detecting phobic reactions within a person exposed to virtual reality.

Keywords – machine learning, virtual reality, phobic disorders, detection, electroencephalography, data processing, convolutional neural networks.

For citation: Obukhov A. D., Korobova I. L., Nazarova A. O., Zajceva D. V. Application of machine learning in EEG analysis to detect phobic reactions in virtual reality. *Informacionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 4, pp. 56–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-4-56-70, EDN: DJQEDW

Financial support

The work was carried out with the financial support by the Ministry of Science and Higher Education Russian Federation within the framework of the project «Development of medical VR simulator systems for training, diagnostics and rehabilitation» (No. 122012100103-9).

References

- Nazarova A. O., Teselkin D. V., Surkova E. O. Development of software tools for the diagnosis of anxiety-phobic disorders based on virtual reality systems. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn"* [Proc. of the VIII Sc. and Prac. Int. Conf. "Virtual simulation, prototyping and industrial design"]. Tambov, 2022, pp. 175–179 (In Russian).
- Svensson M., Nilsson T., Perrin S., Johansson H., Viborg G., Falkenström F., Sandell R. The effect of patient's choice of cognitive behavioural or psychodynamic therapy on outcomes for panic disorder: A doubly randomised controlled preference trial. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 2021, vol. 90, no. 2, pp. 107–118. doi.org/10.1159/000511469
- Freitas J. R. S., Velosa V. H. S., Abreu L. T. N., Jardim R. L., Santos J. A. V., Peres B., Campos P. F. Virtual reality exposure treatment in phobias: A systematic review. *Psychiatric Quarterly*, 2021, vol. 92, no. 4, pp. 1685–1710. doi.org/10.1007/s11126-021-09935-6
- Hajure M., Abdu Z. Social phobia and its impact on quality of life among regular undergraduate students of Mettu University, Mettu, Ethiopia. *Adolescent Health, Medicine and Therapeutics*, 2020, vol. 11, pp. 79–87. doi.org/10.2147/AHMT.S254002
- Sancassiani F., Romano F., Balestrieri M., Caraci F., Di Sciascio G., Drago F., Carta M. G. The prevalence of specific phobia by age in an Italian Nationwide Survey: How much does it affect the quality of life? *Clinical Practice and Epidemiology in Mental Health: CP & EMH*, 2019, vol. 15, pp. 30. doi: 10.2174/1745017901915010030
- Sharma M., Mathur D. M., Jeenger J. Nomophobia and its relationship with depression, anxiety, and quality of life in adolescents. *Industrial Psychiatry Journal*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 231. doi:10.4103/ipj.ipj_60_18
- Islam M. S., Ferdous M. Z., Potenza M. N. Panic and generalized anxiety during the COVID-19 pandemic among Bangladeshi people: An online pilot survey early in the outbreak. *Journal of Affective Disorders*, 2020, vol. 276, pp. 30–37. doi.org/10.1016/j.jad.2020.06.049
- Tychkov A. Yu., Chernyshov D. S., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Ovchinnikov D. L., Sotnikov A. M. VR implementation for control and correct phobic anxiety disorders. *Measurements. Monitoring. Management. Control*, 2021, no. 4, pp. 84–92 (In Russian). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-10
- Donker T., Van Esveld S., Fischer N., Van Straten A. Ophobia—towards a virtual cure for acrophobia: Study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, 2018, vol. 19, pp. 1–11. doi.org/10.1186/s13063-018-2704-6
- Vlahovic S., Suznjevic M., Skorin-Kapov L. A survey of challenges and methods for Quality of Experience assessment of interactive VR applications. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 257–291. doi.org/10.1007/s12193-022-00388-0
- Skorin-Kapov L., Varela M., Hoffeld T., Chen K. T. A survey of emerging concepts and challenges for QoE management of multimedia services. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 2018, vol. 14, no. 2s, pp. 1–29. doi.org/10.1145/3176648
- Bouchard S., St-Jacques J., Robillard G., Renaud P. Anxiety increases the feeling of presence in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2008, vol. 17, no. 4, pp. 376–391. doi.org/10.1162/pres.17.4.376
- Moinnereau M. A., de Oliveira Jr A. A., Falk T. H. Immersive media experience: a survey of existing methods and tools for human influential factors assessment. *Quality and User Experience*, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 5. doi.org/10.1007/s41233-022-00052-1

14. Moller S., Engelbrecht K. P., Kuhnel C., Wechsung I., Weiss B. A taxonomy of quality of service and quality of experience of multimodal human-machine interaction. *2009 Intern. Workshop on Quality of Multimedia Experience*, IEEE, 2009, pp. 7–12. doi:10.1109/QOMEX.2009.5246986
15. Tychkov A. Yu., Chernyhov D. S., Churakov P. P., Yuldashev Z. M., Bofanova N. S., Alimuradov A. K., Gorbunov V. N., Zolotarev R. V., Nikitin M. S. Search for EEG signal patterns in simulating phobic anxiety disorder situations in a VR environment. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 4, pp. 58–67 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-4-58-67
16. Kamińska D., Smółka K., Zwoliński G. Detection of mental stress through EEG signal in virtual reality environment. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 22, pp. 2840. doi.org/10.3390/electronics10222840
17. Tarrant J., Viczko J., Cope H. Virtual reality for anxiety reduction demonstrated by quantitative EEG: A pilot study. *Frontiers in Psychology*, 2018, vol. 9, pp. 1280. doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01280
18. Kumar M., Delaney C., Krusienski D. Estimation of affective states in virtual reality environments using EEG. *Proc. of the 15th Intern. Conf. on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 2022, pp. 396–401. doi.org/10.1145/3529190.3534738
19. Clemente D., Davi L., De Monte E. Use of digital stimulation in the treatment of phobias: Results following EEG and evoked potential. *Journal of Technology in Behavioral Science*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 40–46. doi.org/10.1007/s41347-019-00111-z
20. Jas M., Larson E., Engemann D. A., Leppäkangas J., Taulu S., Hämläinen M., Gramfort A. A reproducible MEG/EEG group study with the MNE software: Recommendations, quality assessments, and good practices. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, vol. 12, pp. 530. doi.org/10.3389/fnins.2018.00530
21. Mehta S., Rastegari M. Mobilevit: Light-weight, general-purpose, and mobile-friendly vision transformer. *arXiv preprint arXiv:2110.02178*, 2021. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.02178

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

АРСЕНЬЕВ Владимир Николаевич



Профессор кафедры бортовых информационных и измерительных комплексов Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1978 году окончил Военно-инженерную Краснознаменную академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Системы управления, электропроверочное и специальное оборудование летательных аппаратов». В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 120 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — методы анализа и синтеза систем управления летательных аппаратов. Эл. адрес: vladar56@mail.ru

ЕРАШОВ Алексей Алексеевич



Младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социобиофизических систем Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. В 2021 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Управление в технических системах». Является автором 21 научной публикации. Область научных интересов — методы и алгоритмы управления робототехническими средствами с применением технического зрения и машинного обучения. Эл. адрес: erashov.a@iias.spb.su

ЗАЙЦЕВА Дарья Вадимовна



Аспирант кафедры систем автоматизированной поддержки принятия решений Тамбовского государственного технического университета. В 2012 году окончила Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко по специальности «Лечебное дело», в 2013 году — Медицинский институт Тамбовского государственного университета имени Г. Р. Державина по специальности «Неврология», в 2021 году — Тамбовский государственный технический университет по специальности «Биотехнические системы и технологии». Является автором одной научной публикации. Область научных интересов — неврология, ЭЭГ, анализ медицинских данных, функциональная диагностика. Эл. адрес: Darya.zajceva.87@mail.ru

ВЕЛИЧКО Алёна Николаевна



Научный сотрудник лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2018 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем». Является автором 15 научных публикаций и четырех свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Область научных интересов — компьютерная паралингвистика, анализ разговорной речи, анализ деструктивных паралингвистических явлений в разговорной речи, машинное обучение. Эл. адрес: alena.n.velichko@gmail.com

ЕФРЕМОВ Артем Александрович



Доцент, руководитель образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого. В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Техническая физика». В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — теория управления и оптимизации, синтез управляемых динамических систем, информационные системы. Эл. адрес: artem.efremov@spbstu.ru

КАРПОВ Алексей Анатольевич



Ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 350 научных публикаций, включая четыре монографии и пять патентов. Область научных интересов — многомодальные интерфейсы и системы, речевые технологии, автоматическое распознавание и синтез речи, компьютерная паралингвистика. Эл. адрес: karpov@iias.spb.su

**КОЗЛОВ
Владимир
Николаевич**



Профессор, научный руководитель образовательной программы Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого, эксперт РАН, дважды лауреат премии Президента РФ, лауреат премии Правительства РФ, заслуженный работник высшей школы РФ. В 1970 году окончил Ленинградский политехнический институт имени М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов – теория управления и оптимизации, синтез управляемых динамических систем, теория устойчивости.
Эл. адрес: kozlov_vn@spbstu.ru

**КРЕСТОВНИКОВ
Константин
Дмитриевич**



Младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. В 2019 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Мехатроника и робототехника». Является автором 40 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов – модели и алгоритмы распределения энергетических ресурсов робототехнических средств путем двунаправленной беспроводной передачи энергии, мехатроника.
Эл. адрес: krestovnikov@iias.spb.su

**НАЗАРОВА
Александра
Олеговна**



Инженер-программист лаборатории медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации, студент Тамбовского государственного технического университета. Является автором 11 научных публикаций. Область научных интересов – информационные технологии, разработка программного обеспечения, виртуальная реальность.
Эл. адрес: nazarova.al.ol@yandex.ru

**КОРОБОВА
Ирина
Львовна**



Заведующая кафедрой систем автоматизированной поддержки принятия решений Тамбовского государственного технического университета. В 1990 году окончила Тамбовский государственный технический университет по специальности «Системы автоматизированного проектирования». В 2001 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 33 научных публикаций. Область научных интересов – базы знаний, системы поддержки принятия решений, нейронные сети.
Эл. адрес: ira.sapr.tstu@mail.ru

**ЛЕПЕШКИН
Олег
Михайлович**



Доцент Военной орденов Жукова и Ленина Краснознаменной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. В 1990 году окончил Ставропольский военный институт связи РВ по специальности «Автоматизированные системы управления». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 220 научных публикаций и 15 патентов на изобретения. Область научных интересов – методы и способы контроля и управления сложными техническими системами, управление социальными и экономическими системами.
Эл. адрес: lepechkin1@yandex.ru

**ОБУХОВ
Артем
Дмитриевич**



Доцент кафедры систем автоматизированной поддержки принятия решений Тамбовского государственного технического университета. В 2014 году окончил с отличием Тамбовский государственный технический университет по специальности «Системы автоматизированной поддержки принятия решений». В 2021 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов – адаптивные информационные системы, структурно-параметрический синтез, нейронные сети, машинное обучение.
Эл. адрес: obuhov.art@gmail.com

**ОСТРОУМОВ
Олег
Александрович**



Докторант Военной орденов Жукова и Ленина Краснознаменной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. В 2009 году окончил Ставропольский военный институт связи РВ по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение». В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 120 научных публикаций и 13 патентов на изобретения. Область научных интересов — методы и способы контроля и управления сложными техническими системами, способы обеспечения криптосвязности в открытых сетях, методы разнесенного приема в сетях связи. Эл. адрес: oleg-26stav@mail.ru

**СИНЮК
Александр
Демьянович**



Доцент, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. В 1989 году окончил Полтавское высшее военное командное училище связи им. К. С. Москаленко по специальности «Командная тактическая войск связи». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 170 научных публикаций и десяти патентов на изобретения. Область научных интересов — общая теория связи, теория информации, методы защиты информации, подсистемы управления ключами криптографических систем. Эл. адрес: eentrop@rambler.ru

**ФИЛИМОНОВ
Василий
Александрович**



Старший преподаватель Военной орденов Жукова и Ленина Краснознаменной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. В 1987 году окончил Рязанское высшее военное училище связи по специальности «Эксплуатация средств электросвязи», в 2001 году — Военный университет связи по специальности «Военное и административное управление». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — теория электрических сигналов, цифровая обработка сигналов. Эл. адрес: awgn@eyandex.ru

**САВЕЛЬЕВ
Антон
Игоревич**



Старший научный сотрудник, руководитель лаборатории автономных робототехнических систем Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Мехатроника и робототехника». В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 111 научных публикаций и шести патентов на изобретения. Область научных интересов — человеко-машинное взаимодействие, робототехника, инфокоммуникационные системы. Эл. адрес: saveliev@iiias.spb.su

**СЛАТОВА
Екатерина
Викторовна**



Соискатель ученой степени кандидата технических наук, заместитель начальника отдела кадров Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2013 году окончила Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — алгоритмическое и программное обеспечение процессов функционирования, анализа и синтеза автоматизированных систем управления. Эл. адрес: vka@mil.ru

**ЯДРЕНКИН
Андрей
Александрович**



Доцент, начальник кафедры бортовых информационных и измерительных комплексов Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1995 году окончил Военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Оптико-электронные приборы и системы». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций. Область научных интересов — методы анализа и синтеза систем управления летательными аппаратами. Эл. адрес: andrei_nikita@mail.ru

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Текст рукописи должен быть оригинальным, а цитирование и самоцитирование корректно оформлено.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Простые **формулы** набирайте в Word, сложные с помощью редактора MathType или Equation. Для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта в MathType никогда не пользуйтесь вкладкой Other, Smaller, Larger, используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» — «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Подробнее см. pdf-файл «Правила подготовки рукописей» (стр. 11) на сайте <https://guar.ru/ric>

Иллюстрации:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (*.vsd, *.vsdx); Adobe Illustrator (*.ai); Coreldraw (*.cdr, версия не выше 15); Excel (*.xls); Word (*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF);

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png, *.jpg с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц, doi;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц, doi;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

Контакты

Куда: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: i-us.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru