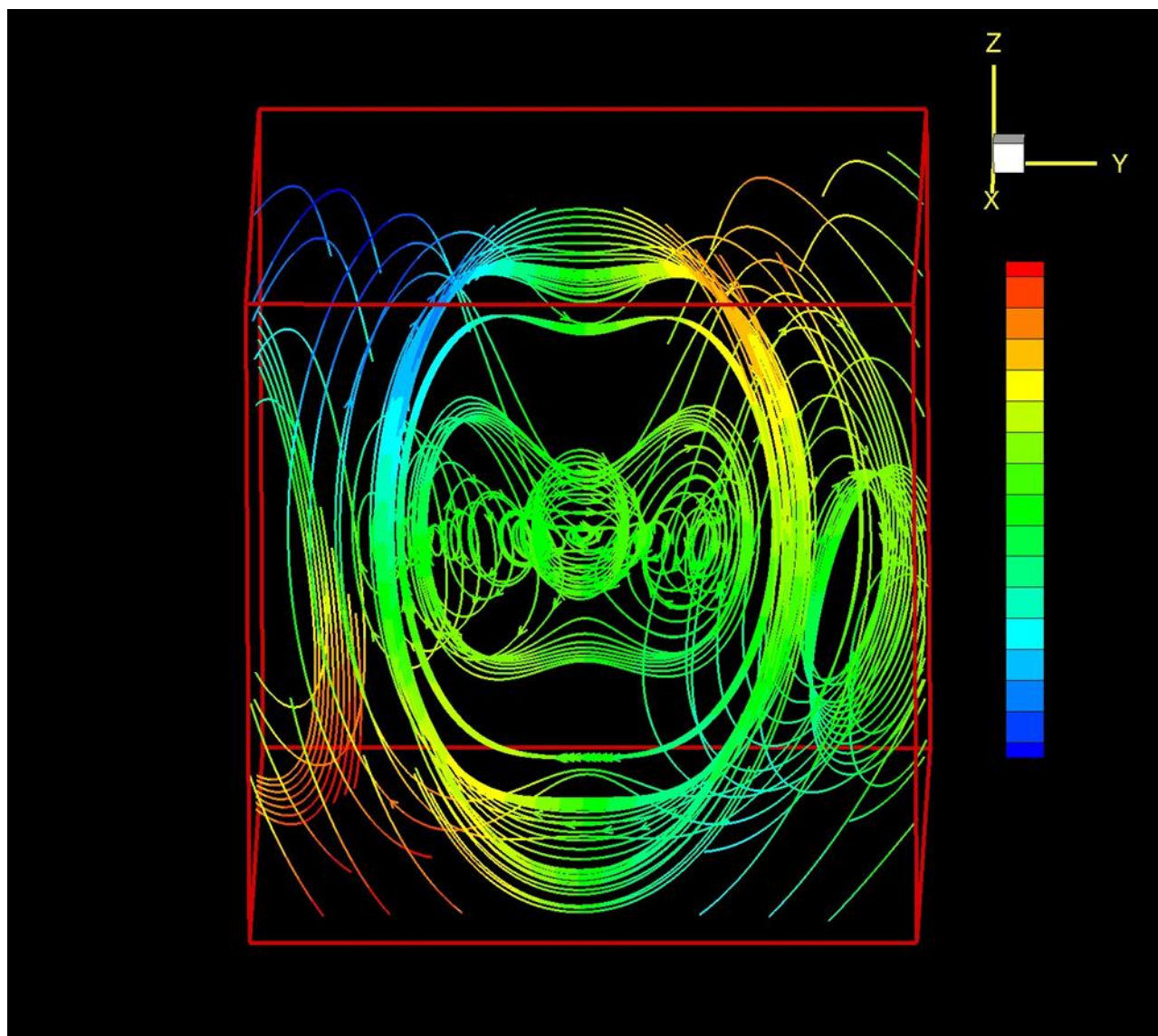




ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 22, № 4

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Сургут
2023**

Учредитель и издатель

Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор

Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора

Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь

Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:

Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
Инютин С. А., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор

Хасанова А. Ш.

Редактор

Манаева Л. И.

Верстка

Мельниковой Е. А.

Переводчик

Петрова А. В.

Рисунок на обложке:

Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года журнал включен 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».
С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Dreys Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Khasanova A. Sh.

Editor

Manaeva L. I.

Layout

Melnikova E. A.

Translator

Petrova A. V.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes;
2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate El No. FS77-83015 dated on 31.03.2022.
Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenina pr., 1
Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Берестин Д. К., Кинтюхин А. С. Динамика параметра квазиаттракторов походки человека	6
Григоренко В. В., Назина Н. Б. Применение метода контрольных карт при исследовании хаотической динамики кардиоинтервалов	11
Гусев О. В. Имитационное моделирование захвата антропоморфной кисти руки	18
Кравченко С. В. Разработка системы прототипирования нейропротезов на основе гибридной про- граммно-аппаратной реализации спайковых нейронных сетей	26
Пахтусов А. И., Логарева Е. В., Парсаданян А. М., Каспарова А. Э., Федоров Д. А. Системный анализ процесса диагностики опухолей яичников	33
Семёнов Е. Д., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Назарова И. Л. Нейросетевое прогнозирование входных параметров при добыче нефти	42

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Дубанов А. А. Модель автоматизированного распределения в задаче группового преследования с за- щитниками	52
Андрею Валентиновичу Запезалову – 60 лет	59

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Berestin D. K., Kintyukhin A. S.</i> Dynamics of a quasi-attractors' parameter of human gait	6
<i>Grigorenko V. V., Nazina N. B.</i> Method of control charts for studying chaotic dynamics of RR intervals	11
<i>Gusev O. V.</i> Simulation of anthropomorphic wrist gripping	18
<i>Kravchenko S. V.</i> Developing a system for neural prototyping of neural prostheses based on the hybrid software and hardware implementation of spiking neural networks	26
<i>Pakhtusov A. I., Logareva E. V., Parsadanyan A. M., Kasparova A. E., Fedorov D. A.</i> A systematic analysis of ovarian tumor diagnosis	33
<i>Semyonov E. D., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Nazarova I. L.</i> Neural network forecasting of input parameters in oil development	42

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Dubanov A. A.</i> A model of automated distribution of defenders during group pursuit	52
<i>Celebrating 60th Jubilee of Andrey Valentinovich Zapevalov</i>	59

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 612.1/8:007
DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-1

ДИНАМИКА ПАРАМЕТРА КВАЗИАТТРАКТОРОВ ПОХОДКИ ЧЕЛОВЕКА

Дмитрий Константинович Берестин^{1✉}, Антон Сергеевич Кинтюхин²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ bdk0720@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3977-3281>

² anton-kintyuhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8238-6474>

Аннотация. В статье представлены результаты исследования с использованием метода теории хаоса-самоорганизации динамики параметров походки человека при различной скорости движения. Исследование изменения значений площади квазиаттракторов на разных скоростных режимах проведено с участием 18 испытуемых в возрасте 20 ± 2 года на беговой дорожке с переменной скоростью от 2 до 7 км/ч с регистрацией параметров длины шага, амплитуды моды, индекса походки, длительности поддержки и перехода ног. Установлено наибольшее значение площади квазиаттракторов при скорости ходьбы 2 км/ч, ее уменьшение при скорости 4 км/ч и увеличение при максимальной скорости. Таким образом, динамика площади квазиаттракторов в меньшую сторону может свидетельствовать о переходе системы в стационарное состояние.

Ключевые слова: походка, параметры ходьбы, теория хаоса-самоорганизации

Для цитирования: Берестин Д. К., Кинтюхин А. С. Динамика параметра квазиаттракторов походки человека // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 6–10. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-1.

Original article

DYNAMICS OF A QUASI-ATTRACTORS' PARAMETER OF HUMAN GAIT

Dmitry K. Berestin^{1✉}, Anton S. Kintyukhin²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ bdk0720@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3977-3281>

² anton-kintyuhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8238-6474>

Abstract. The article presents findings of studying the dynamics of human gait parameters at various speed using the chaos and self-organization method. The examination of change in parameters of quasi-attractors square at different speed modes is conducted on 18 participants of 20 ± 2 y. o. running on a treadmill with variable speed from 2 to 7 km/h. Their parameters of step length, mode amplitude, gait index, duration of legs support and steps are recorded. The highest quasi-attractors square parameter was determined at a speed of 2 km/h, the decreased one at a speed of 4 km/h, and an increase at the maximum speed. Therefore, the decreasing dynamics of quasi-attractors square can indicate a transition of the system into a steady state.

Keywords: gait, walking parameters, chaos and self-organization theory

For citation: Berestin D. K., Kintyukhin A. S. Dynamics of a quasi-attractors' parameter of human gait. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):6–10. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-1.

ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени походка человека обычно рассматривалась как автоматизиро-

ванная двигательная задача, требующая минимального когнитивного участия более высокого уровня. Однако появляется все больше

данных, связывающих изменения исполнительной функции и внимания с нарушениями походки. Требования к вниманию при ходьбе часто проверяют с использованием методологии двойного выполнения задач [1]. Походка человека позволяет понять его внутренний мир, психологическое состояние, определить характер, выяснить индивидуальные особенности [2]. Возрастные физиологические изменения представляют собой сочетание изменений подвижности и характера походки и связаны со снижениями самостоятельности и функционального состояния организма, с ухудшением качества жизни. Снижение скорости ходьбы является наиболее устойчивым возрастным изменением, но есть и другие факторы, влияющие на изменение походки: нарушение баланса и устойчивости, силы нижних конечностей и страх падения [3].

Анализ походки является важным методом клинической диагностики и мониторинга определенных заболеваний, он находит применение в спорте, физической реабилитации, наблюдении и распознавании людей, в компьютерных играх, моделировании и многих других областях [4].

С использованием динамической теории систем с помощью математического подхода возможно объяснить поведение таких сложных систем, как биологические или управление их двигательной активностью. При ходьбе человека наблюдается U-образная зависимость между двумя параметрами – скоростью ходьбы и статистическими свойствами устойчивости временного интервала от шага к шагу [5, 6].

Цель исследования – изучение динамики параметров походки человека при различной скорости движения с использованием метода теории хаоса-самоорганизации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Группу исследования параметров походки человека составили 18 студентов Сургутского государственного университета в возрасте 20 ± 2 года. Перед началом исследования каждой участницей было подписано информированное согласие с инструкциями и этапами эксперимента, а также согласие на обработку персональных данных. Все участницы не имели противопоказаний по медицинскому заклю-

чению, что соответствовало 1-й группе здоровья. Перед экспериментом у каждой испытуемой измеряли следующие параметры: рост, длина ноги (см), масса тела (кг). Перед началом эксперимента производилась калибровка оборудования. Исследование заключалось в прохождении тредмил-теста с использованием беговой дорожки фирмы Matrix. Испытуемые должны были пройти шесть этапов на каждом из режимов. Скорость движения составляла от 2 км/ч с последующим увеличением на 1 км/ч до 7 км/ч, продолжительность каждого этапа – 5 мин, общая длительность эксперимента – 30 мин. Для регистрации параметров использовали видеокамеру GoPro Hero 6 Black с техническими характеристиками: частота кадров 120 кадров/с, разрешение съемки Full HD (1920×1080). Для определения положения к пяткам ног испытуемых были прикреплены специальные метки: на левой ноге – с наружной стороны, на правой ноге – с внутренней. Параметры походки определяли с использованием программного обеспечения «DynaMick» собственной разработки.

В результате обработки с помощью программы «DynaMick» получено значение длины шага (ДШ) каждого испытуемого в мм, на основании которой на плоскости строили квазиаттрактор (КА) и рассчитывали его площадь (S) как произведение двух вариационных размахов фазовых координат Δx_1 и Δx_2 , т. е. $S = \Delta x_1 \times \Delta x_2$ [7, 8]. Первой координатой x_1 является значение ДШ испытуемого, а вторая x_2 представляет собой дифференцированный сигнал x_1 . Таким образом, полученная вторая координата представляет собой скорость изменения длины шага [7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате были построены графики шести фазовых траекторий на шести скоростях движения для каждого испытуемого. Для примера представим четыре фазовых плоскости одного испытуемого как типичный пример динамики изменения площади S КА на различных скоростях движения.

На рис. 1 показаны фазовые траектории КА, где рис. 1А соответствует скорости движения

испытуемого 2 км/ч $S_1 = 33\,629$ у. е.; рис. 1В – скорости движения испытуемого 4 км/ч $S_2 = 18\,055$ у. е.; рис. 1С – увеличению скорости движения испытуемого до 6 км/ч $S_3 = 18\,325$ у. е.; рис. 1D – максимальной скорости движения 7 км/ч $S_4 = 63\,191$ у. е.

В результате полученных данных наблюдается динамика изменения значения площадей S КА. Таким образом установлено, что при минимальной скорости движения испытуемого 2 км/ч площадь КА значительно отличается по отношению к площадям КА на остальных скоростных режимах. При скорости движения испытуемого 4 км/ч наблюдается уменьшение площади КА в 1,86 раза, при скорости движения до 6 км/ч – незначительное увели-

чение площади КА, при максимальной скорости движения 7 км/ч – увеличение площади КА. В результате проведенного лабораторного исследования была получена динамика изменения площадей КА, так, при скорости движения испытуемого от 2 до 5 км/ч наблюдается последовательное уменьшение площади КА, а при скорости движения в 5 км/ч она минимальна и составляет 15 489 у. е. При скорости движения испытуемого 6 км/ч наблюдается незначительное увеличение площади КА по отношению к скорости движения 5 км/ч. При максимальной скорости движения 7 км/ч наблюдается максимальное значение площади КА. Все значения площадей КА при различной скорости движения представлены на рис. 2.

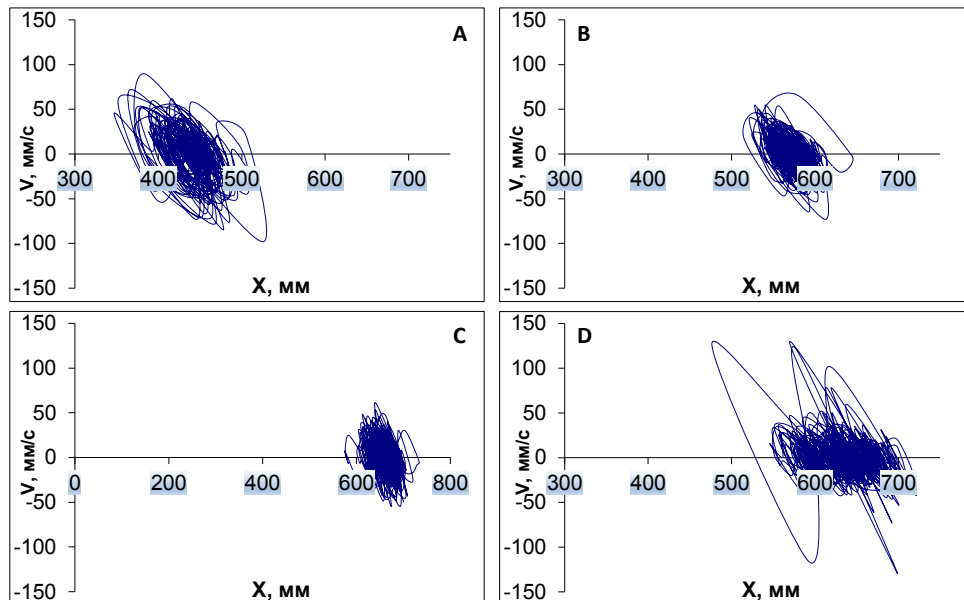


Рис. 1. Пример фазовых траекторий одного испытуемого на различной скорости движения
 Примечание: составлено авторами.

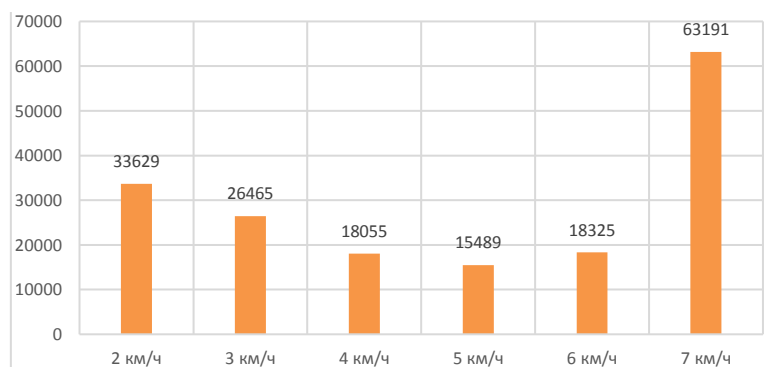


Рис. 2. Динамика значений площадей КА для одного испытуемого на различной скорости движения в лабораторных условиях (2–7 км/ч)
 Примечание: составлено авторами.

В результате проведенного эксперимента в лабораторных условиях для каждого испытуемого была получена динамика изменения значений площади КА при разной скорости движения. Наблюдаемая динамика изменения значений площади КА имеет приблизительную параболическую форму, которую можно описать с помощью математических законов, и которая может свидетельствовать о переходе системы в стационарное состояние.

По результатам исследования можно определить оптимальную скорость движения испытуемого. Например, увеличение скорости движения приводит к уменьшению площади КА, и можно предположить, что для данного испытуемого скорость движения в диапазоне от 4 до 6 км/ч является наиболее подходящей, что подтверждается субъективными ощущениями самого испытуемого.

Оптимальность скорости движения влияет не только на изменение площади КА, но также на вариабельность длины шага. Например, при скорости 2 км/ч длина шага может варьировать от 346 до 526 мм, при скорости 4 км/ч – от 514 до 644 мм, а при скорости 7 км/ч –

от 476 до 720 мм. Кроме того, динамика изменения площади КА также указывает на то, что на скорости 7 км/ч система не находится в неидеальном состоянии, что приводит к повышению вариабельности длины шага. Это, в свою очередь, может привести к тому, что на данной скорости испытуемый пройдет меньшее расстояние, чем при скорости движения в диапазоне от 4 до 6 км/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент позволил получить динамику изменения длины шага в зависимости от скорости ходьбы и провести расчеты параметров с применением методов теории хаоса-самоорганизации, учитывающих изменение площади квазиаттрактора. Результаты показали, что при уменьшении скорости движения испытуемого вариабельность длины шага также уменьшается, а при достижении максимальной скорости она достигает максимума. Динамика изменения параметров, рассчитанная по методам теории хаоса-самоорганизации, также отражает изменение площади квазиаттрактора.

Список источников

1. Tudor-Locke C., Han H., Aguiar E. J. et al. How fast is fast enough? Walking cadence (steps/min) as a practical estimate of intensity in adults: A narrative review. *Br J Sports Med.* 2018;52(12):776–788.
2. Галич А. А. Походка как визуальный элемент портретной характеристики в мемуарном тексте // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 10–2. С. 15–18.
3. Cruz-Jimenez M. Normal changes in gait and mobility problems in the elderly. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2017;28(4):713–725.
4. Jarchi D., Pope J., Lee T. K. M. et al. A review on accelerometry-based gait analysis and emerging clinical applications. *IEEE Rev Biomed Eng.* 2018;11:177–194.
5. Pearson M., Dieberg G., Smart N. Exercise as a therapy for improvement of walking ability in adults with multiple sclerosis: A meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2015;96(7):1339–1348.e7.
6. DeLany J. P., Kelley D. E., Hames K. C. et al. Effect of physical activity on weight loss, energy expenditure, and energy intake during diet induced weight loss. *Obesity.* 2014;22(2):363–370.
7. Бетелин В. Б., Еськов В. М., Галкин В. А. и др. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // До-

References

1. Tudor-Locke C., Han H., Aguiar E. J. et al. How fast is fast enough? Walking cadence (steps/min) as a practical estimate of intensity in adults: A narrative review. *Br J Sports Med.* 2018;52(12):776–788.
2. Galich A. A. Pokhodka kak vizualnyi element portretnoi kharakteristiki v memuarnom tekste. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk.* 2016;(10–2):15–18. (In Russian).
3. Cruz-Jimenez M. Normal changes in gait and mobility problems in the elderly. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2017;28(4):713–725.
4. Jarchi D., Pope J., Lee T. K. M. et al. A review on accelerometry-based gait analysis and emerging clinical applications. *IEEE Rev Biomed Eng.* 2018;11:177–194.
5. Pearson M., Dieberg G., Smart N. Exercise as a therapy for improvement of walking ability in adults with multiple sclerosis: A meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2015;96(7):1339–1348.e7.
6. DeLany J. P., Kelley D. E., Hames K. C. et al. Effect of physical activity on weight loss, energy expenditure, and energy intake during diet induced weight loss. *Obesity.* 2014;22(2):363–370.
7. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A. et al. Stochastic volatility in the dynamics of complex homeostatic systems. *Doklady Akademii nauk.*

- клады Академии наук. 2017. Т. 472, № 6. С. 642–644. DOI 10.7868/S0869565217060044.
8. Еськов В. М., Еськов В. В., Вохмина Ю. В. и др. Эволюция хаотической динамики коллективных мод как способ описания поведения живых систем // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 2. С. 3–15.
- 2017;472(6):642–644. DOI 10.7868/S0869565217060044. (In Russian).
8. Eskov V. M., Eskov V. V., Vokhmina Yu. V. et al. The evolution of the chaotic dynamics of collective modes as a method for the behavioral description of living systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2016;(2):3–15. (In Russian).

Информация об авторах

Д. К. Берестин – кандидат физико-математических наук, доцент.

А. С. Кинтюхин – кандидат биологических наук, доцент.

Information about the authors

D. K. Berestin – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

A. S. Kintyukhin – Candidate of Sciences (Biology), Docent.

Научная статья

УДК 519.248:612.17

DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ КАРДИОИНТЕРВАЛОВ

Виолетта Вячеславовна Григоренко^{1✉}, Нина Борисовна Назина²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ grigv_84@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9073-4184>

² nnb60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9363-160X>

Аннотация. В статье проведен анализ литературных источников, в которых рассматривается применение контрольных карт Шухарта для различных сфер применения, приводят примеры использования предложенного статистического метода в медицине. Показано, что применение контрольных карт Шухарта для целей прогнозирования наступления критических состояний в работе биосистемы и ее параметров (на примере временных рядов кардиоинтервалов сердечно-сосудистой системы) позволяет идентифицировать ситуации, характерные для процесса перехода из одного функционального состояния в другое (в том числе патологическое).

Ключевые слова: кардиоинтервал, временной ряд, контрольная карта Шухарта, карта средних значений, карта размахов

Для цитирования: Григоренко В. В., Назина Н. Б. Применение метода контрольных карт при исследовании хаотической динамики кардиоинтервалов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 11–17. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-2.

Original article

METHOD OF CONTROL CHARTS FOR STUDYING CHAOTIC DYNAMICS OF RR INTERVALS

Violetta V. Grigorenko^{1✉}, Nina B. Nazina²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ grigv_84@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9073-4184>

² nnb60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9363-160X>

Abstract. The article analyzes literature on the use of Shewhart control charts for various purposes and presents examples of applying a proposed statistical method in medicine. The study demonstrates that it is possible to identify situations common for the transferring stage from one functional condition to another (including pathologic one) using Shewhart control charts for prediction of critical conditions in the biosystem and its parameters (on the example of time series of cardiovascular system's RR intervals).

Keywords: RR interval, time series, Shewhart control chart, mean chart, range chart

For citation: Grigorenko V. V., Nazina N. B. Method of control charts for studying chaotic dynamics of RR intervals. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):11–17. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-2.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов прогнозирования вероятного наступления критических состояний в работе сложной динамической системы является метод контрольных карт Шухарта (ККШ). Сначала контрольные карты использовали в промышленности для анализа управления и производственных процессов [1, 2], потом

область применения ККШ существенно расширилась, их стали применять в гуманитарных науках и образовании [3]. Согласно данным зарубежных источников, метод ККШ становится популярным в медицинской практике [4, 5] для проведения лабораторных исследований в биохимии (количественный химический анализ, измерение интегральных показателей

объектов окружающей среды, показателей качества продуктов нефтехимии и т. д.) [6]; для оценки влияния изменений или вмешательств в процесс организации здравоохранения на его качество [7]; для прогнозирования критических состояний в послеоперационный период, а также контроля факторов риска пациентов в сосудистом отделении интенсивной терапии [8]; измерения для систематического контроля процессов динамики заживления пролежней у пациентов при различных заболеваниях [9]. Однако в российских источниках упоминаний использования ККШ для временных рядов, описывающих состояния биосистемы, не найдено.

Вариабельность (изменчивость) играет очень важную роль в современном мире, при этом немногие исследователи используют данный метод, а его практическая реализация движется крайне медленно, поскольку большинству привычны детерминистские суждения [10]. По утверждению У. Шухарта, «...любые процессы подвержены вариабельности, но некоторые из них обладают управляемой вариабельностью, а некоторые – неуправляемой».

Существуют некоторые неправильные представления относительно использования ККШ, что они якобы применимы только к данным с нормальными законами распределения; работают в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности; работают только в том случае, если данные независимы; не могут быть применимы к данным с автокорреляцией; применимы только в статистически контролируемом состоянии [11]. В теории контрольных карт различают два типа изменчивости:

1. Контролируемая изменчивость, структура которой стабильна во времени, является действием «случайных» причин.

2. Неконтролируемая изменчивость, структура которой меняется с течением времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основной цели использования ККШ можно выделить обнаружение неестественных изменений в рядах данных из повторяющихся процессов и критериев для определения отсутствия статистической управляемости, т. е. «...карта Шухарта – это график значений определенных характеристик подгрупп в зависимости от их номера (или графическое представление, использующее статистические подходы)» [11]. Карта имеет осевую линию (CL), которая соответствует эталонному значению характеристики. На ККШ также есть определяемые контрольные границы относительно центральной линии: верхняя контрольная граница (UCL); нижняя контрольная граница (LCL) (рис. 1). Для анализа изменчивости параметров применяются карты средних значений ($\bar{X}$ -карта) и карты размахов (R -карта). На $\bar{X}$ -карту наносятся значения выборочных средних значений для контроля отклонения непрерывной переменной от среднего значения. На контрольную R -карту наносятся значения размахов выборок для контроля за степенью изменчивости непрерывного параметра. Также для анализа ККШ используются двух- и трехсигмовые границы. Для этого контрольную карту делят на шесть равных зон шириной Δ , расположенных симметрично центральной линии (рис. 1). Контрольные границы находятся на расстоянии $\pm 3\sigma$ от центральной линии. Если точки разбросаны вокруг центральной линии в пределах контрольных границ, нет серий и трендов, считается, что процесс находится в статистически контролируемом состоянии [12].

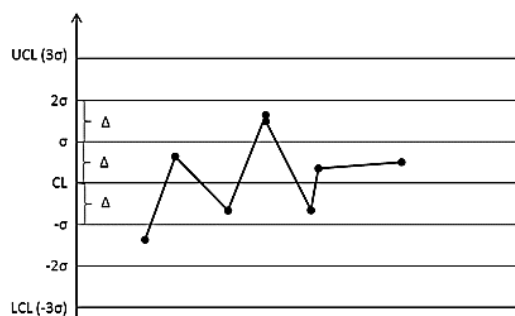


Рис. 1. Вид контрольной карты
Примечание: составлено авторами.

Для чтения ККШ необходимо использовать список правил (P_i), в соответствии с которым визуально оценивается статистическая управляемость процесса и прогнозируется его дальнейшая работа и поведение [13].

В представленном исследовании авторов статьи был разработан алгоритм прогнозирования критических состояний в работе параметров кардиосигнала (рис. 2). Представленный алгоритм позволил обнаружить особые изменения во временных рядах кардиоинтервалов и дать критерии для обнаружения нару-

шения статистической управляемости. Вывод о выходе процесса из устойчивого состояния делается на основе появления ситуации, соответствующей какому-либо правилу. Для вывода необходимо выполнение хотя бы одного правила. В исследовании использовались правила: 1) значение выше $\pm 3\sigma$; 2) 2 из 3 точек выше $\pm 2\sigma$; 3) 4 из 5 точек выше $\pm \sigma$; 4) 8 точек выше (ниже) среднего значения; 5) 6 точек по возрастанию (убыванию); 6) 14 точек подряд попеременно.

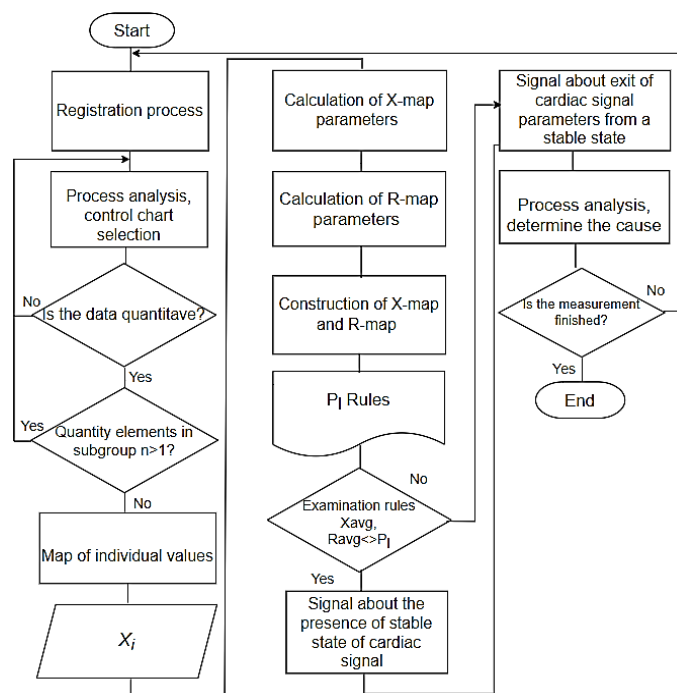


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования критических состояний в работе параметров кардиосигнала

Примечание: составлено авторами.

В эксперименте приняли участие 6 представительниц коренных малочисленных народов Севера в возрасте от 18 до 70 лет. Они были разбиты на две группы со схожим условным функциональным состоянием сердечно-сосудистой системы в каждой группе: нормогенез – 3 человека, патогенез – 3 человека [14].

При помощи пульсоксиметра Элокс-01 М с одного из пальцев испытуемых в течение 5-минутного интервала в положении сидя в спокойном состоянии была зарегистрирована пульсовая волна [15]. В качестве объекта исследования из всей пульсовой волны был взят кардиоинтервал. Кардиоинтервалы – это интервалы между последовательными ударами

сердца, характеризующими его работу, измеряемые в миллисекундах [16].

Использование группового подхода к построению карт нецелесообразно, поскольку исходные данные были получены в результате разовых экспериментов в условиях удаленного проживания коренных народов Севера. Поэтому для прогнозирования изменений состояния сердечно-сосудистой системы применяли карты индивидуальных значений [16]. При использовании карт индивидуальных значений рациональные подгруппы для обеспечения оценки изменчивости внутри группы не применяют, и контрольные границы рассчитывают на основе меры вариации, полученной

по скользящим размахам двух наблюдений. На основе скользящих размахов вычисляют средний скользящий размах, который используют для построения контрольных карт [17].

Важно отметить, что тип распределения случайных величин неважен при построении ККШ: карты размахов и средних устойчивы по отношению к тем отклонениям от нормальности, которые встречаются в данных кардиоинтервалов. Этим картам можно доверять: они будут хорошо работать даже в том случае, когда закон распределения отличается от нормального. Формулы для построения контрольных карт подробно представлены в источнике [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После вычисления контрольных границ и построения самой ККШ было проведено

сравнение нанесенных точек средних и размахов с контрольными границами. Точки за пределами контрольных границ, необычные структуры и тенденции выделяются, чтобы указать на завершение процесса статистически стабильного состояния. Для каждого сигнала о выходе процесса из статистически стабильного состояния проведен анализ, чтобы определить причину выхода процесса из статистически контролируемого состояния.

На рис. 3 и 4 представлены примеры использования ККШ индивидуальных значений для испытуемой в возрасте 49 лет в состоянии условного нормогенеза (рис. 3А, В) и для испытуемой в возрасте 29 в состоянии условной патологии (рис. 4А, В) по правилу: если значения выходят за пределы $\pm 3\sigma$, то процесс вскоре выйдет из устойчивого состояния (далее правило $\pm 3\sigma$).

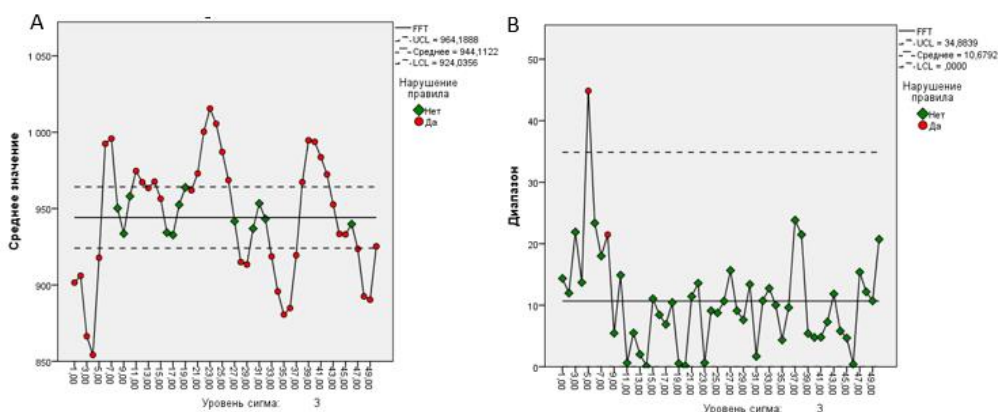


Рис. 3. Контрольная карта индивидуальных значений для испытуемой в возрасте 49 лет в состоянии условного нормогенеза:

А) X-карта, В) R-карта

Примечание: составлено авторами.

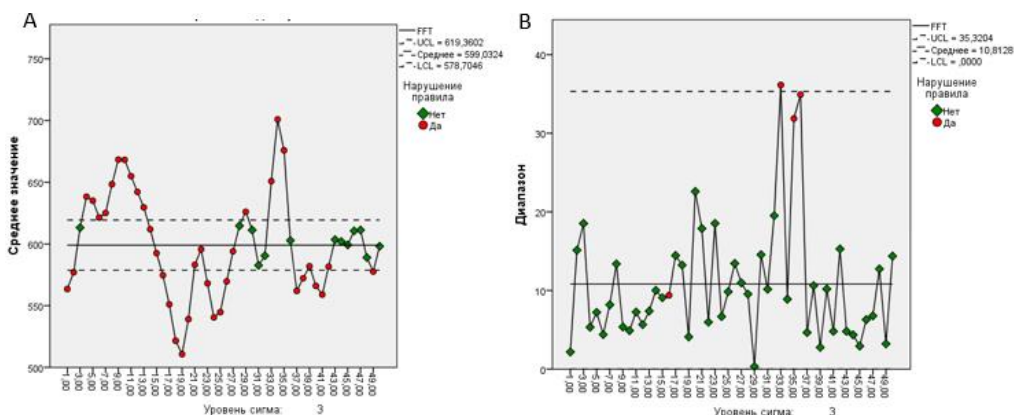


Рис. 4. Контрольная карта индивидуальных значений для испытуемой в возрасте 29 лет в состоянии условной патологии:

А) X-карта, В) R-карта

Примечание: составлено авторами.

На контрольных X -картах (рис. 3А, 4А) красным цветом отмечено выполнение правила $\pm 3\sigma$. Также правило выполнено и на R -картах (рис. 3В, 4В), т. е. вариация данных неста-

бильна при переходе от одной подгруппы к другой. Результаты работы контрольных карт представлены в таблице.

Таблица

Результаты выполнения правил во временных рядах кардиоинтервалов испытуемых в различных функциональных состояниях

Группа	Возраст	Правила						
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	Все
		Количество точек, соответствующих выполнению правил						
№ 1: нормогенез	18	3	38	38	24	-	-	103
	49	-	40	32	2	4	-	78
	70	-	39	30	10	6	-	85
	Итого нарушений по группе	3	117	100	36	10	-	266
№ 2: патогенез	29	7	45	62	30	5	-	149
	46	6	49	40	12	4	-	111
	64	5	45	45	25	9	1	130
	Итого нарушений по группе	18	139	147	67	18	1	390

Примечание: составлено авторами.

Как видно из таблицы, количество выполнения правил в большей степени характерно для группы с вероятными признаками патологий:

1. Правило № 1 (значение выше/ниже $\pm 3\sigma$) в группе нормогенеза выполнилось 3 раза, в группе патогенеза – 18 раз.

2. Правило № 2 (2 из 3 точек выше/ниже $\pm 2\sigma$) в группе нормогенеза выполнилось 117 раз, в группе патогенеза – 139 раз.

3. Правило № 3 (4 из 5 точек выше/ниже $\pm \sigma$) в группе нормогенеза выполнилось 100 раз, в группе патогенеза – 147 раз.

4. Правило № 4 (8 точек выше/ниже среднего значения) в группе нормогенеза выполнилось 36 раз, а для группы с патологией почти в 2 раза больше – 67 раз.

5. Правило № 5 (6 точек по возрастанию/убыванию) выполнилось для группы нормогенеза 10 раз, для группы патогенеза – 18 раз.

6. Правило № 6 (14 точек подряд попеременно) в первом случае не выполнилось, что говорит о стабильном состоянии параметров кардиосигнала, в отличие от группы с пато-

логией, в которой присутствует один человек с выполнением данного правила.

Общее количество выполнения всех правил для группы нормогенеза составило 266 раз, а для группы с патологией сердечно-сосудистой системы – 390 раз. В результате удалось зафиксировать изменения в процессе работы сердца для группы в нормогенезе в 29 % всех случаев и для группы в патогенезе – в 43 % всех случаев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный алгоритм позволил идентифицировать ситуации, характерные для процесса перехода из одного функционального состояния в другое (в том числе патологическое). Количество выполнения правил в большей степени характерно для группы с вероятными признаками патологий, в отличие от группы в нормогенезе. Выполнение правила говорит о ближайшем выходе процесса из состояния устойчивого равновесия, что в нашем случае характерно для сбоя в работе сердечно-сосудистой системы или ее параметров.

Список источников

- Shewhart W. A. Economic control of quality of manufactured product. Milwaukee, Wis: American Society for Quality Control; 1980. 501 p.

References

- Shewhart W. A. Economic control of quality of manufactured product. Milwaukee, Wis: American Society for Quality Control; 1980. 501 p.

2. Адлер Ю. П., Жулинский С. Ф., Шпер В. Л. Проблемы применения методов статистического управления процессами на отечественных предприятиях // Методы менеджмента качества. 2009. № 8. С. 36–40.
3. Gitlow H. S. Viewing statistics from a quality control perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2001;18(2):169–179.
4. Balestracci D. Jr. Data Sanity: A quantum leap to unprecedented results. Englewood: Medical Group Management Association; 2009. 326 p.
5. Carey R. G. Quality with confidence in healthcare: A practical guide to quality improvement in healthcare. Chicago, IL: SPSS; 1997. 218 p.
6. Меньшиков В. В. Лабораторные методы исследований в клинике. М.: Медицина, 1987. 368 с.
7. Slyngstad L. The contribution of variable control charts to quality improvement in healthcare: A literature review. *J Healthcare Leadership*. 2021;13:221–230.
8. Mathis M. R., Engoren M. C., Williams A. M. et al. Prediction of postoperative deterioration in cardiac surgery patients using electronic health record and physiologic waveform data. *Anesthesiology*. 2022;137(5):586–601.
9. Clark M., Young T., Fallon M. Systematic review of the use of statistical process control methods to measure the success of pressure ulcer prevention. *Int Wound J*. 2018;15(3):391–401.
10. Shewhart W. A. Statistical methods from the viewpoint of quality control. New York: Dover Publications, Inc.; 1986. 155 p.
11. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М.: Альпина Паблишер, 2016. 409 с.
12. Шайторова И. А., Микшина В. С., Назина Н. Б. Прогнозирование внештатных ситуаций в электроэнергетике на основе методов статистического управления // Вестник кибернетики. 2015. № 3. С. 203–211.
13. ГОСТ Р 50779.40-96. Статистические методы. Контрольные карты. Общее руководство и введение. М.: Стандартинформ, 1996. 14 с.
14. Вандымова Ю. Т., Григоренко В. В., Микшина В. С. Прогнозирование наступления критических состояний работы сердечно-сосудистой системы коренного и пришлого населения Севера РФ // Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов: сб. ст. Первой междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, состоявшейся в рамках мероприятий Первого междунар. молодежного науч.-практ. форума «Нефтяная столица», 08–09 февраля 2018 г., г. Сургут. Сургут: СурГУ, 2018. С. 45–53.
15. Grigorenko V. V., Bashkatova Y. V., Shakirova L. S. et al. New information technologies in the estimation of stationary modes of the third type systems. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2020;862(5):052034.
2. Adler Yu. P., Zhulinsky S. F., Shper V. L. Problemy primeneniia metodov statisticheskogo upravleniia protsessami na otechestvennykh predpriiatiakh. *Methods of Quality Management*. 2009;(8):36–40. (In Russian).
3. Gitlow H. S. Viewing statistics from a quality control perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2001;18(2):169–179.
4. Balestracci D. Jr. Data Sanity: A quantum leap to unprecedented results. Englewood: Medical Group Management Association; 2009. 326 p.
5. Carey R. G. Quality with confidence in healthcare: A practical guide to quality improvement in healthcare. Chicago, IL: SPSS; 1997. 218 p.
6. Menshikov V. V. Laboratornye metody issledovaniy v klinike. Moscow: Meditsina; 1987. 368 p. (In Russian).
7. Slyngstad L. The contribution of variable control charts to quality improvement in healthcare: A literature review. *J Healthcare Leadership*. 2021;13:221–230.
8. Mathis M. R., Engoren M. C., Williams A. M. et al. Prediction of postoperative deterioration in cardiac surgery patients using electronic health record and physiologic waveform data. *Anesthesiology*. 2022;137(5):586–601.
9. Clark M., Young T., Fallon M. Systematic review of the use of statistical process control methods to measure the success of pressure ulcer prevention. *Int Wound J*. 2018;15(3):391–401.
10. Shewhart W. A. Statistical methods from the viewpoint of quality control. New York: Dover Publications, Inc.; 1986. 155 p.
11. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Moscow: Alpina Publisher; 2016. 409 p. (In Russian).
12. Shaitorova I. A., Mikshina V. S., Nazina N. B. Emergency situations forecasting in power industry with statistical control methods. *Proceedings in Cybernetics*. 2015;(3):203–211. (In Russian).
13. GOST (State Standard) R 50779.40-96. Statistical methods. Control charts. General guide introduction. Moscow: Standartinform; 1996. 14 p. (In Russian).
14. Vandymova Yu. T., Grigorenko V. V., Mikshina V. S. Prediction of cardiovascular system critical condition in native and alien population of the Russian North. In: *Proceedings of the First International Research-to-Practice Conference for Young Scientists and Specialists “Tekhnologii budushchego neftegazodobyvayushchikh regionov”* as a part of the First International Youth Applied Forum “Oil Capital”, February 8–9, 2018, Surgut. Surgut: SurSU; 2018. p. 45–53. (In Russian).
15. Grigorenko V. V., Bashkatova Y. V., Shakirova L. S. et al. New information technologies in the estimation of stationary modes of the third type systems. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2020;862(5):052034.
16. Eskov V. M., Khadartsev A. A., Kozlova V. V. et al. Sistemnyi analiz, upravlenie i obrabotka informatsii v biologii i meditsine. Vol. XI. Sistemnyi sintez parametrov funktsii organizma zhitelei Iugry na baze neirokompiutinga i teorii khaos-samoorganizatsii

16. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Козлова В. В. и др. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине. Т. XI. Системный синтез параметров функций организма жителей Югры на базе нейрокомпьютинга и теории хаос-самоорганизации в биофизике сложных систем : моногр. Самара : Офорт, 2014. 192 с.
17. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Knoxville, Tenn.: SPC Press; 1992. 406 p.
17. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Knoxville, Tenn.: SPC Press; 1992. 406 p.
17. Wheeler D. J., Chambers D. S. Understanding statistical process control. Knoxville, Tenn.: SPC Press; 1992. 406 p.

Информация об авторах

В. В. Григоренко – старший преподаватель.
Н. Б. Назина – доцент.

Information about the authors

V. V. Grigorenko – Senior Lecturer.
N. B. Nazina – Docent.

Научная статья
УДК 004.94:519.876.5
DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-3

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА АНТРОПОМОРФНОЙ КИСТИ РУКИ

Олег Валерьевич Гусев

*Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева,
Рыбинск, Россия*

gusevov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>

Аннотация. Рассматриваются вопросы гибридного моделирования антропоморфной кисти руки человека на основе интеграции CAD/CAE-систем и среды физического моделирования, многозвенных пространственных механизмов SimMechanics системы Simulink, применяемых для симуляции динамики захвата и анализа усилий, развиваемых кистью. В качестве объекта исследования используется твердотельная модель кисти руки, разработанная в среде SolidWorks.

Ключевые слова: антропоморфная кисть, SimScape, SimMechanics, динамический расчет, имитационное моделирование

Для цитирования: Гусев О. В. Имитационное моделирование захвата антропоморфной кисти руки // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 18–25. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-3.

Original article

SIMULATION OF ANTHROPOMORPHIC WRIST GRIPPING

Oleg V. Gusev

Rybinsk State Technical University, Rybinsk, Russia

gusevov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>

Abstract. The article examines the issues of hybrid simulation of anthropomorphic human wrist based on the integration of CAD/CAE systems and environment of physical simulation, as well as the SimMechanics multijointed special mechanisms of the Simulink system, which are used for grip dynamics simulation and wrist effort analysis. The object of the study is a solid model of a wrist designed in SolidWorks.

Keywords: anthropomorphic wrist, SimScape, SimMechanics, dynamic calculation, simulation

For citation: Gusev O. V. Simulation of anthropomorphic wrist gripping. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):18–25. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-3.

ВВЕДЕНИЕ

Рука человека является сложным органом, универсальность которого достигается за счет ее комплексной анатомической структуры. Современной тенденцией является разработка антропоморфных роботизированных рук с манипуляциями, близкими к производимым человеком. В последние годы был разработан ряд антропоморфных роботизированных рук [1, 2], которые имитируют анатомическую структуру руки человека. Во всех случаях предварительно разрабатывается модель, с приме-

нием которой возможно произвести анализ динамических характеристик хвата человеческой руки, расчет усилий, развиваемых в процессе хвата, а также проанализировать алгоритмы прямой и инверсной кинематики.

Движения активных частей роботизированных рук обеспечивают, как правило, два основных действия: «захват» и «щуп». «Захват» позволяет выполнять действия с крупными объектами вроде поднятия или перемещения стула. Действие «щуп» позволяет выполнять работы, связанные с мелкой моторикой, напри-

мер, завязывание шнурков [3]. Естественно, что такие действия, как поднятие тяжелого предмета и захвата пластикового стакана, требуют развития разных усилий. Поэтому при реализации разных типов действий необходим предварительный расчет усилий, развиваемых рукой и ее активными частями. Целью статьи является разработка антропоморфной твердотельной модели кисти руки человека, которая позволит проанализировать усилия, развиваемые кистью при ее движении, а также измерить динамические характеристики хвата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с тем, что геометрические размеры антропоморфной твердотельной модели должны соответствовать параметрам кисти взрослого человека [4], при разработке модели использовалась техника масштабирования. За основу взяты три линейных размера кисти человека: длина (Hand Length – HL), ширина (Hand Breadth – HB) и значение окружности кисти (Hand Circumference – HC) (рис. 1).

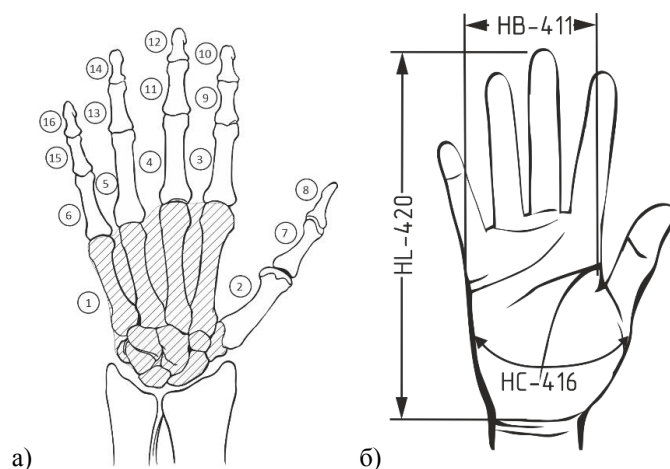


Рис. 1. Антропоморфные размеры руки человека:

- а) маркировка фаланг кисти человека в соответствии с данными;
б) измерение параметров HL, HB и HC руки в соответствии с данными исследования

Примечание: составлено автором по [5, 6].

Перечисленные значения можно измерить при натурных испытаниях в рамках эксперимента либо получить их из литературных источников [5, 6]. В качестве предельных зна-

чений параметров HL, HB и HC при проектировании модели кисти использовались данные измерений, проведенных в [5] для мужчин в возрасте 40 лет (табл. 1).

Таблица 1

Значение HL, HB и HC для 3-х перцентилей выборки данных исследований

№ параметра, мм	5-я перцентиль	50-я перцентиль	95-я перцентиль
420 – HL	179	193	206
411 – HB	82	89	96
416 – HC	203	218	234

Примечание: составлено автором на основании источника [5].

Основываясь на данных табл. 1, параметры проектируемой антропоморфной кисти должны находиться в пределах $193 \times 89 \times 42$ мм (использовалась 50-я перцентиль). Следующим этапом является расчет размеров фаланг пальцев. При этом параметры HL, HB и HC

выступают в качестве масштабирующих коэффициентов. Нормированные значения размеров фаланг пальцев даны в табл. 2 и получены из работы [6]. Номера строк в табл. 2 соответствуют номерам фаланг пальцев на рис. 1а.

Таблица 2

Размеры и масса фаланг пальцев руки

№	Линейные размеры		Масса, кг
1	a = 0,451; b = 1,400; c = 1,200		0,662
	<i>l</i>	<i>r/l</i>	<i>m</i>
2	0,26	0,155	0,121
3	0,237	0,146	0,03
4	0,254	0,136	0,033
5	0,243	0,119	0,022
6	0,196	0,147	0,018
7	0,173	0,2	0,022
8	0,15	0,192	0,014
9	0,15	0,192	0,014
10	0,121	0,19	0,007
11	0,173	0,167	0,016
12	0,121	0,19	0,007
13	0,168	0,172	0,015
14	0,121	0,19	0,007
15	0,121	0,19	0,007
16	0,116	0,15	0,004

Примечание: составлено автором на основании источника [6].

Длина фаланг пальцев (*l*) дана в табл. 1 в нормализованной форме. В качестве нормирующего параметра выступает значение длины кисти (параметр *HL*, рис. 1). Параметры *b* и *c* (ширина и толщина фаланг соответственно) приведены к значениям параметров *HB* и *HC* соответственно. Значение массы фаланг (*m*) приведено к общей массе кисти. В связи с тем,

что для каждого пальца рассчитывается три значения радиуса (*r*), за основное при разработке твердотельной модели брали максимальное значение радиуса из трех. В табл. 3 даны значения размеров пальцев кисти с использованием масштабирующих коэффициентов *HL*, *HB* и *HC* и данных табл. 2.

Таблица 3

Размеры пальцев кисти, вычисленные с применением масштабирующих коэффициентов

Наименование	Длина, мм	Радиус, мм
Большой (thumb finger)	112,5	7,8
Указательный (index finger)	98	6,8
Средний (middle finger)	105,8	5,8
Безымянный (ring finger)	102,7	5,6
Мизинец (little finger)	83,6	4,5

Примечание: составлено автором.

Палец проектируемой кисти должен обеспечить изменение угла при сгибании от 0 до 180°, где 0° – выпрямленный палец, а 180° –

согнутый (рис. 2). Набор комбинаций пальцев позволяет реализовывать основные виды хватов, необходимых в повседневной жизни.

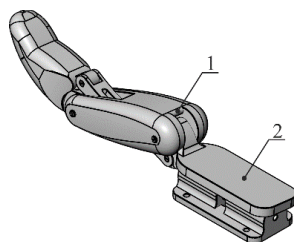


Рис. 2. Конструкция твердотельной модели пальца:

1 – элемент крепления подвижного механизма привода; 2 – площадка размещения линейного привода

Примечание: составлено автором.

При проектировании твердотельной модели пальца количество его элементов было сведено к минимуму. Для реализации движения пальца, его сгибания и разгибания в биопротезировании применяются линейные приводы [7, 8]. С использованием линейных приводов возможно добиться плавности движения подвижных частей кисти руки. При этом линейный привод реализует такой же тип движения, что и человеческие мышцы. В проектируемой

модели привод размещается в пространстве элемента 2 (рис. 2), крепление его движущего механизма осуществляется к элементу 1 пальца. Аналогичную конструкцию имеют все остальные пальцы модели кроме большого, который имеет дополнительную ось вращения. На рис. 3 показана разработанная твердотельная модель кисти, спроектированная с учетом масштабирующих коэффициентов HL, HB и HC.

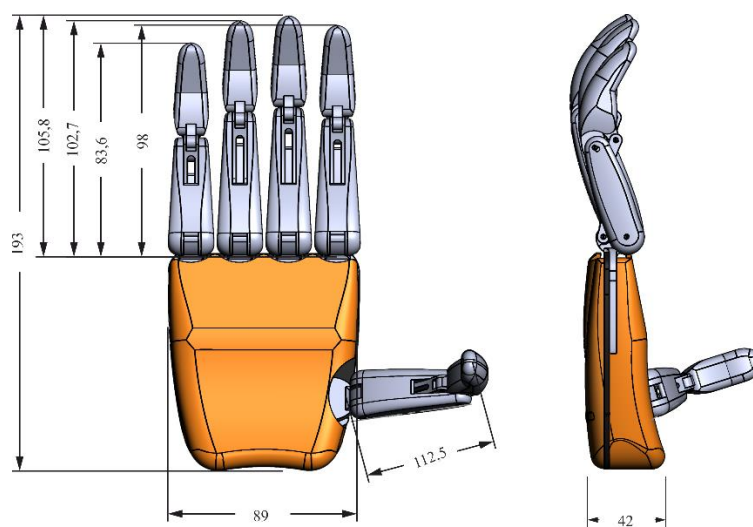


Рис. 3. Размеры антропоморфной твердотельной модели кисти руки

Примечание: составлено автором.

Разработка твердотельной модели осуществлялась с использованием CAD/CAE информационных технологий. При этом в ряде CAD/CAE-систем существуют встроенные средства моделирования движения и анализа динамики механизмов (например, SolidWorks Simulation). Однако подобные инструменты поддерживают анализ только простейших разомкнутых систем. В разработке при анализе динамики схвата применялся гибридный метод моделирования. Метод основан на использовании для разработки твердотельной модели кисти одной из CAD-систем (SolidWorks, Autodesk Inventor, PTC ProEngineer) с последующим импортом модели в среду имитационного моделирования Simulink, которая в своем составе содержит специализированный пакет расширения SimMechanics [9]. Пакет SimMechanics служит для моделирования и расчета многодельных пространственных механизмов. SimMechanics содержит встроен-

ный редактор, который позволяет с использованием примитивов разрабатывать модели простейших систем, т. е. сама твердотельная модель для анализа может быть построена с использованием только внутреннего редактора пакета. Однако данный подход довольно трудоемок, при этом погрешности при моделировании часто приводят к отказам в процессе расчета.

Таким образом, гибридная модель включает в себя твердотельную CAD-модель кисти, которая транслируется в систему MATLAB/Simulink. Разработчики MATLAB/Simulink позволяют использовать трансляторы [10] сборок для таких CAD-систем, как SolidWorks, Autodesk Inventor и PTC ProEngineer. Механизм импорта твердотельной модели детально описан в [9, 11] и в сокращенном виде представлен на рис. 4. Для импортирования твердотельной модели антропоморфной кисти в систему MATLAB использовалась свободно-распро-

страняемая утилита SimScape Multibody Link, которая преобразует данные механической системы из CAD-системы в приложение физического моделирования SimScape Multibody. Утилита SimScape Multibody Link генерирует два файла, содержащих информацию о геометрии твердотельной модели (файл *.stl), а также файл данных, содержащий информацию

о сопряжении деталей между собой и их физических характеристиках (файл данных .xml).

В среде Simulink/SimScape твердотельная модель (файл *.stl) визуализируется в редакторе программы, и на основе полученных данных генерируется Simulink-модель (файл *.slx/*.mdl) со связями и сопряжениями в системе SimMechanics.

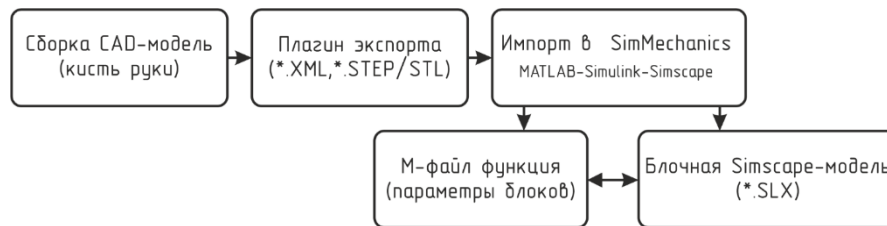


Рис. 4. Пользовательский импорт CAD-модели в систему MATLAB/Simulink
 Примечание: составлено автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационная модель антропоморфной кисти, импортированная в систему Simulink/SimScape Multibody, представлена на рис. 5.

К блокам, которые содержат данные о геометрии фаланг пальцев, добавлены датчики, анализирующие положения угла и скорости при анализе динамики схвата.

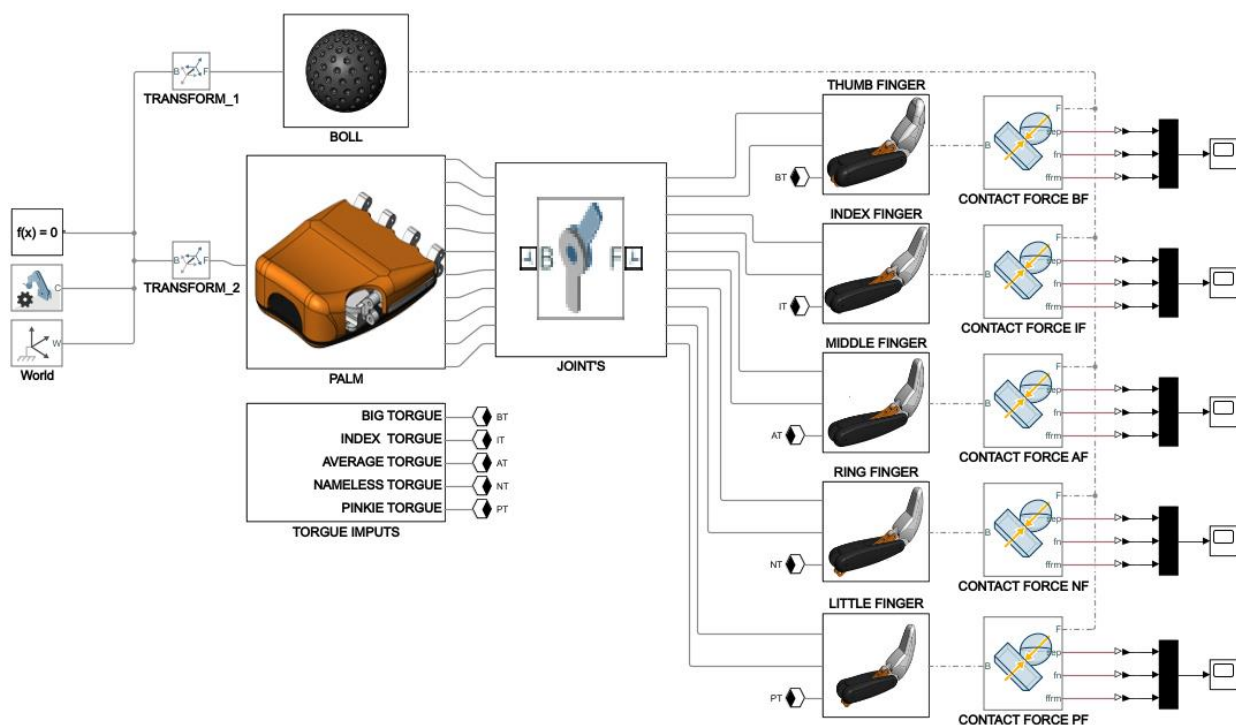


Рис. 5. Имитационная блочная модель Simulink/SimScape антропоморфной кисти руки
 Примечание: составлено автором.

Твердотельные элементы сборки (блоки Solid) в блочной модели соединяются между собой через фреймы (Frames). Каждый палец

состоит из набора твердотельных сегментов (блоков Solid), блоки соединяются между собой и с ладонью (блок PALM) при помощи

сочленений (блок JOINTS на рис. 5). Сегменты кисти руки объединяются в кинематические пары, которые в свою очередь объединяются в кинематические цепи и образуют иерархические цепочки. При реализации как прямой, так и инверсной кинематики фаланги пальцев руки должны двигаться в разумных антропоморфических пределах. Пределы, которые ограничивают движение суставов руки, задаются внутри блоков JOINTS (параметр constraints блока).

На рис. 5 показана блок-схема имитационной модели кисти руки с фалангами, блоком контактной поверхности (блок BOLL) и блоками моделирования контакта (блоки CONTACT FORCE). При моделировании захвата тела сферической формы необходимо описать 5 точек контакта сферы с фалангами пальцев [12]. Сама сфера (блок BOLL) жестко закреплена, т. е. имеет кинематическое огра-

ничение по перемещению. В связи с тем, что в качестве двигателей в модели используются линейные приводы, то усилия, создаваемые ими, задаются блоком TORQUE INPUTS. Блок генерирует усилия, подаваемые на фаланги пальцев (значения усилий задаются в Ньютонах).

На рис. 6 показана модель кисти руки при симуляции схвата мяча в системе Mechanics Explorer. Mechanics Explorer является инструментом SimScape Multibody на основе OpenGL Silicon Graphics API, который позволяет визуализировать и исследовать модели в динамике взаимодействия их со средой либо с отдельными предметами. Точки приложения усилий от линейных приводов показаны в среде Mechanics Explorer в виде маркеров (на рис. 6 в системе Mechanics Explorer маркеры изображены в виде сфер).

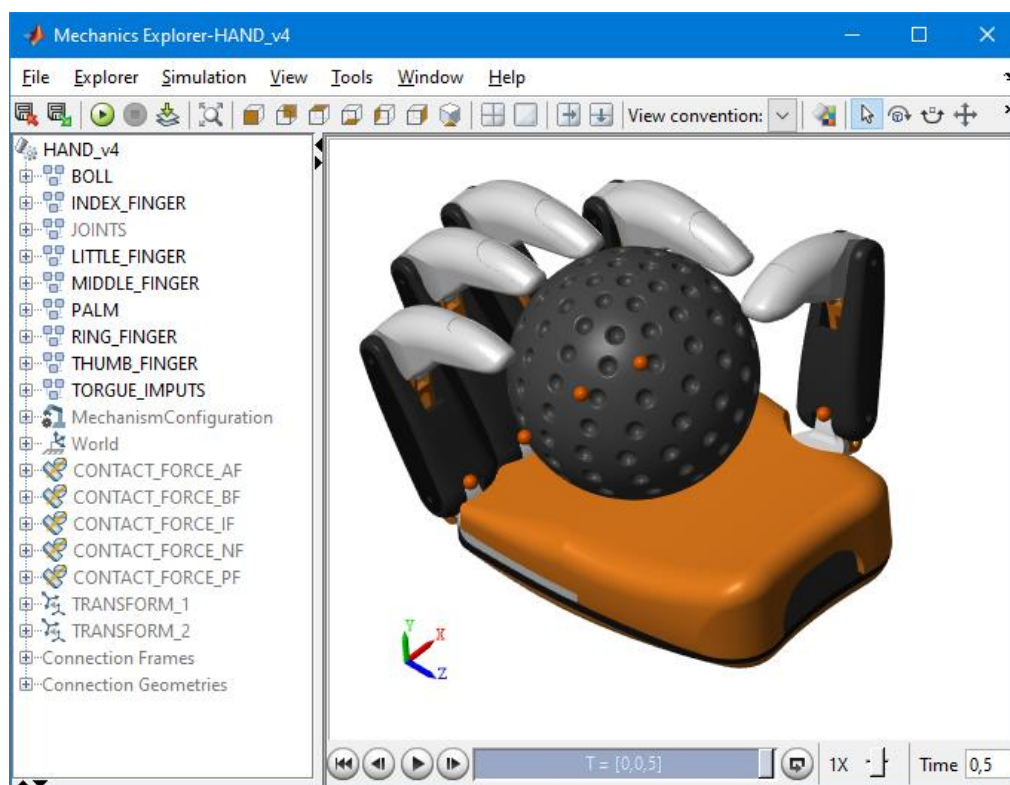


Рис. 6. Моделирование хвата в среде в Mechanics Explorer

Примечание: составлено автором.

Для моделирования динамического контактного взаимодействия фаланг пальцев с предметом (блок BOLL на рис. 5) и анализа усилий нажатия использовался блок CONTACT

FORCE (см. рис. 5). Данный блок позволяет получить такие характеристики контактного взаимодействия, как значение нормальной составляющей контактного взаимодействия

(Normal forces), значение силы трения (Friction forces) в точке контакта и изменение расстояния между контактируемыми телами (Separation Distance).

На рис. 7 изображены результаты имитационного моделирования процессов при захвате объекта.

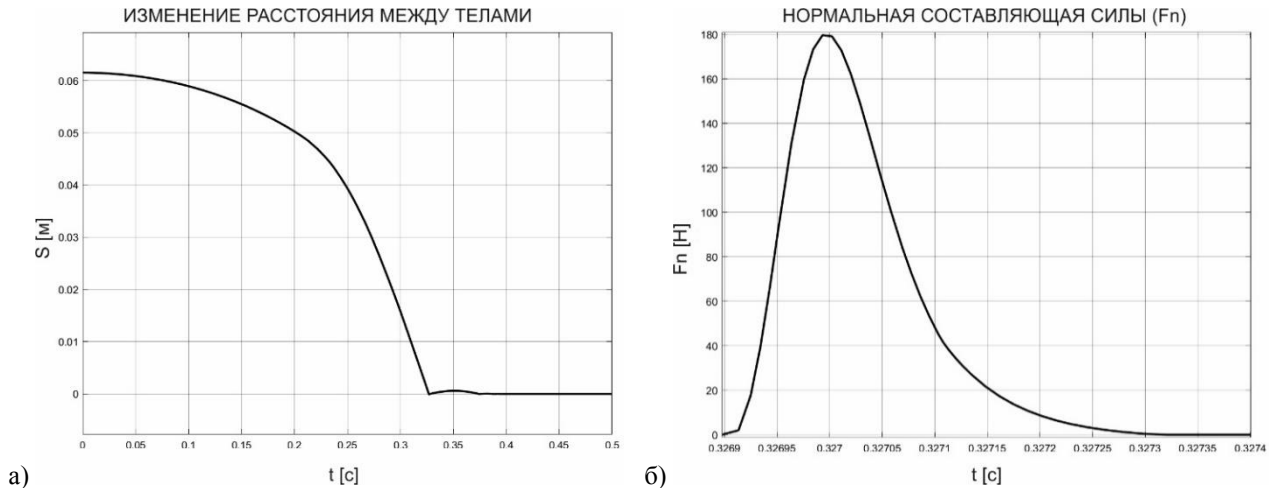


Рис. 7. Результаты имитационного моделирования хвата:

- а) изменение расстояния между кончиком указательного пальца и поверхностью шара;
б) изменение нормальной составляющей силы в точке касания поверхностей

Примечание: составлено автором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выбора линейного привода для антропоморфных протезов необходимо знать две его характеристики. К первой относят силу, которую привод должен приложить для перемещения или удержания объекта. Ко второй характеристике относят требуемую скорость движения линейного привода, которая связана со скоростью хвата антропоморфной кисти.

Приведены графики изменения положения указательного пальца (блок INDEX FINGER на рис. 5) и силы контактного взаимодействия

при выполнении обхватывающего захвата сферы. Аналогичные графики изменения силы и расстояния до поверхности тела имеют остальные пальцы кисти. Движение механизма кисти полностью детерминировано. Исходя из результатов моделирования, возможно подобрать такой линейный привод, который будет удовлетворять требованиям для реализации необходимой скорости хвата, а также усилий, развиваемых при захвате предметов.

Список источников

1. Мирошина Ю. Д. Бионические протезы в современной ортопедии // Молодой ученый. 2021. № 14. С. 47–49.
2. Wang D., Xiong Y., Zi B. et al. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms. *Mechanisms and Machine Theory*. 2021;155:104094.
3. Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*. 1982;12(3):289–299.
4. Neil A., Andris F. A graphic model of the human hand using CATIA. *International Journal of industrial Ergonomics*. 1993;12(4):255–264.
5. National Aeronautics and Space Administration. Anthropometry and biomechanics. In: NASA-STD-3000,

References

1. Miroshina Yu. D. Bionicheskie protezy v sovremennoi ortopedii. *Molodoi uchenyi*. 2021;(14):47–49. (In Russian).
2. Wang D., Xiong Y., Zi B. et al. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms. *Mechanisms and Machine Theory*. 2021;155:104094.
3. Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*. 1982;12(3):289–299.
4. Neil A., Andris F. A graphic model of the human hand using CATIA. *International Journal of industrial Ergonomics*. 1993;12(4):255–264.

- Man-System Integration Standards. Vol. I, Section 3. 1995. URL: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm> (дата обращения: 17.10.2023).
6. Biryukova E. V., Yourovskaya V. Z. A model of human hand dynamics. In: Schuind F., An K. N., Cooney W. P., Garcia-Elia M., editors. *Advances in the biomechanics of the hand and wrist*. NATO ASI Series. Vol. 256. Boston, MA: Springer; 1994. p. 107–122.
 7. Zolnoun D., Gandomi Y. A. Biomechanical model of human index finger during examination. *Journal of Science and Medicine*. 2021;3(1):1–14.
 8. Li L., Godaba H., Ren H. et al. Bioinspired soft actuators for eyeball motions in humanoid robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019;24(1):100–108.
 9. Hroncova D., Pastor M. Mechanical system and SimMechanics simulation. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013;1(7):251–255.
 10. Singla A., Singh G., Virk G. S. et al. Matlab/Sim Mechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation. *Perspectives in Sciences*. 2016;8:351–354.
 11. Achilli G. M., Logozzo S., Valigi M. C. et al. Under-actuated soft gripper for helping humans in harmful works. In: Quaglia G., Gasparetto A., Petuya V., Carbone G., editors. *Proceedings of I4SDG Workshop 2021. I4SDG 2021. Mechanisms and Machine Science*. Vol. 108. Cham: Springer; 2021. p. 264–272.
 12. Corral E., Gismeros Moreno R., Meneses J. et al. Spatial algorithms for geometric contact detection in multibody system dynamics. *Mathematics*. 2021;9(12):1359.
 5. *National Aeronautics and Space Administration*. Anthropometry and biomechanics. In: NASA-STD-3000, Man-System Integration Standards. Vol. I, Section 3. 1995. URL: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm> (accessed: 17.10.2023).
 6. Biryukova E. V., Yourovskaya V. Z. A model of human hand dynamics. In: Schuind F., An K. N., Cooney W. P., Garcia-Elia M., editors. *Advances in the biomechanics of the hand and wrist*. NATO ASI Series. Vol. 256. Boston, MA: Springer; 1994. p. 107–122.
 7. Zolnoun D., Gandomi Y. A. Biomechanical model of human index finger during examination. *Journal of Science and Medicine*. 2021;3(1):1–14.
 8. Li L., Godaba H., Ren H. et al. Bioinspired soft actuators for eyeball motions in humanoid robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019;24(1):100–108.
 9. Hroncova D., Pastor M. Mechanical system and SimMechanics simulation. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013;1(7):251–255.
 10. Singla A., Singh G., Virk G. S. et al. Matlab/Sim Mechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation. *Perspectives in Sciences*. 2016;8:351–354.
 11. Achilli G. M., Logozzo S., Valigi M. C. et al. Under-actuated soft gripper for helping humans in harmful works. In: Quaglia G., Gasparetto A., Petuya V., Carbone G., editors. *Proceedings of I4SDG Workshop 2021. I4SDG 2021. Mechanisms and Machine Science*. Vol. 108. Cham: Springer; 2021. p. 264–272.
 12. Corral E., Gismeros Moreno R., Meneses J. et al. Spatial algorithms for geometric contact detection in multibody system dynamics. *Mathematics*. 2021;9(12):1359.

Информация об авторе

О. В. Гусев – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the author

O. V. Gusev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья
УДК 004.383.8.032.26:616.8
DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-4

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ НЕЙРОПРОТЕЗОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СПАЙКОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сергей Владимирович Кравченко

Краснодарский филиал Национального медицинского исследовательского центра
«Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» имени академика
С. Н. Федорова» Минздрава России, Краснодар, Россия
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
ksv.1991@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2733-1072>

Аннотация. Представлена разработка модульной системы прототипирования нейтропротезов для решения задачи компенсации функций поврежденных и утраченных структур центральной нервной системы при помощи электронных устройств, моделирующих работу биологических нейронов. Искусственные нейроны демонстрируют способность отвечать импульсацией в ответ на внешнюю стимуляцию либо сигнал от пресинаптического нейрона, способность к пространственной и временной суммации, нейропластичность, что свидетельствует о потенциале применения разработанной системы.

Ключевые слова: нейтропротез, нейроинженерия, спайковые нейронные сети, нейрокомпьютер, искусственные нейронные сети, микроконтроллер, когнитивный нейтропротез, LIF-нейрон

Для цитирования: Кравченко С. В. Разработка системы прототипирования нейтропротезов на основе гибридной программно-аппаратной реализации спайковых нейронных сетей // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 26–32. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-4.

Original article

DEVELOPING A SYSTEM FOR NEURAL PROTOTYPING OF NEURAL PROSTHESES BASED ON THE HYBRID SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF SPIKING NEURAL NETWORKS

Sergey V. Kravchenko

Krasnodar Branch of the S. Fedorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Krasnodar, Russia
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
ksv.1991@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2733-1072>

Abstract. The study presents a development of a modular system for prototyping a neural prosthesis aimed at compensating functions of damaged or lost structures of central nervous system using electronic devices that mimic the behavior of biological neurons. Artificial neurons demonstrate the ability to respond to an external stimulation or a signal from presynaptic neuron with impulsation; the ability to perform spatial and temporal summation, neural plasticity, all of which demonstrate capabilities of the developed system.

Keywords: neural prosthesis, neural engineering, spiking neural networks, neural computer, artificial neural networks, microcontroller, cognitive neural prosthesis, LIF neuron

For citation: Kravchenko S. V. Developing a system for neural prototyping of neural prostheses based on the hybrid software and hardware implementation of spiking neural networks. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):26–32. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-4.

ВВЕДЕНИЕ

Гибель участков нервной ткани в головном мозге, нейродегенеративные заболевания

и травмы нередко приводят к инвалидизации пациентов, когнитивным и психическим нарушениям, которые наблюдаются, например,

у 30–70 % больных, перенесших инсульт [1]. Кроме того, возможно нарушение процессов восприятия и обработки поступающей от органов чувств сенсорной информации. Так, по данным Г. В. Тихомирова и соавт., в ходе ретроспективного исследования частоты встречаемости зрительной агнозии у пациентов с острым ишемическим инсультом та или иная форма зрительной агнозии была выявлена у 52 % обследованных [2]. Протезирование элементов центральной нервной системы (ЦНС) является сложной, но актуальной задачей, одним из первых примеров успеха на пути реализации которой можно назвать прототип искусственного гиппокампа, протестированный на животных W. Berger и соавт. [3]. В представленной работе на основе данных о взаимосвязи паттернов активности полей CA3 и CA1 гиппокампа авторами была разработана математическая модель, предсказывающая паттерны нейронной активности на выходе поля CA3, формирующиеся в ответ на поступающие к гиппокампам сигналы. Нейропротез, основанный на данной модели, позволял в эксперименте крысам с фармакологически нарушенной работой гиппокампа лучше справляться с поведенческими тестами на память [1, 3]. Впоследствии, используя аналогичную математическую модель, R. Hampson и соавт. провели эксперименты с участием пациентов с имплантированными по поводу рефрактерной фокальной эпилепсии глубокими электродами в соответствующие поля гиппокампа, получив улучшение результатов когнитивных тестов у пациентов с прототипом нейропротеза [1, 4]. Хотя данная система продемонстрировала эффективность в рамках проведенных экспериментов, она реализовывала подход «черного ящика», т. е. воспроизводила только функциональную активность заменяемой нейронной структуры, не моделируя ее фактического строения и механизмов работы. Несмотря на большую эффективность вышеописанного подхода в отношении использования вычислительных ресурсов и потенциально более высокую производительность, для конкретных поведенческих сценариев исследователями предлагаются основанные на биологически реалистичных моделях концепции нейропротезов, как более универсальных, за счет способности моделировать нейрофизиологические процессы для

различных форм поведения, эффективных в восстановлении как непосредственно неврологических, так и когнитивных функций [5]. В этом направлении активно создаются концепты нейроморфных архитектур на основе спайковых нейронных сетей, способных в режиме реального времени обмениваться данными с биологическими нейронными сетями *in vitro* и *in vivo* [6]. Примером может являться работа Т. Ху и соавт. [5], в которой описаны результаты успешного испытания на крысах нейропротеза мозжечка. Разработанное устройство было способно обеспечить формирование условного рефлекса в виде моргания в ответ на звуковой стимул.

Становится очевидным, что интенсивное развитие технологий нейропротезирования может потребовать решений, связанных с возможностью прототипирования и тестирования различных архитектур нейропротезов, предназначенных для моделирования структур ЦНС и ассоциированных с ними когнитивных функций и поведенческих паттернов.

Целью данной работы явилась разработка модульной системы прототипирования нейропротезов на основе гибридной программно-аппаратной реализации спайковых нейронных сетей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Была выбрана модель спайкового нейрона в виде порогового интегратора с утечкой – LIF-нейрона (*leaky integrate-and-fire neuron*). LIF-нейрон интегрирует входные данные, и если потенциал на мембране нейрона под воздействием синаптического либо внешнего тока достигает порога, то нейроном генерируется спайк с последующим рефрактерным периодом. Важным аспектом являются интервалы времени поступления новых внешних стимулов, поскольку в их отсутствии мембранный потенциал постепенно уменьшается, возвращаясь к потенциалу покоя. Таким образом, при превышении определенного интервала времени для стимула определенной величины спайк не будет сгенерирован из-за затухания мембранного потенциала [7, 8]. Данная модель отличается вычислительной простотой и удовлетворительно воспроизводит частотную модуляцию спайковой активности биологического нейрона, что делает ее достаточно популярной. Возможность моди-

фикации данной модели позволяет также повысить ее сходство с биологическим нейроном [7]. Для реализации нейронной пластичности и возможности обучения нейросети был выбран метод с использованием правила Хебба [9].

Для технического воплощения разрабатываемой искусственной спайковой нейронной сети был выбран гибридный подход, сочетающий в себе элементы как программной, так и аппаратной цифровой реализации. Основной функциональной единицей разработанной системы является т. н. нейромодуль, представляющий собой печатную плату, содержащую микроконтроллер STM32 серии f103 со всей необходимой обвязкой, прошивка которого в режиме реального времени выполняет программную симуляцию одного LIF-нейрона. Данный подход концептуально близок к подходу, реализованному в предназначенном для образовательных целей нейронном симуляторе NeuroBytes, позволяющим собирать из отдельных модулей различные нейронные цепи [10]. Подобная степень наглядности может быть актуальна не только для изучения анатомии и физиологии нервной системы, но и облегчать задачу прототипирования нейропротезов. Кроме того, выбор данного подхода обусловлен возможностью обеспечить впоследствии расширение функционала системы путем усложнения модели и реализации детального мониторинга ра-

боты каждого нейрона. Каждый нейромодуль посредством разъемов подключается к специальной плате-носителю, рассчитанной на восемь таких нейромодулей (см. рис. 1, 2), посредством которой на нейромодули подается питание и осуществляется их связь с управляющей платой, с которой нейромодули объединены кольцевой UART-сетью (на рис. 2 синими линиями со стрелками показан интерфейс передачи данных и управляющих команд). Управляющая плата обеспечивает взаимодействие всей искусственной нейронной сети с персональным компьютером и загрузку весов, определяющих степень синаптической связи между отдельными нейронами, в нейромодули. Для управления нейромодулями, перевода их в режим настройки или загрузки синаптических весов на линии перевода нейромодулей в режим настройки (обозначено на рис. 2 линией зеленого цвета) должна быть установлена лог. 1. Один из 16-битных портов ввода-вывода общего назначения микроконтроллера в каждом нейромодуле играет роль дендритов – все 16 его выводов настроены на вход. Один вывод другого порта настроен на выход и играет роль аксона. Таким образом, каждый нейрон имеет по 16 входов и 1 выход, которые выведены в виде разъемов на край платы, противоположный краю, которым плата вставляется в разъемы платы-носителя.

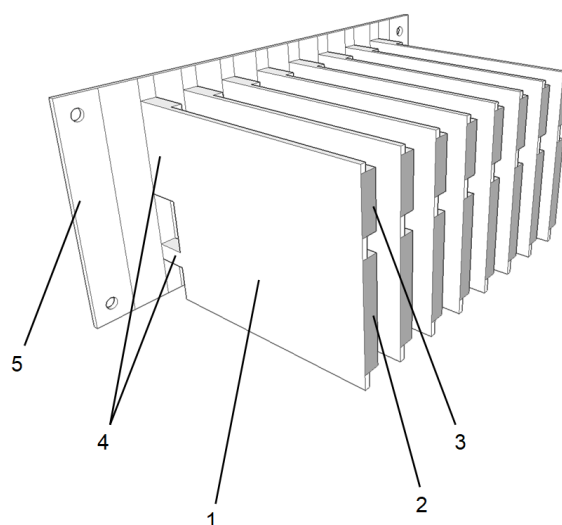


Рис. 1. Схематическое изображение платы-носителя с 8 нейромодулями:

1 – печатная плата нейромодуля; 2 – разъем дендритных входов; 3 – разъем аксонного выхода;
4 – разъемы подключения нейромодуля к плате-носителю; 5 – плата-носитель

Примечание: составлено автором.

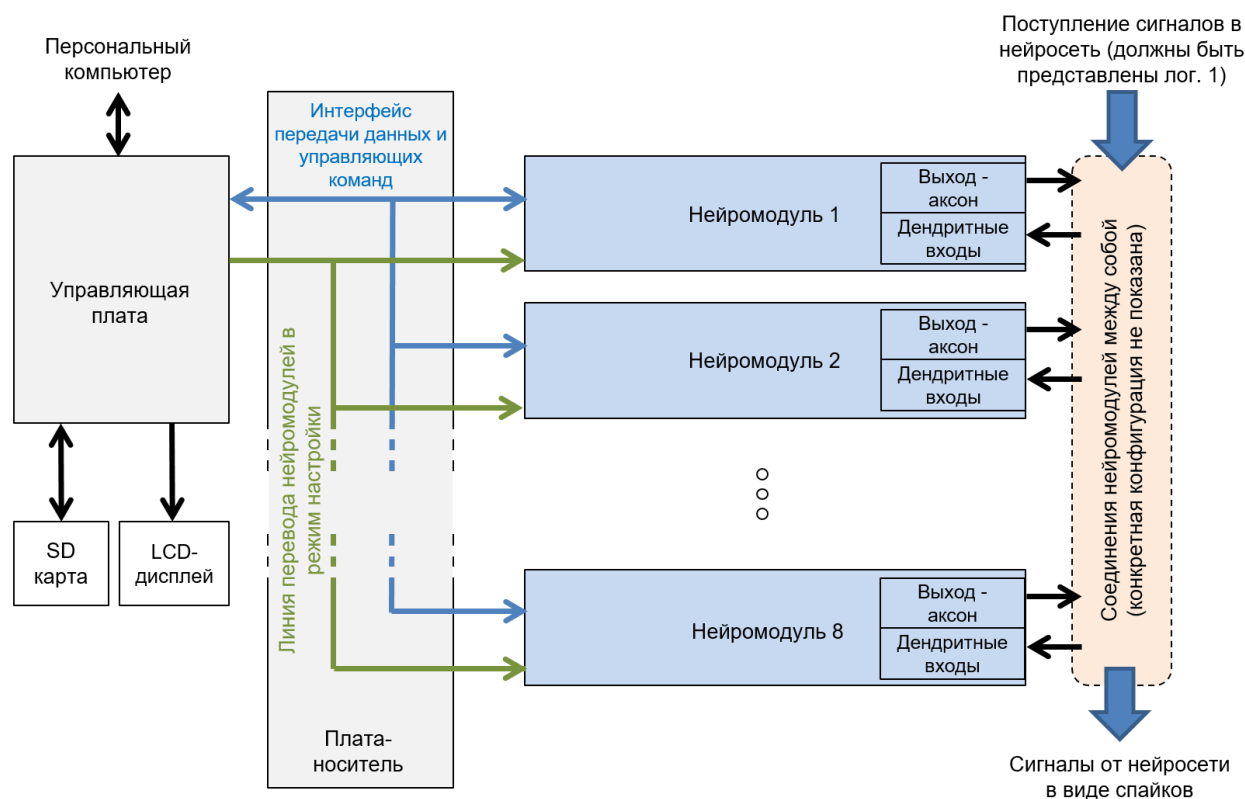


Рис. 2. Обобщенная блок-схема аппаратной реализации устройства

Примечание: составлено автором.

Каждый выход аксона в разьеме продублирован десятикратно и позволяет при помощи специальных соединительных проводов подавать сигнал от него на дендритные входы других нейромодулей, т. е. соединить данный нейрон с другими нейронами. Путем соединения нейронов проводами между собой можно формировать топологию нейронной сети, образовывать цепочки нейронов и рефлекторные дуги. Для визуального контроля активности нейронов на каждом нейроmodule также имеется светодиодный индикатор красного цвета, сигнализирующий о генерации нейроном спайка.

Таким образом, свойства одиночного нейрона и его поведение преимущественно определяются выполняемой на микроконтроллере нейроmodule программой, в то время как общая структура всей нейронной сети конфигурируется путем физического изменения соединений между нейронами.

Программа на каждом нейроmodule постоянно проводит опрос порта, играющего роль дендритных входов. Обобщенная логика работы программы представлена на рис. 3. Если

на один из дендритных входов поступает сигнал от аксонного выхода другого нейрона или от иного устройства в виде логической «1», то соразмерно весу данного синапса в соответствии с алгоритмом работы программы изменяется величина мембранного потенциала нейрона. В отсутствии каких-либо сигналов на входе происходит постепенная «реполяризация» — мембранный потенциал возвращается к потенциалу покоя. При достижении же порогового потенциала генерируется «спайк» — на выходе аксона устанавливается логическая «1» на 1 мс, после чего происходит сброс мембранного потенциала с приведением его к уровню потенциала покоя. При генерации нейроном спайка программой выполняется увеличение весов синапсов, соответствующих входам, на которые непосредственно перед возбуждением нейрона поступил сигнал, что соответствует правилу Хебба. Начальные значения синаптических весов загружаются в каждый нейроmodule через последовательный порт посредством соединенной с персональным компьютером управляющей платы.

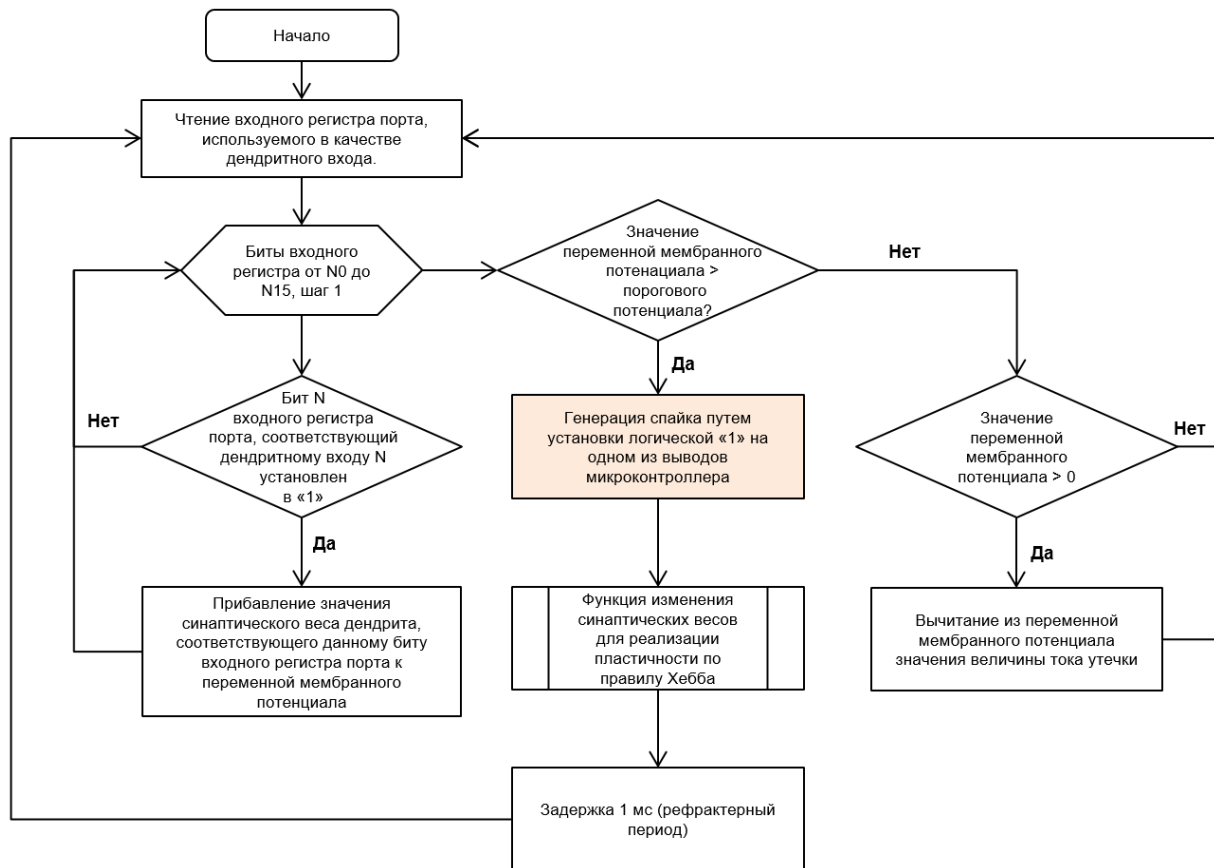


Рис. 3. Обобщенная блок-схема логики работы программы нейромодуля
 (не показаны части программы, связанные с настройкой нейромодулей, загрузкой весов и т. д.)
 Примечание: составлено автором.

Оценивались следующие свойства разработанного устройства: способность искусственных нейронов к временной и пространственной суммации и наличие нейропластичности. Активность нейронов регистрировалась визуально – по состоянию светодиодных индикаторов возбуждения, а также при помощи осциллографа для точной оценки частоты спайков того или иного нейрона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для тестирования способности искусственных нейронов разработанной системы выполнять временную суммацию на одном из входов одиночного нейрона устанавливался такой синаптический вес, который при поступлении на вход логической «1» продолжительностью 1 мс приводил к сдвигу мембранного потенциала в сторону порогового значения, однако не обеспечивал достижения порогового значения полностью и, соответственно, генерации спайка нейромодулем не

происходило. При подаче сигналов последовательно с частотой, обеспечивающей нарастание мембранного потенциала быстрее, чем происходит процесс реполяризации, тестируемый искусственный нейрон в ответ на несколько стимулов генерировал спайк (логическая «1» на аксонном выходе продолжительностью 1 мс), что говорило о его способности к выполнению временной суммации. При этом скорость перехода нейрона в возбужденное состояние зависела от частоты стимуляции – при ее увеличении нейрон быстрее отвечал спайком на серию импульсов. Вес синапса, образованного тем дендритным входом, на который подавались импульсы, также влиял на скорость перехода нейрона в возбужденное состояние – чем выше он был, тем быстрее нейрон генерировал спайк.

Для оценки способности искусственного нейрона к пространственной суммации на двух дендритных входах (вход 1 и вход 2) устанавливались синаптические веса такой

величины, что при подаче стимулирующего сигнала в виде логической «1» продолжительностью 1 мс на каждый вход по отдельности сдвиг мембранного потенциала будет недостаточен для генерации спайка нейрономодулем, однако их суммарный синаптический вес должен быть достаточен для возбуждения нейрона. Сначала одиночные импульсы подавались на каждый вход отдельно по очереди с паузой между стимулами, достаточной для реполяризации нейрона, что не приводило к генерации спайка, но при одновременной подаче стимулирующего сигнала на оба входа нейрон генерировал спайк. Аналогичные эксперименты с таким же результатом были успешно проведены с тремя и более входами.

При соединении двух и более нейронов в цепь аксонный выход каждого нейрона подключался к дендритному входу последующего нейрона. В зависимости от подобранных синаптических весов характер распространения возбуждения по цепи нейронов изменялся согласно закономерностям, описанным выше при тестировании свойств одиночного нейрона.

Для оценки нейропластичности были задействованы три нейрономодуля (нейрона). Два нейрона (пресинаптический нейрон № 1 и пресинаптический нейрон № 2) подключались к двум разным аксональным входам постсинаптического нейрона. При возбуждении пресинаптического нейрона № 1, синаптическая связь которого с постсинаптическим нейроном значительна (был подобран вес, при котором постсинаптический нейрон на одиночный спайк на входе также генерировал спайк в ответ), постсинаптический нейрон отвечал импульсацией, равной по частоте импульсации преси-

наптического нейрона № 1. При стимуляции пресинаптического нейрона № 2, синаптическая связь с которым минимальна (синаптический вес таков, что возбуждение данного пресинаптического нейрона не вызывает изменения мембранного потенциала постсинаптического нейрона), постсинаптический нейрон остается неактивен. После многократного одновременного поступления сигнала от обоих пресинаптических нейронов постсинаптический нейрон стал способен отвечать генерацией спайка и на активность пресинаптического нейрона № 2, что говорит об увеличении синаптического веса между данными нейронами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искусственные нейроны разработанной системы демонстрируют такие элементы поведения, свойственные биологическим нейронам, как способность отвечать импульсацией в ответ на внешнюю стимуляцию либо сигнал от пресинаптического нейрона, способность к пространственной и временной суммации, нейропластичность. При этом в сравнении с учебным нейронным симулятором NeuroBytes, конструктивная реализация, обеспечивающая компактное расположение нейрономодулей на плате-носителе, позволяет использовать большее количество нейронов и увеличивает удобство работы с системой. Это говорит о потенциале применения устройства для моделирования работы различных нейронных структур центральной нервной системы, что актуально при разработке и прототипировании нейропротезов, предназначенных для замещения поврежденных структур головного и спинного мозга.

Список источников

1. Кравченко С. В., Каде А. Х., Трофименко А. И. и др. Когнитивное нейропротезирование – путь от эксперимента к клиническому применению // Инновационная медицина Кубани. 2021. № 3. С. 64–72.
2. Тихомиров Г. В., Григорьева В. Н. Зрительная агнозия в клинике острого ишемического инсульта: частота встречаемости и связь с другими когнитивными нарушениями // Доктор.Ру. 2022. Т. 21, № 8. С. 12–17.
3. Berger T. W., Song D., Chan R. H. M. et al. A hippocampal cognitive prosthesis: Multi-input, multi-out-

References

1. Kravchenko S. V., Kade A. Kh., Trofimenko A. I. et al. Cognitive neural prosthetics – The way from experiment to clinical application. *Innovative Medicine of Kuban*. 2021;(3):64–72. (In Russian).
2. Tikhomirov G. V., Grigorieva V. N. Visual agnosia as a sign of acute ischemic stroke: Frequency and association with other cognitive impairments. *Doctor.Ru*. 2022;21(8):12–17. (In Russian).
3. Berger T. W., Song D., Chan R. H. M. et al. A hippocampal cognitive prosthesis: Multi-input, multi-output nonlinear modeling and VLSI implementation.

- put nonlinear modeling and VLSI implementation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2012;20(2):198–211.
4. Hampson R. E., Song D., Robinson B. S. et al. Developing a hippocampal neural prosthetic to facilitate human memory encoding and recall. *J Neural Eng*. 2018;15(3):036014.
 5. Xu T., Xiao N., Zhai X. et al. Real-time cerebellar neuroprosthetic system based on a spiking neural network model of motor learning. *J Neural Eng*. 2018;15(1):016021.
 6. Mikhaylov A., Pimashkin A., Pigareva Y. et al. Neurohybrid memristive CMOS-integrated systems for biosensors and neuroprosthetics. *Front Neurosci*. 2020;14:358.
 7. Анохин К. В., Бурцев М. С., Ильин В. А. и др. Современные подходы к моделированию активности культур нейронов in vitro // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7, № 2. С. 372–397.
 8. Wang Z., Joshi S., Savel'ev S. et al. Fully memristive neural networks for pattern classification with unsupervised learning. *Nat Electron*. 2018;(1):137–145.
 9. Sumner R. L., Spriggs M. J., Muthukumaraswamy S. D. et al. The role of Hebbian learning in human perception: A methodological and theoretical review of the human Visual Long-Term Potentiation paradigm. *Neurosci Biobehav Rev*. 2020;115:220–237.
 10. Petto A., Fredin Z., Burdo J. The use of modular, electronic neuron simulators for neural circuit construction produces learning gains in an undergraduate anatomy and physiology course. *J Undergrad Neurosci Educ*. 2017;15(2):A151–A156.
 - IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2012;20(2):198–211.
 4. Hampson R. E., Song D., Robinson B. S. et al. Developing a hippocampal neural prosthetic to facilitate human memory encoding and recall. *J Neural Eng*. 2018;15(3):036014.
 5. Xu T., Xiao N., Zhai X. et al. Real-time cerebellar neuroprosthetic system based on a spiking neural network model of motor learning. *J Neural Eng*. 2018;15(1):016021.
 6. Mikhaylov A., Pimashkin A., Pigareva Y. et al. Neurohybrid memristive CMOS-integrated systems for biosensors and neuroprosthetics. *Front Neurosci*. 2020;14:358.
 7. Anokhin K. V., Burtsev M. S., Ilyin V. A. et al. A review of computational models of neuronal cultures in vitro. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2012;7(2):372–397. (In Russian).
 8. Wang Z., Joshi S., Savel'ev S. et al. Fully memristive neural networks for pattern classification with unsupervised learning. *Nat Electron*. 2018;(1):137–145.
 9. Sumner R. L., Spriggs M. J., Muthukumaraswamy S. D. et al. The role of Hebbian learning in human perception: A methodological and theoretical review of the human Visual Long-Term Potentiation paradigm. *Neurosci Biobehav Rev*. 2020;115:220–237.
 10. Petto A., Fredin Z., Burdo J. The use of modular, electronic neuron simulators for neural circuit construction produces learning gains in an undergraduate anatomy and physiology course. *J Undergrad Neurosci Educ*. 2017;15(2):A151–A156.

Информация об авторе

С. В. Кравченко – кандидат медицинских наук.

Information about the author

S. V. Kravchenko – Candidate of Sciences (Medicine).

Научная статья

УДК 618.11-006.3:004.432:004.9

DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-5

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИКИ ОПУХОЛЕЙ ЯИЧНИКОВ

Алексей Иванович Пахтусов^{1✉}, Евгения Владимировна Логарева²,
Арагат Микичович Парсаданян³, Анжелика Эдуардовна Каспарова⁴,
Дмитрий Алексеевич Федоров⁵

¹ Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

² Сургутский окружной клинический центр охраны материнства и детства, Сургут, Россия

³ Сургутская окружная клиническая больница, Сургут, Россия

⁴ Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, Ханты-Мансийск, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹ Pahtusov@bk.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0008-8276-2901>

² Logareva@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4045-9441>

³ Doctor_pars@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4923-9859>

⁴ AnzKasparova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7665-2249>

⁵ DAFedorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3462-8392>

Аннотация. В статье представлено описание предметной области по болезни опухоль яичников. Признаковое пространство разбито на 4 класса: факторы риска, клинические признаки, данные, собираемые лабораторными и инструментальными методами. Проведен системный анализ процесса диагностики врачом заболевания опухоль яичников по трем видам: доброкачественная, пограничная и злокачественная. Произведены расчеты балльной оценки прогноза раннего развития опухолей яичников на основе критерия информативности Кульбака и сокращено признаковое пространство.

Ключевые слова: факторы риска, стандарты специализированной медицинской помощи, алгоритм дифференциальной диагностики, информативность по Кульбаку, экспертные системы

Для цитирования: Пахтусов А. И., Логарева Е. В., Парсаданян А. М., Каспарова А. Э., Федоров Д. А. Системный анализ процесса диагностики опухолей яичников // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 33–41. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-5.

Original article

A SYSTEMATIC ANALYSIS OF OVARIAN TUMOR DIAGNOSIS

Aleksey I. Pakhtusov^{1✉}, Evgeniya V. Logareva², Ararat M. Parsadanyan³,
Anzhelika E. Kasparova⁴, Dmitry A. Fedorov⁵

¹ Surgut State University, Surgut, Russia

² Surgut District Clinical Center for Maternity and Childhood Health Care, Surgut, Russia

³ Surgut District Clinical Hospital, Surgut, Russia

⁴ Khanty-Mansi State Medical Academy, Khanty-Mansiysk, Russia

⁵ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

¹ Pahtusov@bk.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0008-8276-2901>

² Logareva@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4045-9441>

³ Doctor_pars@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4923-9859>

⁴ AnzKasparova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7665-2249>

⁵ DAFedorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3462-8392>

Abstract. The article describes an object field of ovarian tumor. An attribute space is divided into four groups: risk factors, clinical attributes, laboratory-obtained data, and instrumentally obtained data. A systematic analysis of a medical officer diagnosing an ovarian tumor is conducted by three types: benign, borderline,

and malignant tumor. A score of an early ovarian tumor development is calculated using the Kulbac rule, and an attribute space is reduced.

Keywords: risk factors, standards for special medical care, algorithm of differential diagnosis, Kulbac rule, expert systems

For citation: Pakhtusov A. I., Logareva E. V., Parsadanyan A. M., Kasparova A. E., Fedorov D. A. A systematic analysis of ovarian tumor diagnosis. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):33–41. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-5.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире объем информации, которую ежедневно обрабатывает врач независимо от его направления деятельности, неуклонно растет. Соответственно увеличиваются качественно и количественно методы дифференциальной диагностики заболеваний, поэтому без дополнительных инструментов диагностики заболеваний принимать решения становится все сложнее. К таким инструментам можно отнести системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР), которые могут включать в себя алгоритмы, базу знаний, базу данных и решатель, описывающие в каждом случае конкретную предметную область [1].

Новообразования яичников являются самыми распространенными среди новообразований женской репродуктивной сферы. При этом не существует общепринятого золотого стандарта неинвазивной (безоперационной) ранней диагностики, позволяющего идентифицировать злокачественные новообразования яичников на этапе пограничных опухолей и ранних стадиях малигнизации (процесса, в ходе которого происходит перерождение здоровых клеток в раковые) [2, 3]. Также в современной медицине не существует показателей (онкомаркеров) со 100 %-й чувствительностью и специфичностью для диагностики пограничных и злокачественных опухолей яичников [2]. Однако некоторые показатели, например, индекс расчета риска наличия злокачественной опухоли яичника ROMA (Risk of Ovarian Malignancy Algorithm) для определенных групп пациенток может достигать высоких (близких к 100 %) значений чувствительности и специфичности [4].

Наиболее благоприятным клиническим течением и прогнозом обладают доброкачественные опухоли яичника. Злокачественные новообразования придатков, наоборот, являются агрессивными с большой вероятностью мета-

стазирования. По данным за 2021 г., в структуре смертности от злокачественных опухолей рак яичников составляет 5,6 % и стоит на 7-м месте [5]. При всем этом одногодичная летальность при злокачественных опухолях яичника составляет до 35 %. Поэтому ранняя диагностика злокачественных опухолей яичников остается одной из наиболее значимых задач в онкологии [3].

В отдельную группу выделяют пограничные опухоли яичников с достаточно благоприятным клиническим прогнозом и возможностью применения органосохраняющего лечения.

Целью данной работы является системный анализ предметной области и процесса диагностики доброкачественных, пограничных и злокачественных опухолей яичников.

Задачами исследования являются:

1. Системный анализ предметной области.
2. Описание методов диагностики пациенток с опухолями яичников.
3. Описание стандартов специализированной медицинской помощи при доброкачественных, пограничных и злокачественных опухолях яичников.
4. Описание алгоритма принятия решения врачом при диагностике опухолей яичников.
5. Расчет балльной оценки прогноза раннего развития опухолей яичников на основе критерия информативности Кульбака [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выделяют следующие виды опухолей яичников:

1. Доброкачественные опухоли яичников.
2. Пограничные опухоли яичников (с течением времени подвергаются злокачественной трансформации).
3. Злокачественные опухоли яичников (рак).

Рассмотрим более подробно злокачественные опухоли яичников как наиболее опасное заболевание среди опухолей яичников.

Механизмы и причины формирования и развития новообразований яичников окончательно не изучены. Этот факт усложняет возможность для разработки алгоритмов диагностики, прогрессирования и прогноза заболеваний, а также является главным препятствием для формирования групп риска для данной патологии: 10 групп высокого риска, 3 группы умеренного риска и 2 группы низкого риска [7]. 4 основных и 11 дополнительных факторов риска развития рака яичников,

повышающих риск злокачественных новообразований яичников, перечислены в письме Минздрава РФ от 04.12.2018 № 15-4/10/2-7838 [2]. В итоге количество и качество факторов риска развития рака яичников носит разнообразный характер, что увеличивает возможный состав групп риска пациенток [7].

Соотношение между собой признаков заболевания и стадии рака, а также объем оперативного вмешательства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Стадии развития рака яичников

Стадия рака	Описание признаков		Стадии рака, наличие признака (- +)									
	Общее	Подробное	I			II			III			IV
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	
I	Рак яичников (карцинома) находится в пределах одного или обоих яичников	Опухоль в границах одного яичника	+	+								
		Опухоль ограничена в пределах обоих яичников		+	+	+	+	+	+	+	+	+
		Наличие разрыва капсулы яичника, опухоли на поверхности яичника, опухолевых клеток в асцитической жидкости и смывах из брюшной полости			+	+	+	+	+	+	+	+
II	Опухоль ограничена малым тазом	Распространение опухоли и/или метастазы в матку и/или маточные трубы				+						
		Распространение опухоли и/или метастазы в другие ткани малого таза без прорастания органов					+		+	+	+	+
		Опухолевые клетки в асцитической жидкости и смывах их брюшной полости						+	+	+	+	+
III	Имеются метастазы по брюшине за пределами малого таза	Имеются микроскопические метастазы по брюшине за пределами малого таза							+	+	+	+
		Имеются макроскопические метастазы по брюшине за пределами малого таза размерами 2 см и менее в наибольшем измерении								+	+	+
		Имеются макроскопические метастазы по брюшине за пределами малого таза размерами более 2 см в наибольшем измерении									+	+
IV	Имеются отдаленные метастазы											+
Лечение:			Оперативное удаление			Химиотерапия						Лучевая терапия

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании [2].

Системный анализ предметной области показал, что по результатам рассмотрения указанных стадий необходимо выделить (отмечены цветом в табл. 1) переходы между стадиями Ib и Ic, а также между IIIc и IV. В указанных переходах резко увеличивается объем и способы лечения, поэтому причинно-следственные факторы в указанных границах будут иметь важное исследовательское значение. Так, при достижении стадии Ic лечение

дополняется химиотерапией, а при достижении IV стадии – лучевой терапией.

В качестве исходных данных для анализа взят датасет, включающий в себя обезличенную информацию по пациенткам Ханты-Мансийского автономного округа – Югры с диагностированными опухолями яичников более чем за 20 лет, поэтому распределение соотношения количества пациентов по группам носит неравномерный характер (табл. 2).

Таблица 2

Описание датасета

№	Наименование вида опухоли	Всего пациентов		Количество видов медико-социальных характеристик	
		до менопаузы	после наступления менопаузы	качественных	количественных
1	Доброкачественная	Д1 = 116	Д2 = 24	74	44
2	Пограничная	П1 = 167	П2 = 127		
3	Злокачественная	З1 = 117	З2 = 97		
Итого		648		118	

Примечание: составлено авторами.

Все характеристики с диагностированными опухолями яичников у пациенток разбиты на 2 класса:

- Д – доброкачественные; П – пограничные; З – злокачественные;

- 1 – до менопаузы; 2 – после менопаузы; и на 6 групп пациенток:

- «Д1»: пациентки до наступления менопаузы с доброкачественными опухолями яичников;

- «Д2»: пациентки после наступления менопаузы с доброкачественными опухолями яичников;

- «П1»: пациентки до наступления менопаузы с пограничными опухолями яичников;

- «П2»: пациентки после наступления менопаузы с пограничными опухолями яичников;

- «З1»: пациентки до наступления менопаузы со злокачественными опухолями яичников;

- «З2»: пациентки после наступления менопаузы со злокачественными опухолями яичников.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа и расчетов статистических данных было разработано программное обеспечение на языке Python, а для контроля, проверки и статистического анализа полученных результатов использован программный пакет Statistica компании StatSoft.

По независимым группам пациентов, сгруппированным по диагнозам, для расчета уровней статистической значимости по качественным признакам применен точный критерий Фишера [8], реализуемый в Python в библиотеке Scipy в функции Scipy.stats.fisher_exact [9] по следующей формуле (1):

$$P = \frac{(A+B)! \times (C+D)! \times (A+C)! \times (B+D)!}{A! \times B! \times C! \times D! \times N!}, \quad (1)$$

где N – общее число исследуемых в двух группах;

! – факториал, представляющий собой произведение числа на последовательность чисел, каждое из которых меньше предыдущего на 1.

Значения A, B, C, D описаны в табл. 3.

Таблица 3

Описание параметров точного критерия Фишера

Фактор риска	Исход есть (наличие диагноза)	Исхода нет (отсутствие диагноза)
есть	A	B
отсутствует	C	D

Примечание: составлено по описанию точного критерия Фишера [8].

Для расчета уровней статистической значимости по количественным признакам применен U-критерий Манна – Уитни, реализуемый в Python в библиотеке Scipy в функции Scipy.stats.mannwhitneyu [10].

С целью оценки совокупности признаков для реализации возможности прогнозирования выявления различных видов опухолей

яичников у пациенток реализован метод последовательной диагностической процедуры, предполагающий балльную оценку совокупности признаков. Таким образом, рассматриваемые признаки были сгруппированы в виде обобщающих признаков с целью исключения взаимосвязанных показателей, что являлось основным условием данной процедуры для

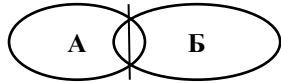
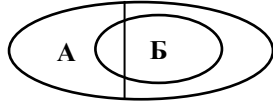
исключения возможности гипердиагностики заболевания. Анализ при этом подвергались социально-медицинские показатели, обладающие наибольшей чувствительностью.

С целью выявления наиболее значимых признаков на основе балльных оценок применен критерий информативности Кульбака. Так как указанный критерий предусматривает участие в расчетах только качественных признаков и не предусматривает применение количественных признаков, то для полноценного использования всего датасета необходимо

перевести количественные признаки в качественные. С этой целью разработан алгоритм для определения оптимальных границ значений между группами по каждому признаку, которые бы разделяли группы таким образом, чтобы суммарное количество значений, находящихся слева от границы для условной группы А, и количество значений, находящихся справа от границы для условной группы Б, было максимальным. Графическое представление определения границ представлено в табл. 4.

Таблица 4

Описание определения границы между группами пациентов

Текстовое описание	Графическое описание
Граница между условными группами находится в зоне пересечения значений групп	
Граница между условными группами находится между зонами значений групп	
Зона значений одной группы полностью входит в зону значений другой группы. Граница между условными группами находится в пределах зоны одной из групп	

Примечание: составлено авторами.

На основании сформированных пограничных признаков сформирован датасет, состоящий только из качественных признаков. Это позволило применить критерий информативно-

сти Кульбака, сформировать наиболее значимые признаки, т. е. сократить признаковое пространство со 118 до 10 признаков (табл. 5).

Таблица 5

Результаты расчетов по критерию информативности Кульбака

№	Пары исследуемых групп ИСТИНА/ЛОЖЬ (наличие/отсутствие признака)	Д-П		Д-З		П-З	
		ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ
1	Лимфоциты (число) ≥ 25	-5	7	-2	5	3	-2
2	Нейтрофилы, % ≤ 67	-4	6	*	*	5	-9
3	Моноциты, % ≤ 8	*	*	-3	18	-2	7
4	Эозинофилы, % ≤ 4	-2	6	-4	8	-3	2
5	Базофилы, % ≥ 1	13	-2	17	-14	4	-12
6	Скорость оседания эритроцитов (СОЭ) ≤ 14	-5	2	-16	2	-12	1
7	Креатинин ≤ 69	-5	14	-13	15	-8	2
8	С-реактивный белок (СРБ) ≤ 5	*	*	-7	21	-7	21
9	Протромбиновый индекс (ПТИ) ≥ 88	-1	12	-4	14	-2	3
10	Международное нормализованное отношение (МНО) $\leq 1,1$	-1	13	-5	20	-4	7

Примечание: * – информативность признаков не выявлена. Составлено авторами.

При диагностике заболевания баллы по соответствующим признакам суммируются:

- если итоговая сумма баллов больше 10, то с вероятностью 90 % переход между видами опухолей яичников будет;
- если итоговая сумма баллов меньше –10, то с вероятностью 90 % переход между видами опухолей яичников не будет;
- если итоговая сумма баллов в диапазоне от –10 до 10, то прогноз находится в зоне неопределенности и требуются дополнительные исследования.

Проведена проверка полученных прогнозных значений (табл. 6).

Полученная модель на основе балльных оценок по критерию информативности Кульбака наилучшим образом показывает чувствительность (Se), специфичность (Sp), прогностичность положительного результата (PVP), прогностичность отрицательного результата (PVN), диагностическую эффективность (ДЭ) для пациенток при диагностике злокачественных опухолей без учета менопаузального статуса.

Таблица 6

Проверка прогнозных оценок

Пары исследуемых групп	Группа 1 (контрольная)	Группа 2 (основная)	Наличие признака в группе 1	Отсутствие признака в группе 1	Наличие признака в группе 2	Отсутствие признака в группе 2	Диагностические показатели, %				
							Se	Sp	PVP	PVN	ДЭ
Пациентки до наступления менопаузы:											
Д1-П1	Д1	П1	56	0	138	3	83	0	71	0	70
Д1-З1	Д1	З1	11	57	74	11	63	49	87	84	86
П1-З1	П1	З1	1	118	59	7	50	71	98	94	96
Пациентки после наступления менопаузы:											
Д2-П2	Д2	П2	1	21	87	3	69	88	99	88	96
Д2-З2	Д2	З2	0	23	75	7	77	96	100	77	93
П2-З2	П2	З2	0	115	62	16	64	91	100	88	92
Все пациентки без учета менопаузального статуса:											
Д-П	Д	П	37	3	262	0	89	2	88	100	88
Д-З	Д	З	4	120	202	3	94	86	98	98	98
П-З	П	З	1	256	177	7	83	87	99	97	98

Примечание: Se – чувствительность, Sp – специфичность, PVP – прогностичность положительного результата, PVN – прогностичность отрицательного результата, ДЭ – диагностическая эффективность. Составлено авторами.

На основе стандартов специализированной медицинской помощи при доброкачественных, пограничных и злокачественных опухолях яичников, клинических рекомендаций (протокол лечения) «Диагностика и лечение доброкачественных новообразований яичников с позиции профилактики рака», а также проведения опросов экспертов разработан алгоритм обследования и диффе-

ренциальной диагностики образований яичников (рисунок) [2, 11–13].

На рисунке цветом отмечен этап процесса обследования пациенток, на котором возможно применение системы поддержки принятия решений врачом гинекологом с целью расчета вероятности выявления опухолей яичников у пациенток и принятия решения по их дальнейшему обследованию.

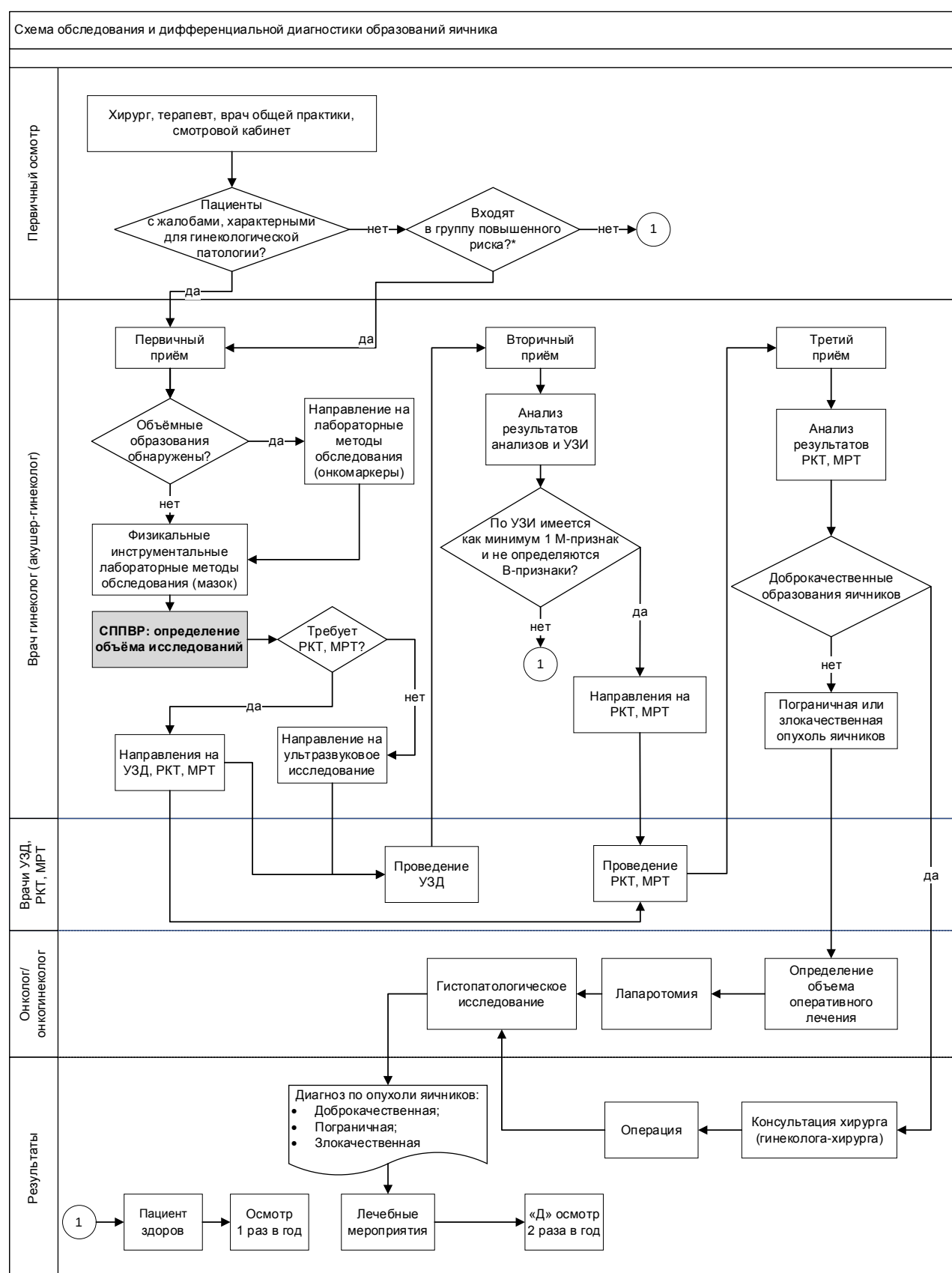


Рисунок. Схема обследования и дифференциальной диагностики образований яичника
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании [2, 11–13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен системный анализ предметной области (по 648 пациенткам и более 118 медико-социальным характеристикам):

- пациенты разбиты на группы по видам опухолей яичников и наличию/отсутствию менопаузы;

- выявлены значимые переходы по злокачественным опухолям яичников между стадиями Ib и Ic, а также между IIIc и IV, т. к. в этих случаях кардинально меняется схема лечения.

2. На основе стандартов специализированной медицинской помощи при доброкачественных, пограничных и злокачественных опухолях яичников описана схема обследования и принятия решения врачом, разработан алгоритм необходимости дополнительных исследований (УЗИ, МРТ) при диагностике опухолей яичников.

3. Разработан алгоритм нахождения пограничных значений по показателям между условными группами (табл. 4), что позволило

перевести количественные показатели в качественные.

4. Сформирована балльная оценка прогноза раннего развития опухолей яичников по критерию информативности Кульбака.

5. Определены наиболее значимые признаки, сокращено признаковое пространство со 118 до 10 признаков (табл. 5). Выполнена проверка полученных прогнозных значений, получены высокие показатели значений Se, Sp, PVP, PVN, ДЭ (табл. 6).

6. Важное значение имеет тот факт, что данные по 10 признакам (табл. 5) возможно получить по результатам клинического анализа крови (общий анализ крови с лейкоформулой, показатели коагулограммы), что упрощает процесс ранней диагностики злокачественных опухолей яичников, так как результаты по указанным признакам могут быть получены в процессе первичной лабораторной диагностики при обращении пациентов по другим нозологиям.

Список источников

1. Мордовин Д. В., Федоров Д. А., Пахтусов А. И. и др. Обзор медицинских информационных систем поддержки принятия решений врача при диагностике онкологических заболеваний // Наука и инновации XXI века : сб. статей по материалам IX Всерос. конф. молодых ученых, 2 ноября 2022 г., г. Сургут. В 4 т. Т. I. Сургут : СурГУ, 2023. С. 102–118.
2. Диагностика и лечение доброкачественных новообразований яичников с позиции профилактики рака : клинич. рекомендации. URL: <https://mosgorzdrav.ru/ru-RU/science/default/download/409.html> (дата обращения: 26.03.2023).
3. Коган Я. Э. Актуальные вопросы патогенеза и диагностики опухолей и опухолевидных образований яичников // Практическая медицина. 2018. Т. 16, № 9. С. 34–39.
4. Логарева Е. В., Парсаданян А. М., Каспарова А. Э. Оценка индекса ROMA в дифференциальной диагностике опухолей яичника // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2020. № 3. С. 158–165.
5. Каприн А. Д., Старинский В. В., Шахзадова А. О. Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность). М. : МНИОИ им. П. А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. 252 с.
6. Львович И. Я., Гладских Н. А. Методика формирования словаря информативных признаков при расчете вероятности повторного инсульта на ос-

References

1. Mordovin D. V., Fedorov D. A., Pakhtusov A. I. et al. Obzor meditsinskikh informatsionnykh sistem podderzhki priniatiia reshenii vracha pri diagnostike onkologicheskikh zabolevanii. In: *Proceedings of the IX All-Russian Youth Conference "Nauka i innovatsii XXI veka"*, November 2, 2022, Surgut. In 4 vols. Vol. I. Surgut: SurSU; 2023. p. 102–118. (In Russian).
2. Diagnosing and treatment of ovarian tumor benign in preventive measures for cancer. Clinical guidelines. URL: <https://mosgorzdrav.ru/ru-RU/science/default/download/409.html> (accessed: 26.03.2023). (In Russian).
3. Kogan Ya. E. Topical issues of pathogenesis and diagnosis of tumors and ovarian masses. *Practical Medicine*. 2018;16(9):34–39. (In Russian).
4. Logareva E. V., Parsadanyan A. M., Kasparova A. E. Assessment of the ROMA index in differential diagnosis of testisms of the ovaries. *Modern Science: Actual problems of theory and practice. Series "Natural and Technical Sciences"*. 2020;(3):158–165. (In Russian).
5. Kaprin A. D., Starinsky V. V., Shakhzadova A. O. Zlokachestvennye novoobrazovaniia v Rossii v 2021 godu (zabolevaemost i smertnost). Moscow: Moscow Oncology Institute of Hertsen FMRC MH RF; 2022. 252 p. (In Russian).
6. Lvovich I. Ya., Gladskikh N. A. Methodic forming the informative set by using Kulbac rule on calculation the probability of relapse stroke. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2009;(9):28–31. (In Russian).

- нове критерия информативности Кульбака // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. № 9. С. 28–31.
7. Пахтусов А. И., Федоров Д. А., Логарева Е. В. и др. Алгоритм дифференциальной диагностики опухолей яичников // Наука и инновации XXI века : сб. статей по материалам IX Всерос. конф. молодых ученых, 2 ноября 2022 г., г. Сургут. В 4 т. Т. I. Сургут : СурГУ, 2023. С. 217–227.
8. Точный критерий Фишера. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods5.html?ysclid=llrrpav99f752089748> (дата обращения: 11.11.2023).
9. Scipy.stats.fisher_exact. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.fisher_exact.html (дата обращения: 11.11.2023).
10. Scipy.stats.mannwhitneyu. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.mannwhitneyu.html> (дата обращения: 11.11.2023).
11. Об утверждении стандартов медицинской помощи взрослым при раке яичников, раке маточной трубы и первичном раке брюшины : приказ Минздрава РФ от 13.04.2021 № 336н. Доступ из СПС «Гарант».
12. Об утверждении стандарта специализированной медицинской помощи при доброкачественных новообразованиях яичников : приказ Минздрава РФ от 07.11.2012 № 594н. Доступ из СПС «Гарант».
13. Об утверждении стандартов медицинской помощи взрослым при пограничных опухолях яичников : приказ Министерства здравоохранения РФ от 05.11.2020 № 1198н. Доступ из СПС «Гарант».
7. Pakhtusov A. I., Fedorov D. A., Logareva E. V. et al. Algorithm differentsialnoi diagnostiki opukholei iaichnikov. In: *Proceedings of the IX All-Russian Youth Conference "Nauka i innovatsii XXI veka"*, November 2, 2022, Surgut. In 4 vols. Vol. I. Surgut: SurSU; 2023. p. 217–227. (In Russian).
8. Tochnyi kriterii Fishera. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods5.html?ysclid=llrrpav99f752089748> (accessed: 11.11.2023). (In Russian).
9. Scipy.stats.fisher_exact. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.fisher_exact.html (accessed: 11.11.2023).
10. Scipy.stats.mannwhitneyu. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.mannwhitneyu.html> (accessed: 11.11.2023).
11. Order of the Ministry of Healthcare of Russia of April 13, 2021 No. 336n "On Approving the Standards for Providing Medical Care to Adults with Ovarian Cancer, Fallopian Tube Carcinoma, and Primary Peritoneal Cancer". Accessed through Law assistance system "Garant". (In Russian).
12. Order of the Ministry of Healthcare of Russia of November 7, 2012 No. 594n "On Approving the Standards for Providing Special Medical Care to Patients with Ovarian Tumor Benign". Accessed through Law assistance system "Garant". (In Russian).
13. Order of the Ministry of Healthcare of Russia of November 5, 2020 No. 1198n "On Approving the Standards for Providing Medical Care to Adults with Borderline Ovarian Tumor". Accessed through Law assistance system "Garant". (In Russian).

Информация об авторах

А. И. Пахтусов – аспирант.

Е. В. Логарева – аспирант.

А. М. Парсаданян – доктор медицинских наук, профессор.

А. Э. Каспарова – доктор медицинских наук, профессор.

Д. А. Федоров – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. I. Pakhtusov – Postgraduate.

E. V. Logareva – Postgraduate.

A. M. Parsadanyan – Doctor of Sciences (Medicine), Professor.

A. E. Kasparova – Doctor of Sciences (Medicine), Professor.

D. A. Fedorov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья
УДК 004.896:662.27
DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-6

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ

Евгений Дмитриевич Семёнов¹, Михаил Яковлевич Брагинский²,
Дмитрий Викторович Тараканов^{3✉}, Инесса Леонидовна Назарова⁴

¹ Сургутнефтегаз, Сургут, Россия

^{2,3,4} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ semunoff90@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2994-4119>

² braginskiy_mya@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

³ sprtdv@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

⁴ nazarova_il@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0340-2609>

Аннотация. В статье рассматривается применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования технологических параметров добычи нефти. Для решения задачи были использованы аппараты искусственных нейронных сетей на основе архитектуры долгой краткосрочной памяти (LSTM) и управляемых рекуррентных блоков (GRU). Полученные результаты нейросетевого прогнозирования подтвердили эффективность применения рекуррентных нейронных сетей, особенно модели LSTM для прогнозирования временных рядов.

Ключевые слова: нейронные сети, добыча нефти, машинное обучение, LSTM, GRU, рекуррентная нейронная сеть, прогнозирование

Для цитирования: Семёнов Е. Д., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Назарова И. Л. Нейросетевое прогнозирование входных параметров при добыче нефти // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 42–51. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-6.

Original article

NEURAL NETWORK FORECASTING OF INPUT PARAMETERS IN OIL DEVELOPMENT

Evgeny D. Semyonov¹, Mikhail Ya. Braginsky², Dmitry V. Tarakanov^{3✉},
Inessa L. Nazarova⁴

¹ Surgutneftegas, Surgut, Russia

^{2,3,4} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ semunoff90@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2994-4119>

² braginskiy_mya@surgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

³ sprtdv@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

⁴ nazarova_il@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0340-2609>

Abstract. The article examines use of artificial neural networks for forecasting of technological parameters of oil development. Artificial neural networks based on the long short-term memory architecture and gated recurrent units are used to solve the problem. The findings of neural network forecasting prove the efficacy of recurrent neural networks, especially the long short-term memory one, for forecasting of time series.

Keywords: neural networks, oil development, machine learning, LSTM, GRU, recurrent neural network, forecast

For citation: Semyonov E. D., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Nazarova I. L. Neural network forecasting of input parameters in oil development. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):42–51. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-6.

ВВЕДЕНИЕ

Текущие методы разработки месторождений нефти и газа в естественных условиях позволяют добывать эти ресурсы лишь в течение 3–5 лет. Это очень короткий срок, поэтому для увеличения нефтеотдачи используются методы искусственного воздействия на пласт. Одним из таких методов является закачка воды. Со временем пластовое давление снижается, что приводит к снижению дебитов скважин. Нагнетаемая вода восполняет эти потери, восстанавливая и поддерживая давление. Это, в свою очередь, увеличивает нефтеотдачу, так как вода вытесняет нефть из пласта. При длительной закачке вода может вымыть оставшиеся частицы нефти [1]. Расчеты для регулирования подачи нагнетающей жидкости зависят от множества факторов, включая количество жидкости и давление закачки, коэффициенты охвата пласта заводнением и коэффициенты вытеснения. Эти коэффициенты, в свою очередь, зависят от данных, полученных в процессе добычи [2, 3], поэтому сложно точно оценить предстоящие затраты на нагнетание жидкости в следующем периоде времени.

Параметры, характеризующие процесс добычи нефти и газа, а также результаты добычи за прошедшее время можно использовать для обучения нейронной сети. Нейронная сеть может использовать эти данные при построении прогноза для принятия решений о регулировании добычи нефти.

В настоящее время управление добычей нефти и газа основывается на результатах, полученных в прошлом. Этот метод эффективен для каждого конкретного месторождения, но он не учитывает изменения пластовых условий.

Цели и задачи представленного исследования заключаются в создании искусственной

нейронной сети (ИНС) для прогнозирования параметров добычи нефти, исследовании точности прогноза в зависимости от периода добычи и в изучении эффективности использования рекуррентной нейронной сети в решении задачи экстраполяции [4–7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Один из подходов к прогнозированию временных рядов, включая многофакторные, является использование рекуррентных нейронных сетей (РНС), таких как LSTM (Long Short-Term Memory). РНС шаг за шагом обрабатывает последовательность данных, сохраняя внутреннее состояние, полученное при обработке предыдущих элементов. В данном случае сеть LSTM может быть обучена на многофакторных временных рядах добычи нефти, где пользователь сам выбирает показатели, после чего модель обучается и выдает результаты прогнозирования.

При реализации рекуррентных нейронных сетей были использованы промышленные данные с трех скважин на Федоровском месторождении: одна из них является нефтяной скважиной, а две другие – нагнетательными. Из доступных параметров были выбраны количество закаченной нагнетательной жидкости в час и давление закачки. Прогнозируемым параметром является дебит нефти в час, который имеет высокую практическую значимость для оценки производительности и эффективности месторождения.

Для обучения модели было использовано 10 тысяч записей, что соответствует более чем 416 дням данных. Это позволяет модели учитывать разнообразные сезонные и долгосрочные паттерны, которые могут повлиять на производство и добычу нефти.

Структура данных представлена в табл. 1.

Таблица 1

Структура промышленных данных

Временной ряд	Единица измерения
Количество закаченной воды в нагнетательную скважину (для двух скважин)	Баррелей в час
Давление в скважине (для двух скважин)	Бар
Дебит нефти	Баррелей в час

Примечание: составлено авторами.

Тестовые данные представлены в виде временных рядов и записаны в файл формата CSV с разделителем – запятой.

Для обучения сети вначале были подготовлены данные с помощью библиотеки Python «pandas». После загрузки данные были подогнаны к масштабированию так, чтобы они представляли рациональные числа от 0 до 1, так как этого требует нейронная сеть.

Для обучения предоставленные данные были преобразованы в принятую LSTM форму [8]. Необходимо было преобразовать

данные в трехмерный формат, где первое измерение – это количество записей или строк в наборе данных, которое в нашем случае равно 10 000, второе – это количество временных шагов, равное 24, и последнее – количество индикаторов, равное 5.

Реализованная модель LSTM (рис. 1, 2) является последовательной моделью с несколькими слоями. Модель состоит из четырех слоев LSTM, за которыми следует плотный слой, предсказывающий дебет нефти.

```
#Загрузка данных из файла
data = pd.read_csv(r'C:\...\dataOil.csv')
#Масштабирование
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1))
data = scaler.fit_transform(data)
#Деление данных на обучающую выборку и тестовые данные
train_size = int(len(data) * 0.6)
test_size = len(data) - train_size
train, test = data[0:train_size, :],
data[train_size:len(data), :]
look_back = 5
trainX, trainY = createDataset(train, look_back)
testX, testY = createDataset(test, look_back)

#Массив моделей
models = [CreateNetworkAI(5, look_back, 1, 100, 0.2),
          ...
          CreateNetworkAI(5, look_back, 1, 1000, 0.2)]
#Названия моделей
nameModel = ["LSTM 1, 100, 0.2", ..... "LSTM 1, 1k, 300"]
#Кол-во эпох для каждой модели
countsEpoch = [100, ....., 300]
testPredicts = []

for index, value in enumerate(models):
    #Обучение модели
    model.fit(trainX, trainY, epochs=countsEpoch[index], verbose=2)
    #Прогноз на тестовых данных
    testPredict = model.predict(testX)
    testPredicts.append(testPredict)

    #Обратное масштабирование полученных данных
    testYunScaled = scaler.inverse_transform(testY)
    testPredictunScaled = scaler.inverse_transform(
        dataForUnScale(testPredict))

    #Вывод графика
    CreatePlotResult(testYunScaled, testPredictunScaled,
                     ['P1', 'W1', 'P2', 'W2', 'Oil'],
                     nameModel[index], 0, 508)
    #Использование метрик для полученных результатов
    metrics(testYunScaled[:, 4], testPredictunScaled[:, 4])
```

Рис. 1. Листинг 1. Модель ИНС LSTM

Примечание: составлено авторами.

```
def CreateNetworkAI(CountInput, LookBach,
                    CountLongMemLayer, CountUnits, dropOut):
    CountLayFlag = CountLongMemLayer - 1
    model = Sequential()
    model.add(LSTM(units=CountUnits, return_sequences=True,
                   input_shape=(LookBach, CountInput)))
    model.add(Dropout(dropOut))

    while CountLayFlag:
        model.add(LSTM(units=CountUnits,
                       return_sequences=(CountLayFlag - 1 != 0)))
        model.add(Dropout(dropOut))
        CountLayFlag -= 1

    model.add(Dense(units=1))
    model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')

    return model
```

Рис. 2. Листинг 2. Модель ИНС LSTM

Примечание: составлено авторами.

Также в модель были добавлены слои отсева. Слой отсева добавляется, чтобы избежать переобучения, которое является феноменом, когда модель машинного обучения работает лучше на обучающих данных по сравнению с тестовыми данными [8].

Для увеличения надежности в модель был добавлен плотный слой в конце. Число нейронов в плотном слое установлено равным 1, так как на выходе предсказывается 1 значение.

Для обучения используется среднеквадратичная ошибка в качестве функции потерь, а для уменьшения потерь или оптимизации алгоритма используется оптимизатор adam [9]. Среднеквадратичная ошибка измеряет среднее квадратов ошибок, т. е. среднеквадратич-

ную разность между расчетными и фактическими значениями.

Adam – это алгоритм оптимизации, который можно использовать вместо классической процедуры стохастического градиентного спуска для итеративного обновления весов сети на основе обучающих данных. Скорость обучения поддерживается для каждого веса сети (параметра) и адаптируется отдельно по мере развития обучения [9, 10].

Обучение проходило 50 эпох и заняло примерно 30 минут на персональной ЭВМ.

Структура обучающей выборки (рис. 3, выделено красным) и фактических данных, прогноз которых необходимо получить (рис. 3, выделено синим), представлены на рис. 3.

Time	P1	W1	P2	W2	Oil
0	8	153	10	172	92
60	9	184	10	180	104
120	8	169	8	176	93
180	8	149	10	149	89
240	9	162	8	164	127
300	9	161	9	151	105
360	8	161	9	176	124
420	10	187	8	155	128
480	9	183	10	186	82
540	9	168	9	159	116
600	9	172	10	185	117
660	8	174	8	164	83
720	9	158	9	159	111
780	9	179	8	165	128
840	10	151	9	152	128
900	8	167	10	152	116
960	10	176	9	166	117
1020	8	165	10	151	117
1080	10	175	10	153	121
1140	9	155	8	186	123
1200	9	160	8	157	86
1260	8	152	8	150	130
1320	10	150	9	171	83
1380	8	164	8	185	118
0	10	174	8	180	86
60	10	184	8	154	127
120	8	178	9	183	98
180	8	148	8	156	107

Рис. 3. Структура данных

Примечание: составлено авторами.

Аналогично реализации ИНС с моделью LSTM была реализована ИНС с моделью GRU для сравнительного анализа. Результаты

обучения и работы реализованных РНС представлены на рис. 4, 5.

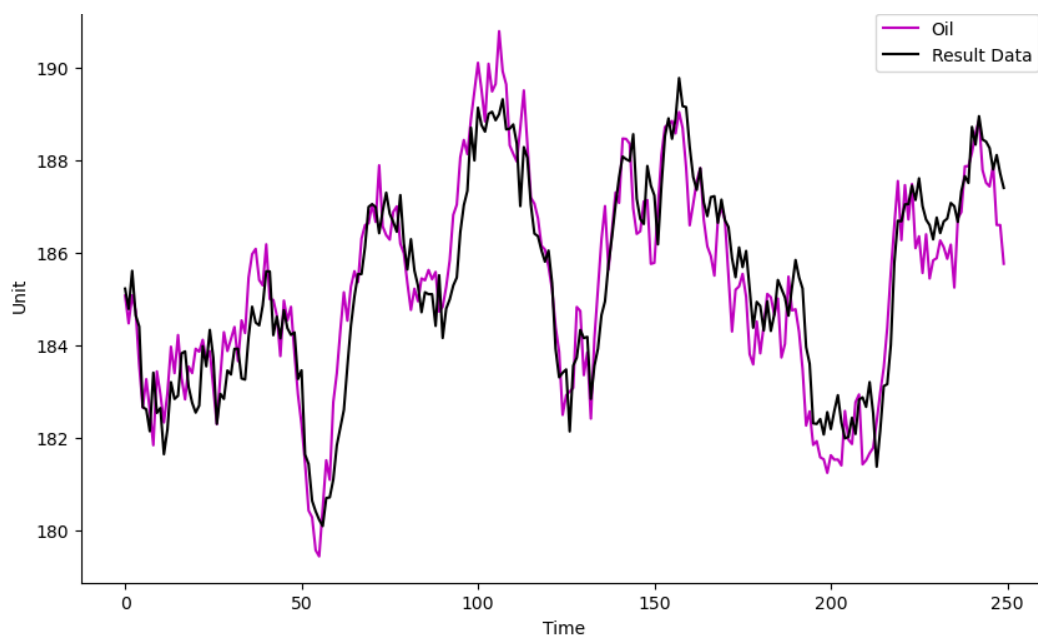


Рис. 4. Единственный слой LSTM, 500 нейронов

Примечание: составлено авторами.

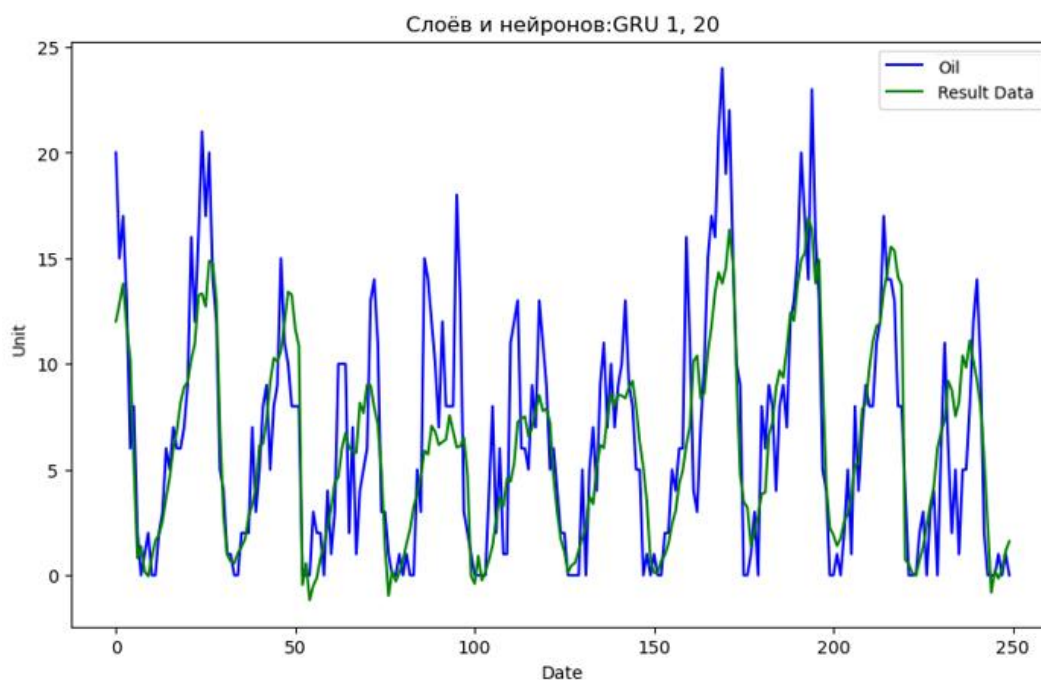


Рис. 5. Единственный слой GRU, 20 нейронов

Примечание: составлено авторами.

По вышеприведенным графикам видно, что в обоих случаях сохраняется тенденция при прогнозировании, но в случае GRU прогнозируемые данные сильнее отличаются

от фактических, чем у модели LSTM. Данные результаты подтверждают эффективность метода и модели LSTM в решении поставленной задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начальной стадии проведения исследования было создано 12 нейронных сетей с различными параметрами: количество слоев долгосрочной памяти варьировалось от 1 до 4, а размер выходного пространства – от 20 до 50.

Анализируя графики, можно сделать вывод, что повышение количества слоев долгосрочной памяти приводит к снижению точности предсказаний. В данном контексте для решения поставленной задачи достаточно использовать лишь один слой. Одновременно с этим увеличение размерности выходного пространства приводит к повышению точности прогнозирования.

В ходе второго этапа экспериментов было проведено обучение нейронных сетей с последовательным увеличением размерности выходного пространства. Наблюдаемое повышение точности на графиках подтверждает значимость выбранного параметра. Однако для обеспечения чистоты эксперимента была

проведена удачная попытка привести обучающую модель к снижению точности вследствие избыточного количества нейронов.

По итогам анализа данных были выбраны эффективные параметры для количества слоев долгосрочной памяти и количества нейронов в этих слоях: 1 слой, содержащий 300 нейронов.

Качество моделей LSTM и GRU одинаковые, но GRU проигрывает по времени обучения, и LSTM имеет явно определенную ячейку памяти, которая позволяет сохранять информацию на длительные промежутки времени. Это особенно полезно для моделирования зависимостей в долгосрочных временных рядах, где важно учитывать более удаленные зависимости. Поэтому в дальнейшем проводилось исследование зависимости количества эпох на точность прогноза у модели LSTM.

График предсказанных значений и метрики выбранной модели представлены на рис. 6.

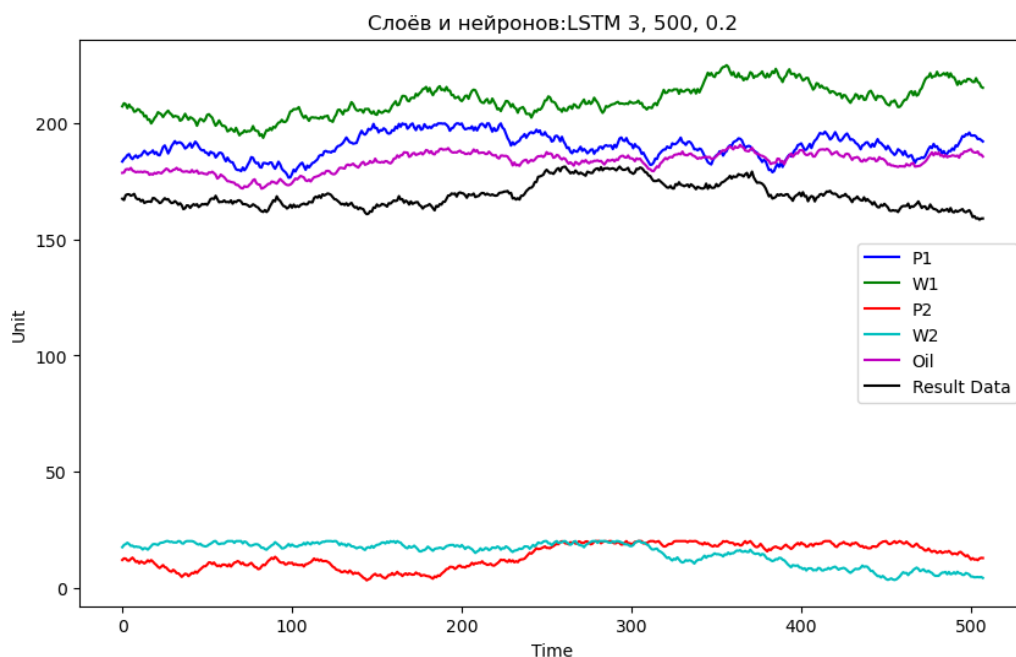


Рис. 6. Фрагмент автоматического отчета исследования

Примечание: составлено авторами.

Тест на стационарность:

Т-статистика = -8,423,

Р-значение = 0,000.

Критические значения:

1 %: -3,4319957562514243 – данные стационарны с вероятностью 99 %;

5 %: -2,862267205086051 – данные стационарны с вероятностью 95 %;

10 %: -2,5671570992175385 – данные стационарны с вероятностью 90 %;

MAD: 1,9625;

MSE: 6,4877;

Стандартная ошибка: 2,5471.

В целях обеспечения надлежащего контроля над экспериментом, а также в связи с нестационарным характером данных было проведено повторное исследование с исполь-

зованием различных параметров ИНС. Характеристики различных моделей, а также их результаты в терминах точности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры и результаты точности ИНС

№	Слоев	Нейронов	Отсев	Эпох	MAD	MSE	Стд. ошибка
1	1	100	0,2	100	1,187	2,4807	1,575
2	1	300	0,2	100	1,5975	3,5804	1,8922
3	1	500	0,2	100	1,268	2,2494	1,4998
4	3	500	0,2	100	14,928	285,837	16,906
5	1	500	0,1	100	1,545	3,4076	1,846
6	1	500	0,5	100	1,0529	1,7216	1,3121
7	1	500	0,8	100	1,5423	3,7508	1,9367
8	1	500	0,2	200	0,8363	1,1116	1,0543
9	1	500	0,2	300	1,1261	2,3053	1,5183
10	1	1 000	0,5	300	1,5606	3,5932	1,8956
11	1	500	0,5	200	0,8759	1,2283	1,1083
12	1	1 000	0,2	300	0,8394	1,2134	1,1016

Примечание: составлено авторами.

Результаты исследования на промышленных данных позволили сделать несколько важных выводов. Установлено, что увеличение количества нейронов или эпох обучения приводит к повышению точности прогнозирования. Однако при дальнейшем увеличении этих параметров возникает проблема переобучения, что приводит к ухудшению обобщающей способности модели.

Чтобы решить эту проблему, был изучен механизм вероятности отсева нейронов, который позволяет случайным образом исключать определенные нейроны во время обучения. Однако при увеличении вероятности отсева нейронов также возникает проблема недообучения, когда модель теряет способность извлекать важные признаки из данных.

В результате экспериментов были определены несколько наиболее подходящих параметров для обучения модели. В частности,

использование 500 нейронов и проведение 200 эпох обучения позволило достичь высокой точности прогнозирования. Кроме того, установка вероятности отсева нейронов на уровне 20 % также дала хорошие результаты.

Таким образом, были получены эффективные значения параметров, которые могут использоваться для эффективного обучения модели на основе промышленных данных. Эти результаты могут иметь важное практическое значение для прогнозирования и оптимизации процессов в промышленной сфере.

Графические представления результатов прогнозирования худшей модели приведены на рис. 7, 8. Анализ рис. 6 позволяет наглядно оценить отклонение прогнозируемых значений от фактических данных. Лучшие результаты представлены на графиках рис. 9, 10.

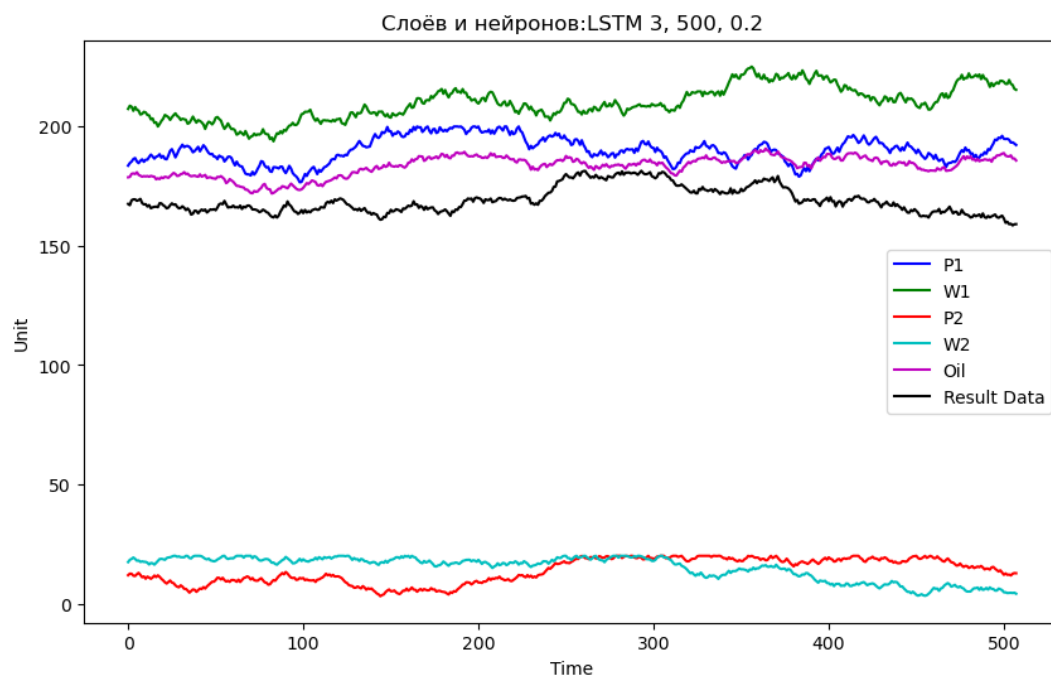


Рис. 7. График тестовых данных и результат прогноза
Примечание: составлено авторами.

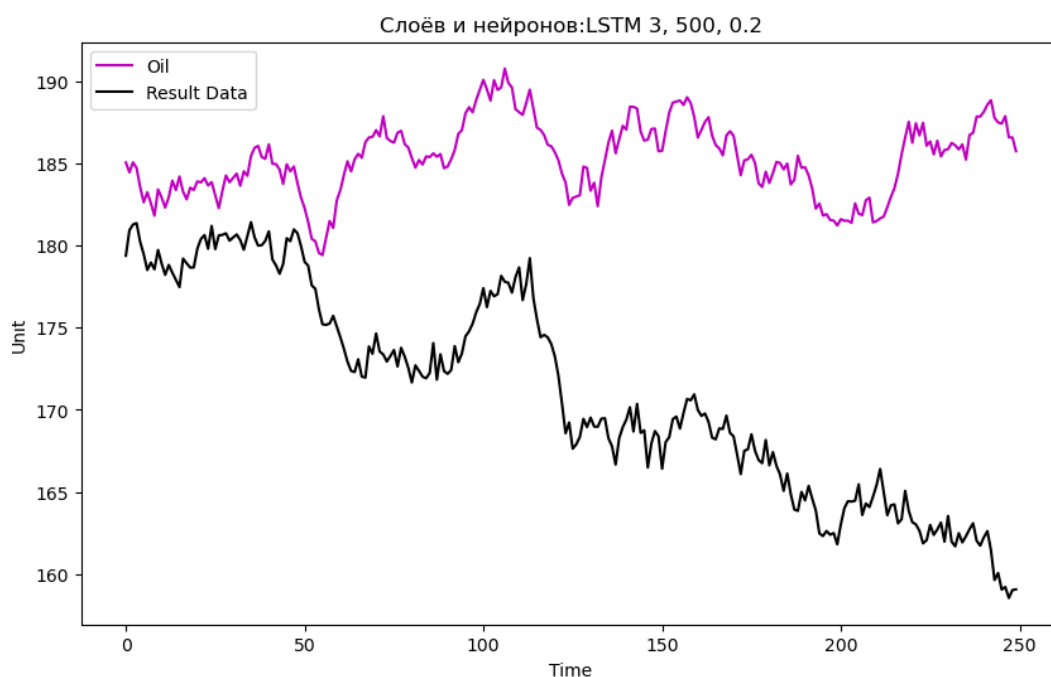


Рис. 8. График тестовых данных и результат прогноза. Худшая модель
Примечание: составлено авторами.

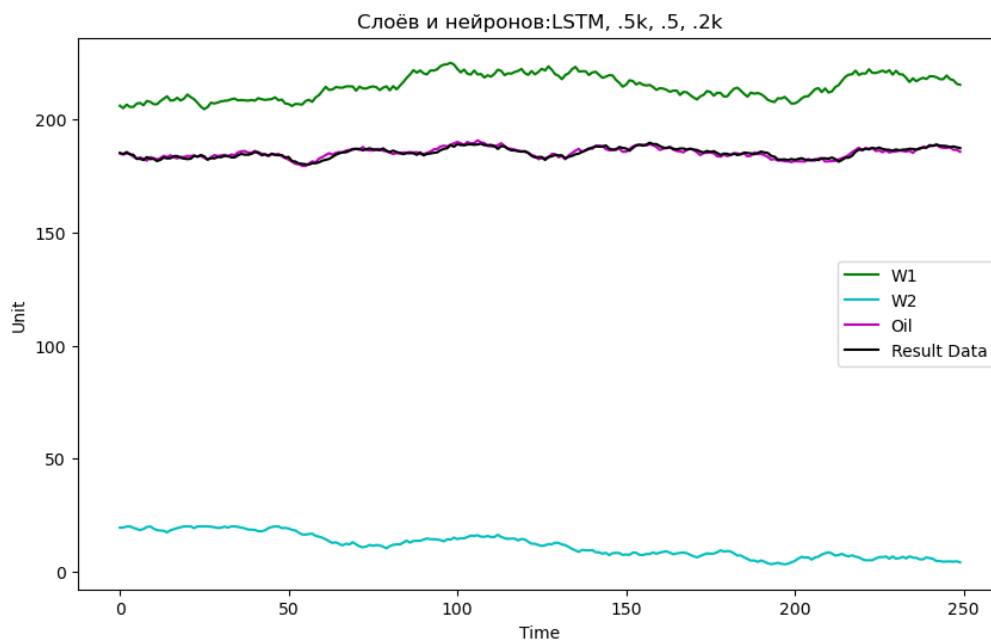


Рис. 9. График результата прогноза. Все параметры. Лучший результат
 Примечание: составлено авторами.

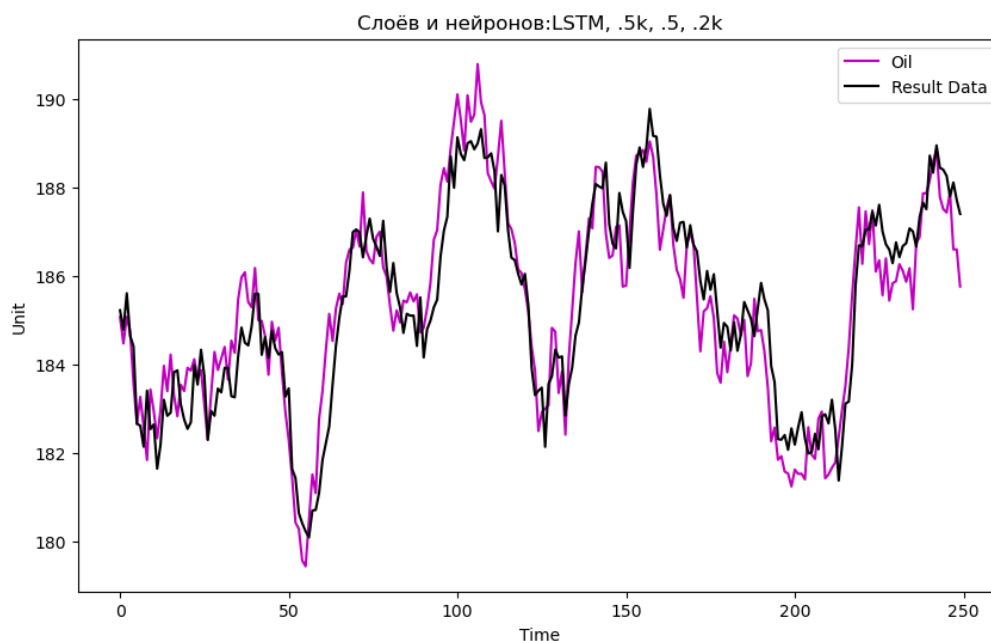


Рис. 10. График результата прогноза. Лучший результат
 Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены компьютерные эксперименты для определения эффективных параметров обучения нейронной сети. Было выявлено, что использование большего количества слоев приводит к уменьшению точности прогнозирования. Однако увеличение количества нейронов в сети позволяет повысить точность прогноза. При сравнении моделей

LSTM и GRU, модель GRU оказалась незначительно точнее, но, учитывая более длительное время обучения, модель LSTM – предпочтительнее.

Также было проведено исследование зависимости точности модели от количества эпох обучения. Результаты показали, что с увеличением количества эпох точность прогноза повышается.

В целом, данное исследование подтвердило эффективность применения рекуррентных нейронных сетей, особенно модели LSTM для прогнозирования временных рядов. Полученные результаты могут быть полезны для при-

ятия решений и оптимизации процессов в области добычи нефти и других сферах, где требуется точный прогноз временных данных.

Список источников

1. Куленцан А. Л., Марчук Н. А. Анализ добычи нефти из пластов в Российской Федерации // Российский химический журнал. 2022. Т. 66, № 1. С. 71–75. DOI 10.6060/rcj.2022661.10.
2. Мурашов Б. А., Тепляков Н. Ф. Расчет и оптимизация объектов подготовки и перекачки нефти при оценке проектов и реинжиниринге // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2018. № 4. С. 71–74.
3. Шевчук Т. Н., Кашников О. Ю., Мезенцева М. А. и др. Прогноз показателей добычи из пластов баженовской свиты на основе статистических зависимостей и методов машинного обучения // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2020. № 4. С. 63–68.
4. Тутыгин В. Искусственный интеллект в нефтегазовой индустрии как фактор развития производственной системы // Science and Innovation. 2023. № 3. С. 168–171.
5. Хасанов И. И., Хасанова З. Р., Шакиров Р. А. и др. Обзор применения нейросетей в области добычи и транспорта нефти и газа // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 3–4. С. 11–15.
6. Подольский А. К. Применение методов искусственного интеллекта в нефтегазовой промышленности // Современная наука. 2016. № 3. С. 33–36.
7. Семенов Е. Д. Адаптивное прогнозирование входных параметров при добыче нефти с использованием рекуррентной нейронной сети // Проблемы и решения автоматизации XXI века : сб. материалов V Национал. науч.-практич. студ. конф., 25–26 марта 2022 г., г. Сургут. Сургут : СурГУ, 2022. С. 78–83.
8. Будыльский Д. В. GRU и LSTM: современные рекуррентные нейронные сети // Молодой ученый. 2015. № 15. С. 51–54.
9. Kingma D. P., Ba J. L. Adam: A method for stochastic optimization. In: *Proceedings of the 3rd International Conference for Learning Representations*, May 7–9, 2015, San Diego. p. 1–15. DOI 10.48550/arXiv.1412.6980.
10. Melinte D. O., Vladareanu L. Facial expressions recognition for human-robot interaction using deep convolutional neural networks with rectified Adam optimizer. *Sensors*. 2020;20(8):2393.

Информация об авторах

Е. Д. Семёнов – инженер-программист II категории.
М. Я. Брагинский – кандидат технических наук, доцент.
Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент.
И. Л. Назарова – аспирант.

References

1. Kulentsan A. L., Marchuk N. A. Analysis of oil production from reservoirs in the Russian Federation. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2022;66(1):71–75. DOI 10.6060/rcj.2022661.10. (In Russian).
2. Murashov B. A., Teplyakov N. F. Calculation and optimization of oil treatment and pumping facilities during project evaluation and reengineering. *PROneft. Professionally about Oil*. 2018;(4):71–74. (In Russian).
3. Shevchuk T. N., Kashnikov O. Yu., Mezentseva M. A. et al. Production forecast for Bazhen formation reservoirs on the basis of statistical analyses and machine learning techniques. *PROneft. Professionally about Oil*. 2020;(4):63–68. (In Russian).
4. Tutygina V. Iskusstvennyi intellekt v neftegazovoi industrii kak faktor razvitiia proizvodstvennoi sistemy. *Science and Innovation*. 2023;(3):168–171. (In Russian).
5. Khasanov I. I., Khasanova Z. R., Shakirov R. A. et al. Overview of the use of neural networks in the field of oil and gas production and transportation. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2022;(3–4):11–15. (In Russian).
6. Podolsky A. K. The application of artificial intelligence methods in the oil and gas industry. *Sovremennaya nauka*. 2016;(3):33–36. (In Russian).
7. Semenov E. D. Adaptivnoe prognozirovaniye vkhodnykh parametrov pri dobyche nefiti s ispolzovaniem rekurrentnoi neuronnoi seti. In: *Proceedings of the V National Research-to-Practice Conference “Problemy i resheniya avtomatizatsii XXI veka”*, March 25–26, 2022, Surgut. Surgut: SurSU; 2022. p. 78–83. (In Russian).
8. Budylsky D. V. GRU i LSTM: sovremennyye rekurrentnye neuronnye seti. *Molodoi uchenyi*. 2015;(15):51–54. (In Russian).
9. Kingma D. P., Ba J. L. Adam: A method for stochastic optimization. In: *Proceedings of the 3rd International Conference for Learning Representations*, May 7–9, 2015, San Diego. p. 1–15. DOI 10.48550/arXiv.1412.6980.
10. Melinte D. O., Vladareanu L. Facial expressions recognition for human-robot interaction using deep convolutional neural networks with rectified Adam optimizer. *Sensors*. 2020;20(8):2393.

Information about the authors

E. D. Semyonov – Second Category Software Engineer.
M. Ya. Braginsky – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.
D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.
I. L. Nazarova – Postgraduate.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 004.94:519.854
DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-7

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ГРУППОВОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ С ЗАЩИТНИКАМИ

Александр Анатольевич Дубанов

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Россия
alandubanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1855-2562>

Аннотация. В статье рассматривается компьютерная модель квазидискретной игры группового преследования с участием преследователей и защитников, задачей которых является достижение статических целей. Достижение одной цели возможно несколькими преследователями в разное время, при этом выигрышем для преследователей можно считать достижение цели хотя бы одним из них, а успешным выполнением задачи для защитников – поражение всех целей. В модели формируется единая среда, при вхождении в которую преследователь считается обнаруженным. Назначение обнаруженному преследователю защитника цели производится по нескольким оптимизационным критериям.

Ключевые слова: преследователь, цель, защитник, погоня, траектория, модель

Для цитирования: Дубанов А. А. Модель автоматизированного распределения в задаче группового преследования с защитниками // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 52–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-7.

Original article

A MODEL OF AUTOMATED DISTRIBUTION OF DEFENDERS DURING GROUP PURSUIT

Aleksandr A. Dubanov

Buryat State University named after D. Banzarov, Ulan-Ude, Russia
alandubanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1855-2562>

Abstract. The article examines a computer model of a quasidiscrete group pursuit game with pursuers and defenders, whose aim is to reach static targets. Several pursuers may reach one target at different time periods. In order to win, at least one pursuer must reach the target, while defenders must eliminate all pursuers to succeed. A model has a unified environment that detects the pursuer as soon as he crosses it. One defender is assigned to the detected pursuer by several optimization criteria.

Keywords: pursuer, target, defender, pursuit, trajectory, model

For citation: Dubanov A. A. A model of automated distribution of defenders during group pursuit. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):52–58. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-7.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим начальную ситуацию, когда M преследователей $P_i, i \in [1 \dots M]$ начинают дви-

гаться к N статическим целям $T_j, j \in [1 \dots N]$.

Будем считать, что распределение преследователей по целям уже произведено. Процесс

автоматизированного распределения рассматривался в работах [1, 2]. Преследователи P_i начинают движение в разное время $t_i, i \in [1 \dots N]$. Из K мест локализаций защитников $D_k, k \in [1 \dots K]$ защитники начинают движение к преследователям P_i как только преследователи войдут в область обнаружения. Область обнаружения для мест локализации $D_k, k \in [1 \dots K]$ является интегрированной для каждого из защитников. Другими словами, любой объект, входящий в область обнаружения, становится видимым для всех защитников.

В плане выбора оптимизирующего фактора отдельного рассмотрения требует вопрос, когда из одного места локализации начинают движение несколько защитников.

В работах [3–5] рассмотрены основные положения теории игр, на основе которых производился анализ и выбор методов сближения. В работах [6, 7] освещались вопросы автономного наведения на цель, в работах [8–12] – подходы к групповому поведению как преследователей, так и целей. На основе данных работ выстраивалось синхронизированное и оптимизированное групповое поведение защитников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Формирование начальных положений участников

Будем считать, что каждому из мест локализаций защитников $D_k, k = [1 \dots K]$ соответствует свой радиус обнаружения r_k . Тогда для любого вектора X пространства $\mathbb{R}^2$ или $\mathbb{R}^3$ формируется область обнаружения $L_k(X) = \begin{cases} 1, & \text{if } |X - D_k| \leq r_k \\ 0, & \text{if } |X - D_k| > r_k \end{cases}$ для мест локализации защитников D_k .

Тогда единая область обнаружения $L(X)$ будет представлять собой совокупность всех локальных областей обнаружения $L_k(X)$:

$$L(X) = \bigcup_{k=1}^{K} L_k(X).$$

На рис. 1 приведен пример начального расположения преследователей, целей и защитников и единая область обнаружения.

Пусть расчетный период занимает промежуток $t = [0 \dots t_{fin}]$. Время начала движения каждого преследователя P_i составляет $t_i, i \in [1 \dots M]$. Для модуля скорости каждого из преследователей можно составить функцию для иллюстрации раздельного запуска:

$$v_i(t, X) \times \delta(t, t_i), \text{ где } \delta(t, t_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } t < t_i \\ 1, & \text{if } t \geq t_i \end{cases}.$$

В примерах модуль скорости преследователей является постоянным $v_i(t, X) = v_i$.

Таким образом, для каждого преследователя P_i можно предложить итерационную схему:

$$\vec{P}_{i,i^*} = \vec{P}_{i,i^*-1} + v_i \times \delta(t, t_i) \times \vec{u}_i,$$

где $\vec{P}_{i,i^*}$ – положение P_i преследователя на i^* шаге итерации,

$\vec{u}_i$ – единичный управляющий вектор.

Хотя движение преследователей является равномерным и прямолинейным, расчет управляющего вектора должен быть взят из библиотеки на основании того, какой стратегии преследования придерживается данный участник.

На рис. 1 представлен первый кадр анимированного изображения [13]. На этом видео можно посмотреть как рассчитываются расстояния от каждого из мест локализации защитников D_k до каждого из обнаруженных преследователей P_i . Напомним, что входя в область обнаружения, преследователь становится заметным для всех защитников.

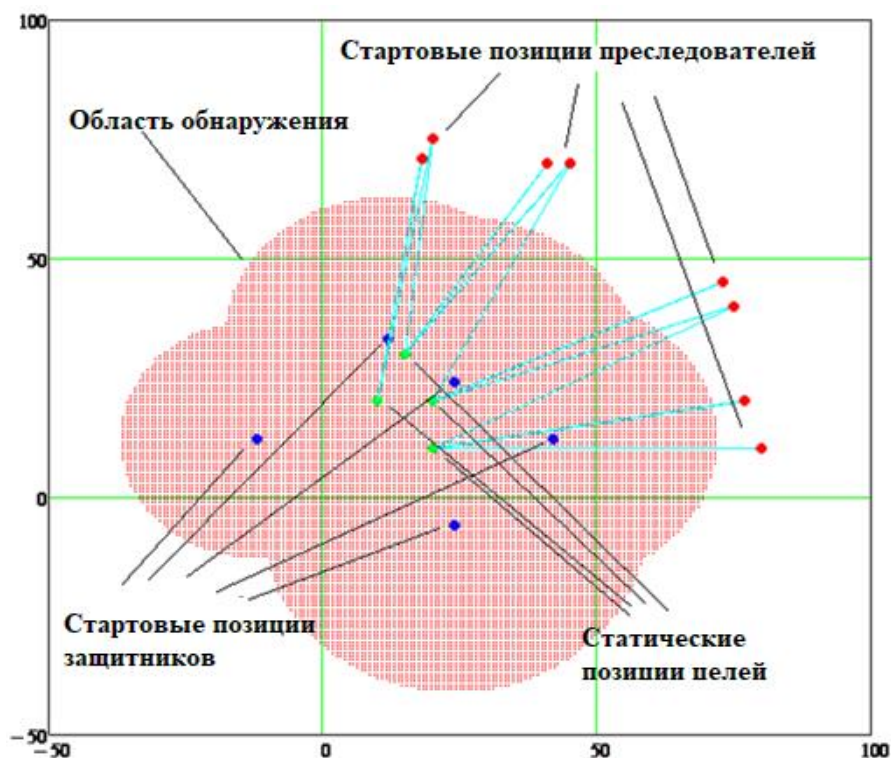


Рис. 1. Начальные положения преследователей, целей и защитников

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

2. Моделирование поведения защитников

Пусть время входа в зону обнаружения $L(X)$ для каждого из преследователей P_i характеризуется временем t_i^* . Для всех защитников в местах локаций D_k можно предложить следующую итерационную схему:

$$\vec{D}_{i,k,k^*} = \vec{D}_{i,k,k^*-1} + v_k \times \delta(t, t_i^*) \times \vec{W}_{i,k,k^*}, \quad (1)$$

где $\vec{D}_{i,k,k^*}$ – радиус-вектор положения k -го защитника, стремящегося к i -му преследователю на k^* -м шаге итераций;

v_k – модуль скорости равномерного движения k -го защитника;

$$\delta(t, t_i^*) = \begin{cases} 0, & \text{if } t < t_i^* \\ 1, & \text{if } t \geq t_i^* \end{cases} \quad \text{– время входа в зону}$$

$L(X)$ преследователя P_i ;

$\vec{W}_{i,k,k^*}$ – единичный управляющий вектор k -го защитника, стремящегося к i -му преследователю на k^* -м шаге итераций. Рассчитывается по обращению к библиотеке расчета

траекторий для выбора метода преследования. В моделях рассматривается метод погони.

Итерационная схема 1 позволяет при существовании достижения преследователя рассчитать с заданной степенью точности время его достижения, а именно количество итераций до сближения с преследователем.

При сближении с i -м преследователем защитников из локаций $D_k, k \in [1 \dots K]$ рассчитываются предполагаемые значения времени $\{\tau_{i,k}\}, k \in [1 \dots K]$ достижения i -го преследователя защитниками из всех локаций D_k . Из множества значений $\{\tau_{i,k}\}$ следует выбрать минимальное значение $\tau_i^* = \min_k \{\tau_{i,k}\}$.

На рис. 2 представлен первый кадр видео анимированного изображения [14] автоматического назначения преследователю защитника с условиями минимального времени достижения как пример, иллюстрирующий, что как только преследователь зашел в область обнаружения, к нему устремляется защитник, имеющий минимальное время достижения.

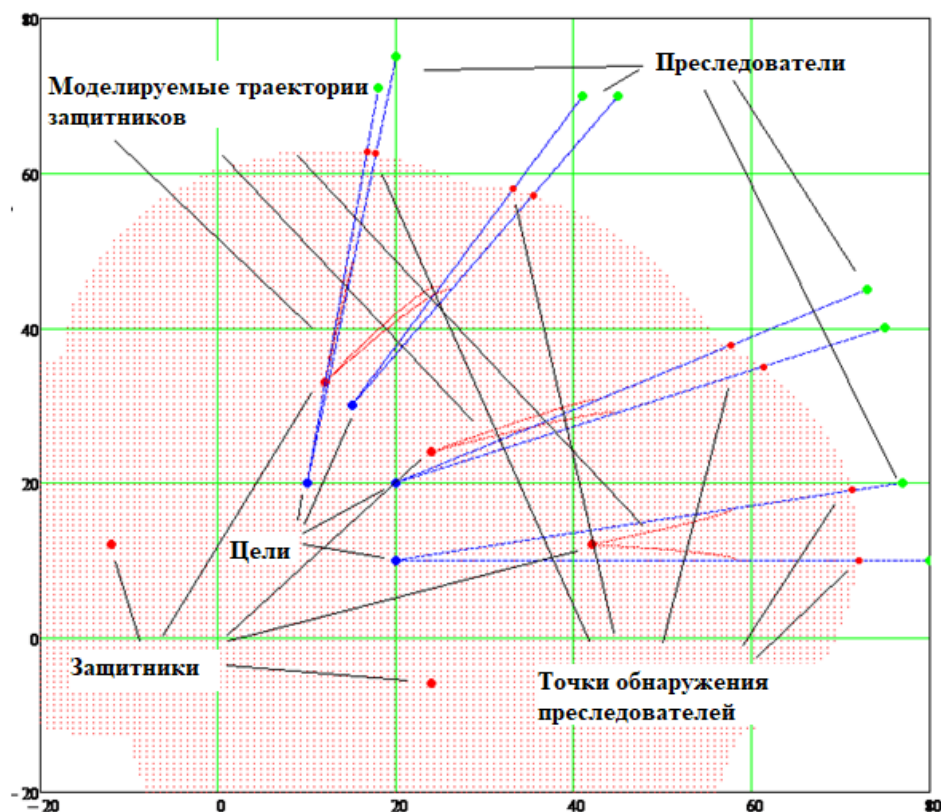


Рис. 2. Распределение защитников по времени преследователей

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Рассмотрим вариант автоматического назначения защитника преследователю из соображений минимального начального расстояния [15].

При сближении защитников из локаций $D_k, k \in [1 \dots K]$ с i -м преследователем рассчитываются начальные расстояния $\{s_{i,k} = |\vec{P}_i - \vec{D}_k|, k \in [1 \dots K]\}$. Из множества значений $\{s_{i,k}\}$ следует выбрать минимальное значение $s_i^* = \min_k \{s_{i,k}\}$. Анимированное изображение [15] показывает результаты такого моделирования.

3. Учет ограничений по количеству запускаемых защитников

Для учета ограничений по количеству запускаемых защитников с начальным расстоянием до преследователя из мест локаций $D_k, k \in [1 \dots K]$ с числом ограничения Lim_T также рассмотрены случаи с оптимизирующими факторами времени достижения преследователя.

Для примера рассмотрен случай распределения защитников с минимальным временем достижения преследователя. Рассмотрим матрицу $T_{t,opt}$ расчета времени достижения, в которой индекс защитника расположен по строкам, а индекс преследователя – по столбцам (рис. 3а). На рис. 3с показан результат автоматического распределения защитников по преследователям. Защитник назначается, как только преследователь входит в зону обнаружения из расчетов времен достижения данного преследователя. На рис. 3d показан результат сортировки матрицы распределения для числа Lim_T . На рис. 3b показана подматрица с нераспределенными преследователями – по столбцам, и возможными преследователями – по строкам.

После проведения минимизации по столбцам данной подматрицы получается окончательное распределение защитников по преследователям.

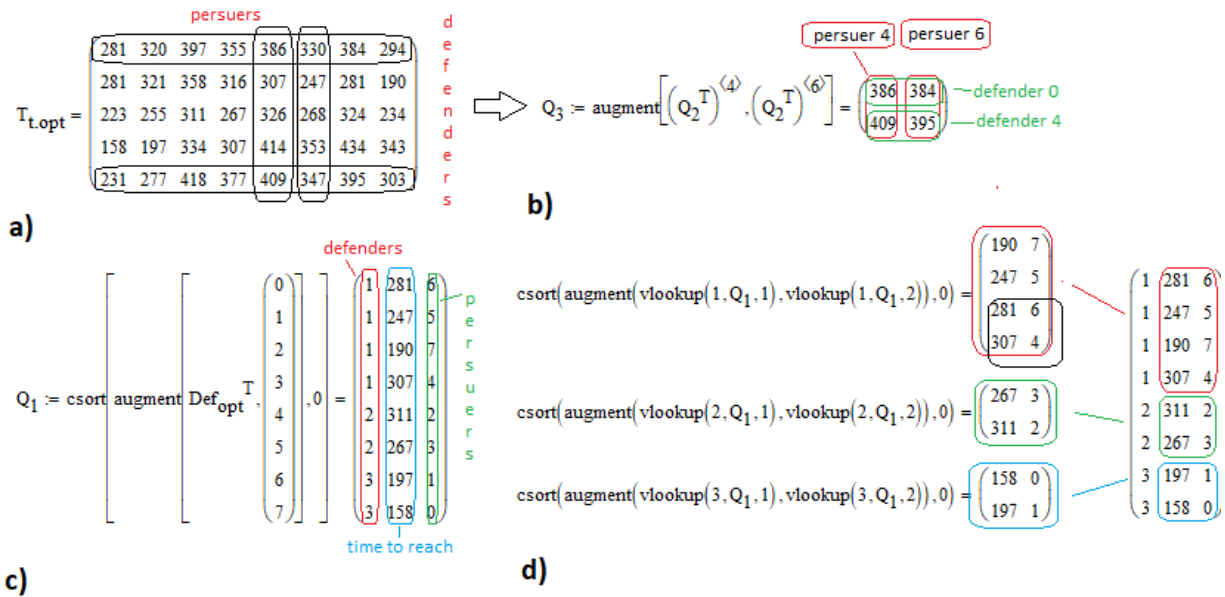


Рис. 3. Результат расчета распределения по времени с ограничением $\text{Lim}_T = 2$

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 4, дополненном анимированным изображением [16], показан пример распределения защитников по преследователям по минимальному времени достижения с ограничением

по количеству запусков из одной локации.

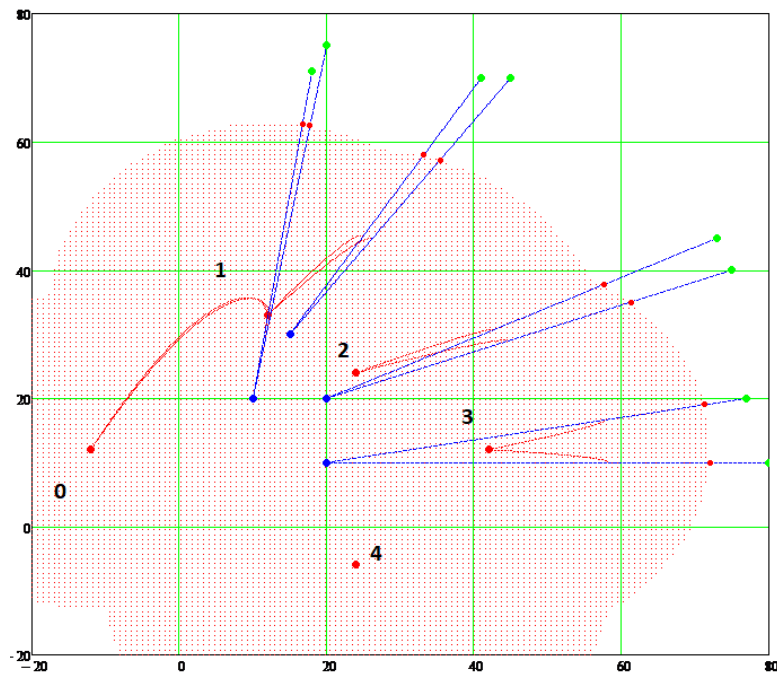


Рис. 4. Пример распределения по времени с ограничением $\text{Lim}_T = 2$

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 5 показан результат распределения защитников по преследователям с момента их обнаружения с ограничением по количеству запусков из одной локации. В качестве

оптимизирующего фактора применяется значение минимального расстояния до преследователя.

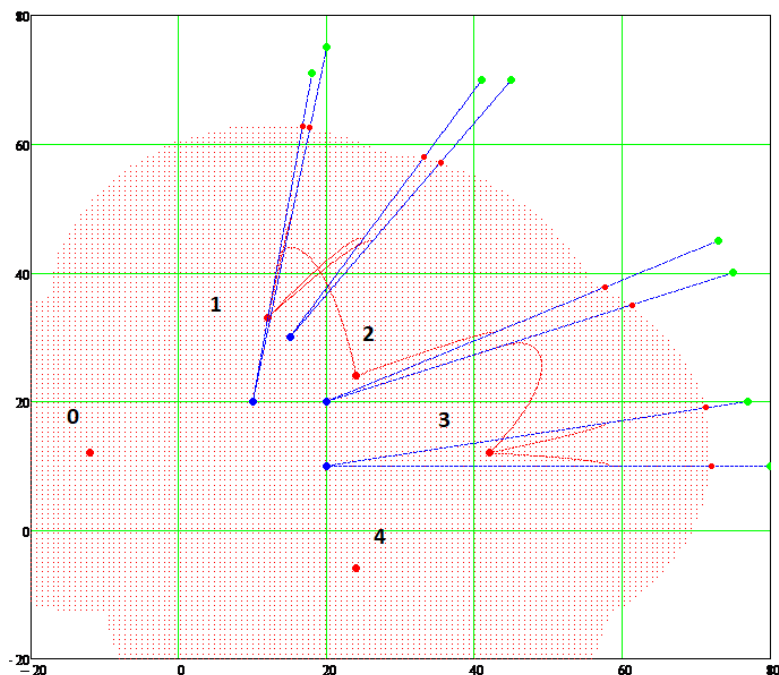


Рис. 5. Пример распределения по расстоянию с ограничением $Lim_r = 3$

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Рис. 5 дополнен анимированным изображением [17] для просмотра итерационного процесса группового преследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами исследований можно считать разработку компьютерной модели автоматизированного распределения защитников по преследователям. В приведенной компьютерной модели ситуация для защитников не является детерминированной, т. е. защитникам неизвестна информация о количестве преследователей, их скоростных характеристиках, их направленности на цели. Информация о преследователе становится известной для защитников по мере их входа в область обнаружения. Оптимизирующими факторами в моделях являются предполагаемое время достижения преследователя, начальное расстояние до преследователя, допустимое количество защитников, находящихся в одной локации.

В настоящее время информация о компьютерных моделях группового преследования

с автоматическим распределением ролей участникам и моделях с наличием оптимизирующих факторов в открытой печати отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 3 представлена детерминированная обстановка для защитников по числу преследователей, их начальным координатам, целям, которые они преследуют, и их скоростные характеристики. Данный пример приведен только для иллюстрации изменения характера автоматического распределения защитников по преследователям.

При создании антагонистической модели противоборства защитников против преследователей алгоритм для защитников может не включать в себя полное описание стороны преследователей. В описанной модели подразумевается, что преследователю, только что вошедшему в зону обнаружения, назначается защитник в соответствии с оптимизирующим фактором.

Список источников

1. Дубанов А. А. Модель согласованного группового преследования с распределением по целям // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 21–29. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-21-29.

References

1. Dubanov A. A. A model of cooperated group pursuit with distribution by targets. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):21–29. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-21-29. (In Russian).

2. Дубанов А. А. Методы применения матриц при создании моделей группового преследования // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023. Т. 23, № 2. С. 191–202. DOI 10.23947/2687-1653-2023-23-2-191-202.
3. Айзекс Р. Дифференциальные игры / пер. с англ. В. И. Аркина, Э. Н. Симаковой. М.: Мир, 1967. 479 с.
4. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974. 456 с.
5. Петросян Л. А. Дифференциальные игры преследования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 232 с.
6. Хачумов М. В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015. № 2. С. 45–52.
7. Хачумов М. В. Задачи группового преследования цели в условиях возмущений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. № 2. С. 46–54.
8. Банников А. С. Некоторые нестационарные задачи группового преследования // *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. 2013. № 1. С. 3–46.
9. Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П., Яхно В. П. Уклонение групповой цели в трехмерном пространстве // *Автоматика и телемеханика*. 2008. № 5. С. 3–14.
10. Гусятников П. Б. Убегание одного нелинейного объекта от нескольких более инертных преследователей // *Дифференциальные уравнения*. 1976. Т. 12, № 2. С. 213–226.
11. Гусятников П. Б. Дифференциальная игра убегания от лиц // *Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика*. 1978. № 6. С. 22–32.
12. Гусятников П. Б. Дифференциальная игра убегания // *Кибернетика*. 1978. № 4. С. 72–77.
13. Видео, начальные положения преследователей, целей и защитников. URL: <https://youtu.be/rFj6qvaCp4A> (дата обращения: 13.11.2023).
14. Видео, оптимизация по времени достижения. URL: https://youtu.be/gk9_1kfiuQ (дата обращения: 13.11.2023).
15. Видео, оптимизация по минимальному начальному расстоянию между преследователем и защитником. URL: <https://youtu.be/-euOwashsxU> (дата обращения: 13.11.2023).
16. Видео, оптимизация по времени с ограничением на количество пусков отдельного защитника. URL: <https://youtu.be/Z-EA8Us6nJ8> (дата обращения: 13.11.2023).
17. Видео, оптимизация по расстоянию до хищника с ограничением по количеству пусков. URL: https://youtu.be/GjR1o_NC2G8 (дата обращения: 13.11.2023).
2. Dubanov A. A. Methods for applying matrices when creating models of group pursuit. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):191–202. DOI 10.23947/2687-1653-2023-23-2-191-202. (In Russian).
3. Isaacs R. Differential games: A mathematical theory with applications to warfare and pursuit, control and optimization. Arkin V. I., Simakova E. N., translators. Moscow: Mir; 1967. 479 p. (In Russian).
4. Krasovsky N. N., Subbotin A. I. Pozitsionnye differentsialnye igry. Moscow: Nauka; 1974. 456 p. (In Russian).
5. Petrosyan L. A. Differential games of pursuit. Leningrad: Publishing House of Leningrad University; 1977. 232 p. (In Russian).
6. Khachumov M. V. Reshenie zadachi sledovaniia za tseliu avtonomnym letatelnyy apparatom. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2015;(2):45–52. (In Russian).
7. Khachumov M. V. Zadachi gruppovogo presledovaniia tseli v usloviakh vozmushchenii. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2016;(2):46–54. (In Russian).
8. Bannikov A. S. Some non-stationary problems of group pursuit. *Izvestiia Instituta Matematiki i Informatiki Udmurtskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2013;1;3–46. (In Russian).
9. Abramyants T. G., Maslov E. P., Yakhno V. P. Evasion of multiple target in three-dimensional space. *Automation and Remote Control*. 2008;(5):3–14. (In Russian).
10. Gusyatinikov P. B. The escape of a certain nonlinear object from several more inert pursuers. *Differentsialnye uravneniia*. 1976;12(2):213–226. (In Russian).
11. Gusyatinikov P. B. Differentsialnaia igra ubeganiia ot lits. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskai kibernetika*. 1978;(6):22–32. (In Russian).
12. Gusyatinikov P. B. Differentsialnaia igra ubeganiia. *Cybernetics*. 1978;(4):72–77. (In Russian).
13. The initial location of pursuers, aims, and defenders. Video. URL: <https://youtu.be/rFj6qvaCp4A> (accessed: 13.11.2023). (In Russian).
14. The time optimization for pursuit. Video. URL: https://youtu.be/gk9_1kfiuQ (accessed: 13.11.2023). (In Russian).
15. The minimum initial distance optimization for a pursuer and a defender. Video. URL: <https://youtu.be/-euOwashsxU> (accessed: 13.11.2023). (In Russian).
16. Optimization of the time with limited number of running for a certain defender. Video. URL: <https://youtu.be/Z-EA8Us6nJ8> (accessed: 13.11.2023). (In Russian).
17. Optimization of the distance to a pursuer with limited number of running. Video. URL: https://youtu.be/GjR1o_NC2G8 (accessed: 13.11.2023). (In Russian).

Информация об авторе

А. А. Дубанов – кандидат технических наук, доцент.

Information about the author

A. A. Dubanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

АНДРЕЮ ВАЛЕНТИНОВИЧУ ЗАПЕВАЛОВУ – 60 ЛЕТ



31 декабря 2023 года исполнится 60 лет заведующему кафедрой автоматики и компьютерных систем СурГУ кандидату технических наук доценту Андрею Валентиновичу Запевалову.

На выбор будущей специальности большое влияние на Андрея Валентиновича оказал родной брат мамы – выпускник кафедры автоматики и телемеханики Томского политехнического института, заразив своей увлеченностью автоматизацией. По окончании школы направление обучения было predetermined. А. В. Запевалов поступил на факультет автоматики и вычислительной техники Томского политехнического института, который с отличием окончил в 1987 году. В годы учебы Андрей Валентинович получил большой опыт исследовательской и проектной деятельности, участвуя в разработках АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва» в г. Железногорске. По окончании обучения он получил предложение остаться работать на кафедре автоматики и компьютерных систем и продолжить обучение в аспирантуре. В 1995 году А. В. Запевалов успешно защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Управление в технических системах» на тему «Разработка и исследование метода моделирования и имитации сложных управляемых динамически реконфигурируемых систем».

В феврале 1997 года А. В. Запевалов был приглашен работать в молодой вуз Югры – Сургутский государственный университет на

инженерно-физический факультет на должность доцента, заместителя заведующего кафедрой автоматики и процессов управления. Динамику и глубину предстоящей работы характеризовало то, что запись в трудовой книжке о трудоустройстве на кафедру автоматики и процессов управления появилась до приказа о создании такой кафедры. Поэтому с приходом в СурГУ была проведена большая работа по лицензированию специальности «Управление в технических системах», подбору кадров. В период организации и становления кафедры новым сотрудникам необходимо было работать с двойной нагрузкой, обеспечивая учебный процесс небольшим количеством преподавательского состава. На данный момент кафедра осуществляет выпуск по двум направлениям бакалавриата – «Управление в технических системах» и «Программная инженерия», и двум магистерским программам. Расширение направлений подготовки привело к смене названия кафедры. С 2010 года Андрей Валентинович руководит кафедрой автоматики и компьютерных систем.

А. В. Запевалов разработал и читает курсы лекций по специальным дисциплинам и дисциплинам специализации по робототехнике и мехатронике, архитектуре и организации ЭВМ, программируемым логическим контроллерам, интегрированным системам управления, инженерным исследованиям и технологиям решения инженерных задач, является руководителем курсового и дипломного проектирования.

В 2017 году кафедра автоматики и компьютерных систем вступила во Всемирную инициативу CDIO, направленную на реформирование высшего образования в области техники и технологий, что позволило внести изменения в систему подготовки студентов кафедры, изменить структуру учебных планов, подтвердить качество подготовки студентов на международном уровне.

Андрей Валентинович Запевалов является автором более 70 научных и учебно-методи-

ческих публикаций, автором свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, членом диссертационного совета К 800.005.02.

Научно-педагогический труд А. В. Запевалова отмечен Благодарственным письмом Департамента образования и науки г. Сургута, Почетной грамотой Сургутского государственного университета, Благодарностью Губернатора ХМАО-Югры, Почетной грамотой Министерства образования и науки РФ.

Коллектив кафедры автоматики и компьютерных систем, коллеги СурГУ поздравляют Андрея Валентиновича с пожеланиями дальнейших успехов в его ответственной деятельности на благо Сургутского государственного университета.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются
на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных
Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются
в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 18.12.2023. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 6,1. Заказ № 300. Цена свободная