

ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

PROCEEDINGS IN CYBERNETICS

12+



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

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 23, № 4

**Сургут
2024**

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

Ларина С. С.

Редактор

Зелексон Л. А.

Верстка

Чорньенского С. И.

Переводчик

Бенская М. О.

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. Drevs 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

Larina S. S.

Editor

Zelekson L. A.

Layout

Chornenkiy S. I.

Translator

Benskaya M. O.

Cover Image:

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

© Galkin V. A., Gorelikov A. V.

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 – Yugra, 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

Антипин Д. П., Овчаренко М. Е., Заруднев А. А.

Моделирование режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности 6

Брыкин В. В., Крамаров С. О., Гросу А.

Предсказание признаков растений для моделирования экосистем: комбинированная модель на основе изображений и вспомогательных данных 18

Василенко Н. Е., Медведева Н. А.

Нейросетевая система видеонаблюдения 25

Кожихова К. Е., Тараканов Д. В., Чалей И. В.

Нейросетевая рекомендательная система по подбору контента для онлайн-кинотеатров 34

Кузнецов А. А.

Оценка информационной избыточности модулярных процессоров 53

Поддубный И. В., Брагинский М. Я.

Анализ и сравнение блочных алгоритмов симметричного шифрования 60

Тунян Э. Г., Тютюнник В. Б., Сазиков Р. С., Гавриленко Т. В.

Современные информационные технологии в амбулаторной реабилитации неврологических пациентов 69

Шошин Е. Л.

Подповерхностное радиолокационное зондирование пластиковых объектов 83

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Веремчук Н. С.

О математических моделях размещения оборудования при проектировании и реконструкции предприятий 92

Золотарева Н. С., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Назарова И. Л.

Математическая модель нагрева теплоносителя в топочной и конвективной камере 100

Цымай Ю. В.

Метод выбора управляющего решения при диапазонных входных сигналах для детерминированно-стохастической модели 110

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Antipin D. P., Ovcharenko M. E., Zarudnev A. A.</i> Operating modes modeling for electrotechnical complex of oil production with downhole reactive power compensator.....	6
<i>Brykin V. V., Kramarov S. O., Grosu A.</i> Plant traits prediction for ecosystem modeling: Combined model based on images and auxiliary data.....	18
<i>Vasilenko N. E., Medvedeva N. A.</i> Neural network surveillance system	25
<i>Kozhikhova K. E., Tarakanov D. V., Chaley I. V.</i> Neural network-based recommendation system for content selection in online movie theatres.....	34
<i>Kuznetsov A. A.</i> Assessment of information redundancy of modular processors	53
<i>Poddubnyy I. V., Braginsky M. Ya.</i> Analysis and comparison of block symmetric encryption algorithms.....	60
<i>Tunyan E. G., Tyutyunnik V. B., Sazikov R. S., Gavrilenko T. V.</i> Modern information technologies in outpatient rehabilitation of neurological patients.....	69
<i>Shoshin E. L.</i> Subsurface radar sensing of plastic objects	83

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Veremchuk N. S.</i> On mathematical models of equipment placement in design and reconstruction of enterprises	92
<i>Zolotareva N. S., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Nazarova I. L.</i> Mathematical model of transfer medium heating in furnace and convection chamber	100
<i>Tsymay Yu. V.</i> Method for selecting management decision with range input signals for deterministic and stochastic model	110

Научная статья

УДК 621.311:622.3

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-1>

Моделирование режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности

*Дмитрий Павлович Антипин¹, Максим Евгеньевич Овчаренко²,
Александр Алексеевич Заруднев³*

^{1, 2, 3}*Сургутский государственный университет, Сургут, Россия*

¹*antipin_dp@surgu.ru*, <https://orcid.org/0009-0003-1580-8520>

²*ovcharenko_me@edu.surgu.ru*, <https://orcid.org/0009-0003-9160-1855>

³*zarudnev_aa@edu.surgu.ru*, <https://orcid.org/0009-0009-1150-964X>

Аннотация. В результате моделирования режима работы системы электроснабжения установки электроцентробежного насоса куста нефтедобычи в условиях несинусоидальности питающего напряжения представлена сравнительная оценка показателей качества электрической энергии – суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I (коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и тока). Оценены потери активной мощности в сети при использовании устройства внутрискважинной компенсации реактивной мощности и без него. Данные моделирования дают хорошее согласие с экспериментальными данными и характеристиками используемых аппаратов, заявленными производителями. Установка компенсатора реактивной мощности не вносит заметных искажений питающего напряжения в системе, создаваемых станцией управления, значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U компенсатора не превышает допустимых уровней и составляет менее 5%. Установка внутрискважинного компенсирующего устройства (неуправляемого) в условиях несинусоидальности питающего напряжения уменьшает потери активной мощности, тем самым снижая потребление электроэнергии внутрискважинным оборудованием.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, энергоэффективность, несинусоидальность, потери мощности и энергии, внутрискважинный компенсатор реактивной мощности, высшие гармоники

Для цитирования: Антипин Д. П., Овчаренко М. Е., Заруднев А. А. Моделирование режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 6–17. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-1>.

Original article

Operating modes modeling for electrotechnical complex of oil production with downhole reactive power compensator

Dmitry P. Antipin¹, Maksim E. Ovcharenko², Aleksandr A. Zarudnev³

^{1, 2, 3}*Surgut State University, Surgut, Russia*

¹*antipin_dp@surgu.ru*, <https://orcid.org/0009-0003-1580-8520>

²*ovcharenko_me@edu.surgu.ru*, <https://orcid.org/0009-0003-9160-1855>

³*zarudnev_aa@edu.surgu.ru*, <https://orcid.org/0009-0009-1150-964X>

Abstract. Operation mode modeling of the power supply system for an electric centrifugal pump plant of an oil well cluster under conditions of power supply voltage unsinusoidality provided a comparative evaluation of electric power quality indicators: the total coefficient of harmonic components of voltage K_U and cur-

rent K_I (coefficients of sinusoidality curve voltage distortion and current). Active power losses in the grid with and without downhole reactive power compensator are evaluated. The modelling data agrees closely with the experimental data and characteristics of the used devices declared by the manufacturers. Installation of the reactive power compensator does not cause noticeable distortions of the supply voltage in the system created by the control station. The value of the total coefficient of voltage harmonic components of K_U compensator does not exceed the acceptable levels and makes less than 5%. Installation of downhole compensating device (uncontrolled) in conditions of supply voltage unsinusoidality cuts down active power losses, thus reducing power consumption by downhole equipment.

Keywords: electrical submersible motor, energy efficiency, unsinusoidality, power and energy loss, downhole reactive power compensator, higher harmonics

For citation: Antipin D. P., Ovcharenko M. E., Zarudnev A. A. Operating modes modeling for electro-technical complex of oil production with downhole reactive power compensator. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):6–17. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-1>.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из задач развития нефтяных компаний – это энергосбережение и повышение энергетической эффективности. В частности, уменьшение потребления электроэнергии при добыче с помощью установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Ими добывается, как известно, порядка 60–70% нефти, и в дальнейшем доля будет только возрастать. Погружной электродвигатель (ПЭД) является приводом для установок ЭЦН, а управление, защита ПЭД производится в станции управления.

Сокращение потребления электроэнергии и потерь от общего энергопотребления при добыче с УЭЦН достигается путем увеличения КПД ЭЦН, увеличения сечения жил питающей кабельной линии (КЛ), применения ПЭД с повышенным напряжением [1–3]. Задачами повышения коэффициента мощности систем электроснабжения нефтедобывающих установок и снижения потерь мощности занимались многие ученые, как российские, так и зарубежные: Ю. С. Железко, L. S. Czarnecki и др. [4, 5]. В работах предложены способы повышения продуктивности использования ПЭД установки ЭЦН за счет применения внутрискважинного компенсатора реактивной мощности [6–9]. Для предложенных технических устройств в работе получены результаты по определению оптимальных параметров внутрискважинного компенсатора реактивной мощности (ВКРМ) для обеспечения минимального потребления мощно-

сти, а в работах [10–12] проведена оценка падений напряжения в системе «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» с ВКРМ с целью недопущения перенапряжения на вводах конденсаторов и предотвращения аварий, исследована устойчивость погружного двигателя и дана оценка стоимости владения УЭЦН внутрискважинным компенсатором [13]. Также в ходе эксплуатации УЭЦН коэффициент мощности, определяемый ПЭД, может снижаться до 0,6–0,75 при недогрузках, что увеличивает потребление реактивной мощности и потери активной.

Автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (АИН ШИМ) в составе СУ является источником несинусоидального напряжения в системе «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» электроснабжения куста нефтедобычи. Искажения формы кривой напряжения и тока приводит, как известно, к различным отрицательным последствиям. Увеличиваются потери мощности в двигателях, что приводит к снижению его КПД, к уточнению методик расчета двигателей из условия теплового перегрева [14, 15]. Увеличение потерь мощности в питающих кабельных линиях увеличивает нагрев жил и изоляции. Это приводит к уменьшению срока службы изоляции проводов и кабелей, диэлектриков конденсаторных установок. Несинусоидальность напряжения нарушает нормальную работу защиты, автоматики и связи, а также возможны появления резонансных явлений [16, 17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В программном комплексе Matlab/Simulink создана имитационная модель электропитания куста нефтедобычи, показанная на рис. 1, для исследования различных режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти при использовании устройства ВКРМ [18]:

На рис. 2 представлена блок-схема станции управления, являющаяся источником несинусоидальности напряжения.

Блок-схема состоит из выпрямителя, инвертора и системы управления инвертором

для необходимого изменения напряжения на выходе СУ [19].

Погружной асинхронный двигатель с параметрами, рассчитанными для модуля Asynchronous Machine при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0,84$: номинальная полная мощность $P_n = 107143$ ВА; номинальное линейное напряжение $U_n = 1800$ В; номинальная частота $f_n = 50$ Гц; активное сопротивление статора $R_s = 0,061$ о.е.; индуктивность рассеяния статора $LI_s = 0,0319$ о.е.; активное сопротивление ротора $R_r = 0,0275$ о.е.; индуктивность рассеяния ротора $LI_r = 0,0319$ о.е.; индуктивность

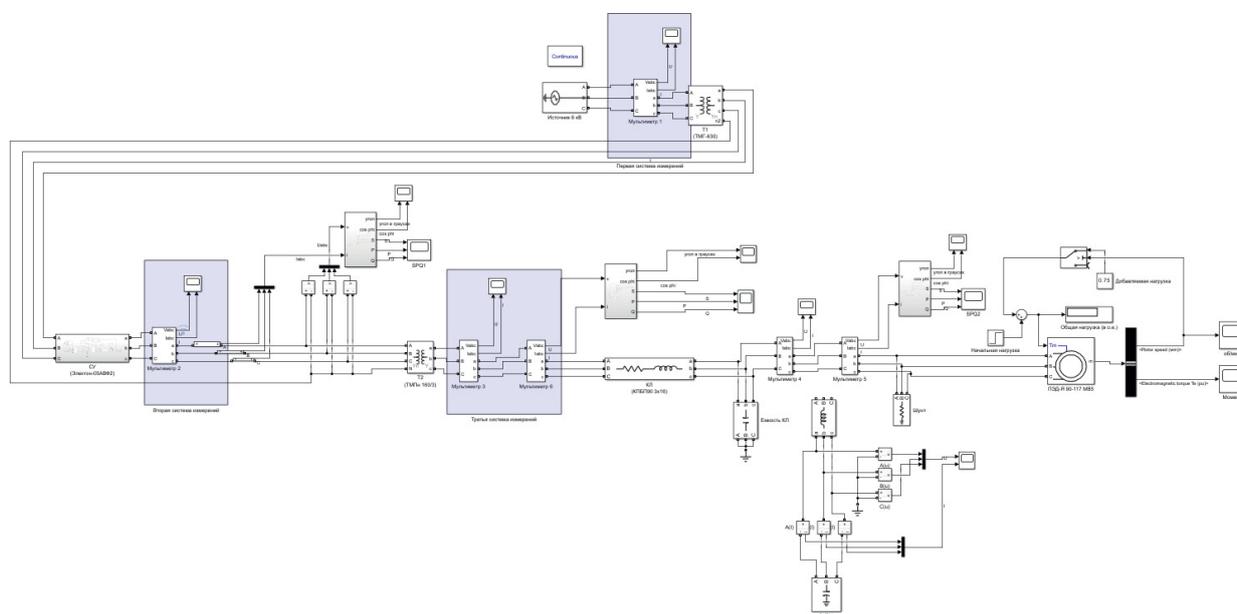


Рис. 1. Модель электропитания куста нефтедобычи

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

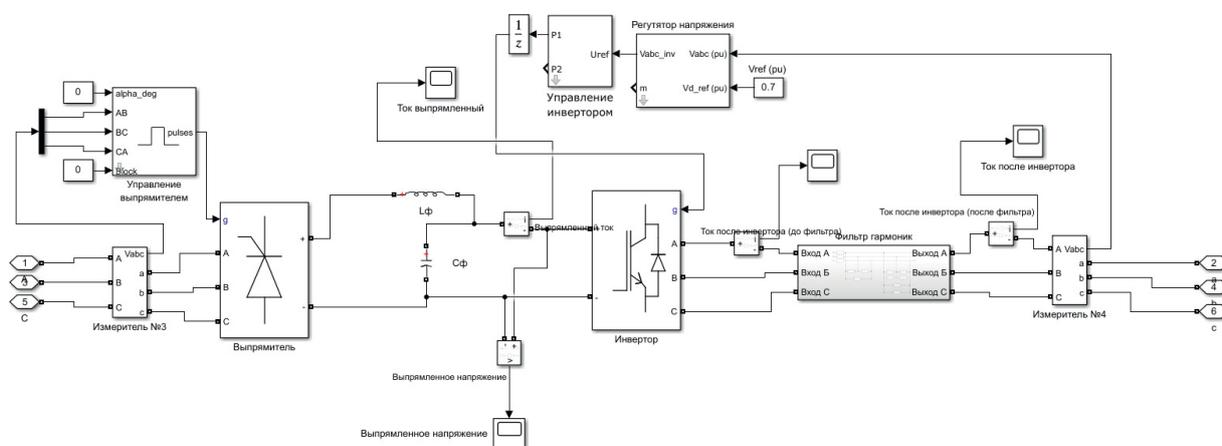


Рис. 2. Блок станции управления

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

цепи намагничивания $L_m = 1,4154$ о.е.; постоянная инерции $H = 0,2119$ с; коэффициент трения ротора $F = 0,05479$; число пар полюсов $p = 1$ – подключен к шинам промышленного трансформатора (Т2), параметры которых указаны в табл. 1. Для кабельной линии типа КПБП90 3x16 с погонным активным сопротивлением при 20 °С $r_0 = 1,15$ Ом/км; погонным индуктивным сопротивлением при 20 °С $x_0 = 0,0757$ Ом/км; погонной емкостью кабеля $c_0 = 0,1$ мкФ/км, длиной кабеля $l = 2,5$ км определены: $R = 2,875$ Ом; $L = 0,6024$ мГн; $C = 0,25$ мкФ – для заполнения модулей Three-Phase Transformer (Two Windings) и Three-Phase Series RLC Branch соответственно.

Коэффициенты трансформации ТМПн 160/3 (Т2) подбирались согласно номинальным ступеням трансформатора. При заполнении табл. 1 использовались каталожные данные и программа вычисления (Live Script) некоторых параметров в именованных и относительных единицах.

Для блока Asynchronous Machine при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0,72$ параметры рассчитаны аналогично: номинальная полная мощность $P_n = 125000$ ВА; номинальное линейное напряжение $U_n = 1800$ В; номинальная частота $f_n = 50$ Гц; активное сопротивление статора $R_s = 0,0537$ о.е.; индуктивность рассеяния статора $LI_s = 0,0372$ о.е.; активное сопротивление ротора $R_r = 0,0321$ о.е.; индуктивность рассеяния ротора

$LI_r = 0,0372$ о.е.; индуктивность цепи намагничивания $L_m = 1,2814$ о.е.; постоянная инерции $H = 0,2119$ с; коэффициент трения ротора $F = 0,05479$; число пар полюсов $p = 1$.

Управление погружным двигателем осуществляется станцией управления, состоящей из модулей, показанных на рис. 2. Блок-выпрямитель – Universal Bridge (Thyristors) с характеристиками: сопротивление снаббера (Snubber resistance, Ohm) $R_s = 10000$ Ом; емкость снаббера (Snubber capacitance, F) $C_s = \text{inf}$; активное сопротивление (Active resistance, Ohm) $R_{on} = 0,001$ Ом; индуктивность (Inductance, H) $L_{on} = 0$ Гн; падение напряжения (Forward voltage, V_f) $V_f = 0$ В. Блок-инвертор Universal Bridge (IGBT/Diodes) с характеристиками: сопротивление снаббера (Snubber resistance, Ohm) $R_s = 10000$ Ом; емкость снаббера (Snubber capacitance, F) $C_s = \text{inf}$; активное сопротивление (Active resistance, Ohm) $R_{on} = 0,001$ Ом; индуктивность (Inductance, H) $L_{on} = 0$ Гн; падение напряжения (Forward voltage, V_f и V_{fd}) $V_f = 0$ В, $V_{fd} = 0$ В. Также используются блоки управления выпрямителем и инвертором, которые настраиваются с помощью программы.

Объектом моделирования является сеть электроснабжения куста нефтедобычи, состоящая из источника питания 6 кВ частотой 50 Гц, понижающего трансформатора 6/0,4 кВ, СУ «Электрон-05АВФ2» с частотой ШИМ 2,5 кГц, технические характеристики которой представлены в табл. 2, кабельной линии, промыс-

Таблица 1

Значения параметров трансформаторов

Параметр	Ед. изм.	Значение		
		Т1 (ТМГ-630)	Т2 (ТМПн-160/3)	
Номинальная полная мощность	P_n	ВА	630000	160000
Напряжение первичной обмотки	V_1	В	6000	270
Напряжение вторичной обмотки	V_2	В	380	2100
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток	R_1, R_2	Ом/о.е.	0,3447/0,006	0,1869/0,00825
Индуктивность первичной и вторичной обмоток	L_1, L_2	мГн/о.е.	4,8826/0,0268	1,885/0,025
Активное сопротивление ветви намагничивания	R_m	кОм/о.е.	29,032/508,0645	8,2045/362,48
Индуктивность ветви намагничивания	L_m	Гн/о.е.	10,777/59,2218	5,2344/56,2155

Примечание: составлено авторами по источнику [20].

Технические характеристики СУ серии «Электрон-05АВФ2»

Параметр	Ед. изм.	Значение
Напряжение питающей сети	В	380 ± 15 %
Частота тока питающей сети	Гц	50
Выходное напряжение	В	0–380
Выходная частота	Гц	3,5–5 ± 0,1 %
Ток перегрузки (в течение 5 минут)	%	125
КПД при номинальном токе	–	≥ 0,95
Коэффициент мощности сети	–	≥ 0,95
Коэффициент нелинейных искажений выходных токов	%	≤ 5
Коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения	%	≤ 5
Индуктивность дросселей фильтра гармоник	мГн	0,119
Емкость конденсаторов фильтра гармоник	мкФ	50; 100

Примечание: составлено авторами по источнику [21].

лового трансформатора (повышающего с несколькими ступенями трансформации) и ПЭД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании установившегося режима работы участка сети «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» без ВКРМ установлено, что полученные модельные токи и напряжения находятся в хорошем приближении к параметрам, полученным в работе [7]. В ходе моделирования без СУ получено:

- линейное напряжение на ПЭД – $U_{\text{ПЭД}} = 1633 \text{ В}$; – фазный ток $I_{\text{ф}} = 45,3 \text{ А}$.

Расчеты режима с СУ показали следующие результаты:

- линейное напряжение на ПЭД – $U_{\text{АВ}} = 1770 \text{ В}$, $U_{\text{ВС}} = 1770 \text{ В}$, $U_{\text{СА}} = 1771 \text{ В}$;

- фазный ток $I_{\text{фА}} = 46,9 \text{ А}$, $I_{\text{фВ}} = 46,8 \text{ А}$, $I_{\text{фС}} = 46,9 \text{ А}$.

Станция управления является источником несинусоидальности и, как следствие, дополнительных гармонических составляющих напряжения и тока, что приводит к завышению их действующих значений, появлению мощности искажения, на которую затрачивается часть активной мощности, что является дополнительными потерями активной мощности.

Спектральный анализ на выходе СУ (второй системе измерений на рис. 1) проведен с 5-й по 9-ю секунду, а параметр Number of cycles в окне FFT Analyzer выставлен в 200 у.е. для всех систем (точек) измерения.

В ходе моделирования получен суммарный коэффициент гармонических составляющих

напряжения и тока (коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и тока) по каждой фазе: $K_{\text{УА}} = 4,58\%$, $K_{\text{УВ}} = 4,63\%$, $K_{\text{УС}} = 4,59\%$; $K_{\text{ИА}} = 2,93\%$, $K_{\text{ИБ}} = 2,99\%$, $K_{\text{ИС}} = 3,07\%$, что не превышает коэффициента нелинейных искажений выходных напряжений и токов, указанный в табл. 2 – технические характеристики СУ. Спектральный состав, полученный в ходе моделирования, не приводится, так как производитель подтверждает требования только на суммарные коэффициенты нелинейных искажений выходных токов и напряжений.

С целью повышения энергоэффективности сети электроснабжения куста нефтедобычи предлагается при установке ПЭД сразу подключать ВКРМ, а не только при снижении коэффициента мощности до уровня 0,72 и ниже. Такой способ установки повышает коэффициент мощности асинхронного двигателя с 0,84 до 0,95 в номинальном режиме эксплуатации и с 0,72 до 0,84 в режиме с низким коэффициентом мощности.

Необходимая реактивная мощность ВКРМ может быть найдена по известному выражению (1):

$$Q_{\text{ВКРМ}} = P_{\text{ПЭД}_{\text{ном}}} \cdot (\text{tg } \varphi_{\text{ПЭД}} - \text{tg } \varphi_{\text{тр}}) =$$

$$= P_{\text{ПЭД}_{\text{ном}}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{ПЭД}}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{тр}}} - 1} \right), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ВКРМ}}$ – реактивная мощность внутрискважинного компенсатора реактивной мощности, кВар; $\text{tg } \varphi_{\text{ПЭД}}$, $\text{tg } \varphi_{\text{тр}}$ – исходный коэффициент

реактивной мощности ПЭДа и требуемый коэффициент реактивной мощности сети соответственно; $\cos\varphi_{тр}$ – требуемый коэффициент мощности сети в месте подключения компенсирующего устройства.

Результаты моделирования установившегося режима работы участка сети «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» с установленным ВКРМ (неуправляемый) и коэффициентом мощности 0,84 показали, что суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения во 2-й системе измерений (на выходе станции управления) не превышают 5%

и при этом уменьшились – рис. 3, а тока в той же системе измерений также не превышают 5%, при этом увеличились – рис. 4 [8].

Результаты моделирования суммарных коэффициентов, гармонических составляющих напряжения и тока по каждой фазе при коэффициенте мощности 0,84:

- на ПЭД: $K_{UA} = 2,92\%$, $K_{UB} = 2,90\%$, $K_{UC} = 2,84\%$; $K_{IA} = 3,57\%$, $K_{IB} = 3,78\%$, $K_{IC} = 3,53\%$, с ВКРМ;

- на ВКРМ: $K_{UA} = 3,01\%$, $K_{UB} = 3,37\%$, $K_{UC} = 3,01\%$; $K_{IA} = 14,08\%$, $K_{IB} = 15,64\%$, $K_{IC} = 14,22\%$.

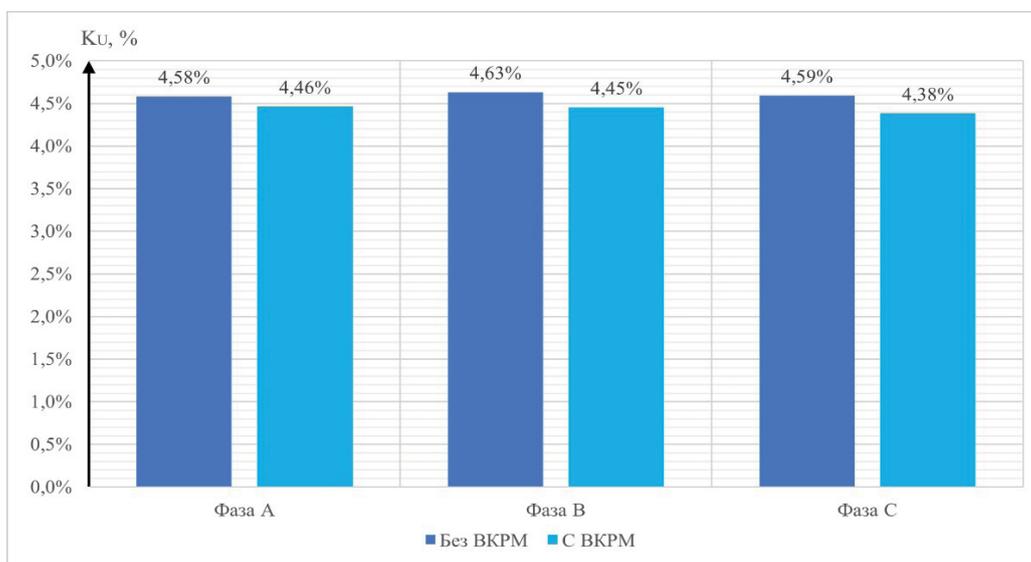


Рис. 3. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения на фазах 2-й системы измерений

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

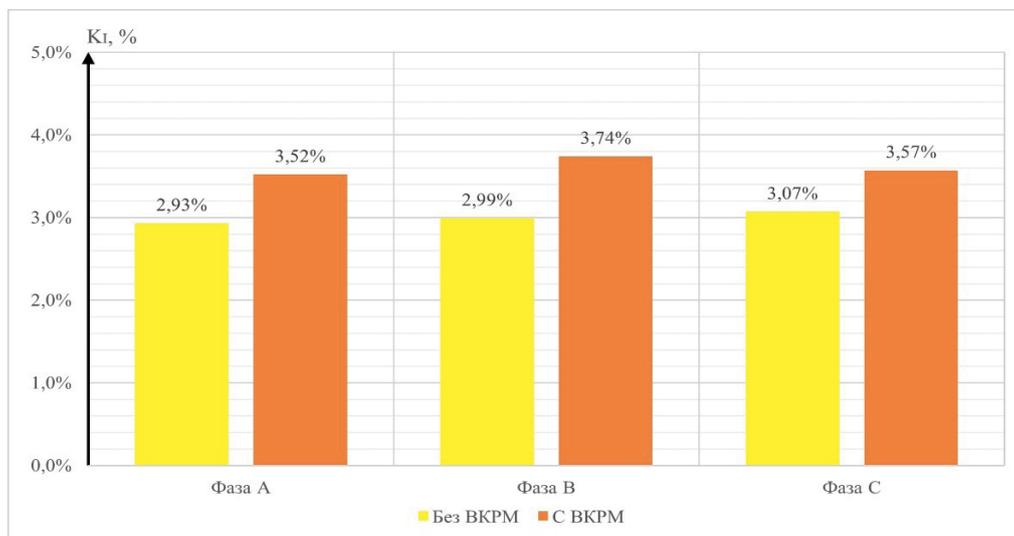


Рис. 4. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока на фазах 2-й системы измерений

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

Значения рассчитанных показателей показывают, что на погружном электродвигателе и установке ВКРМ K_U не превышают 5%, что соответствует допустимым значениям, определенным ГОСТ 32144-2013.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока по каждой фазе K_I погружного электродвигателя также не превышает 5%.

Значения показателя K_I на компенсаторе превышают 10%, но российский стандарт не накладывает ограничений на данный параметр. Обратим внимание, что американский стандарт IEEE Std 519 определяет предельные значения показателя K_I (TDD – total demand distortion – общее искажение по току) и 5% – одно из определяющих значений [22]. Поэтому следует обратить внимание на снижение показателя K_I на самом компенсаторе, так как загрузка высшими гармониками отрицательно влияет на изоляцию конденсатора, увеличивая $\text{tg}\delta$ – тангенс диэлектрических потерь и, следовательно, потери активной мощности.

Следующим шагом проведено моделирование установившегося режима работы того же участка сети с установленным ВКРМ и коэффициентом мощности 0,72 и проведен аналогичный анализ гармонических составляющих тока и напряжения. В результате получено, что суммарные коэффициенты гармониче-

ских составляющих напряжения на фазах во 2-й системе измерений уменьшились – рис. 5, а тока в той же системе измерений увеличились – рис. 6.

Коэффициенты гармонических составляющих по напряжению на фазах внутрискважинного компенсатора реактивной мощности увеличились: $K_{UA} = 3,84\%$; $K_{UB} = 4,48\%$; $K_{UC} = 4,01\%$ и току ($K_{IA} = 17,84\%$; $K_{IB} = 21,13\%$; $K_{IC} = 19,05\%$ – при снижении коэффициента мощности погружного электродвигателя. Также наблюдается небольшое увеличение гармонических составляющих напряжения ($K_{UA} = 3,12\%$; $K_{UB} = 3,15\%$; $K_{UC} = 3,03\%$) на фазах погружного электродвигателя. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока на погружном электродвигателе изменились (уменьшились) незначительно при снижении коэффициента мощности: при $\cos\varphi = 0,84$ $K_{IA} = 3,57\%$; $K_{IB} = 3,78\%$; $K_{IC} = 3,53\%$; при $\cos\varphi = 0,72$ $K_{IA} = 3,25\%$; $K_{IB} = 3,71\%$; $K_{IC} = 3,53\%$. При этом все значения показателей в исследуемых точках электрической сети не превышают 5%.

Программный комплекс Matlab/Simulink позволяет произвести расчет потерь активной мощности в кабельной линии при различных коэффициентах мощности с наличием ВКРМ и без него.

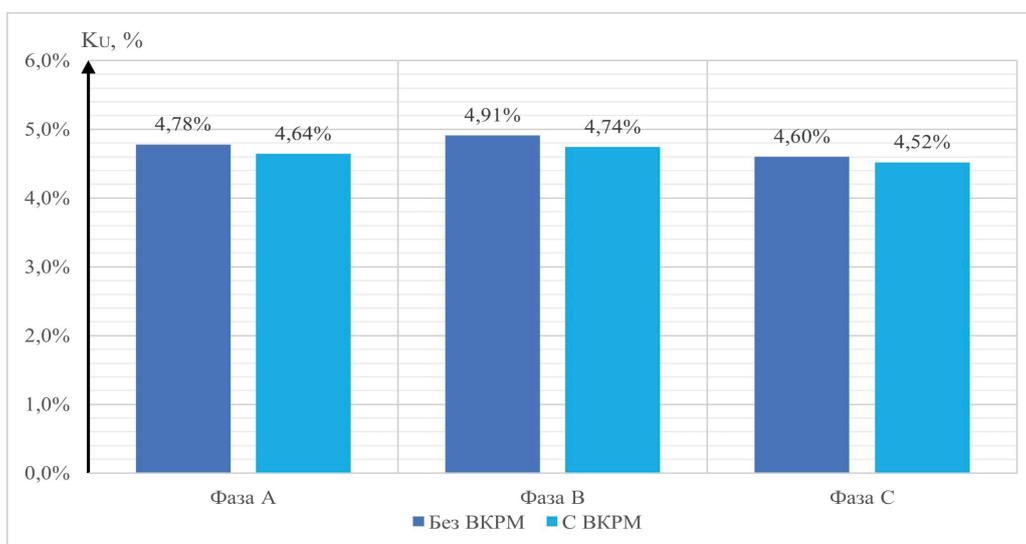


Рис. 5. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения на фазах 2-й системы измерений при коэффициенте мощности 0,72

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

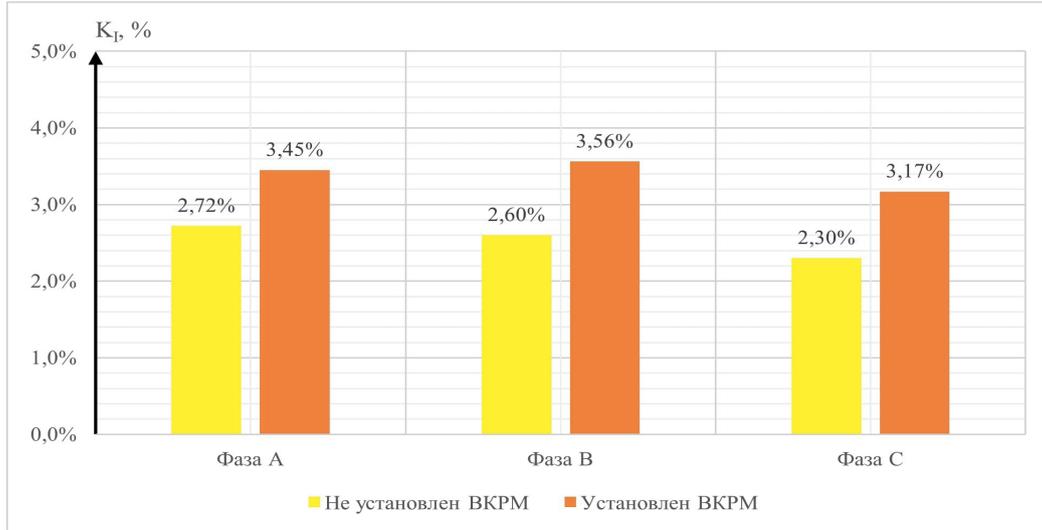


Рис. 6. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока на фазах 2-й системы измерений при коэффициенте мощности 0,72

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

Используя блок Power Measurement (Three-Phase) для определения мощности, найдем значения потерь мощности в кабельной линии с учетом n -х гармонических составляющих с номерами 2–18 и (2):

$$\Delta P_n = \sum I_n^2 \cdot \sqrt{n} \cdot R, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление жилы КЛ, Ом;

$\sum I_n^2$ – сумма квадратов действующего значения фазного тока n -й гармонической составляющей, А;

n – номер гармонической составляющей тока.

Результаты расчетов активной мощности в точках и потерь на участке «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» для различных коэффициентов мощности:

Для коэффициента мощности 0,84:

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора на основной гармонике: $P_{1(тр)} = 144300 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(тр)} = 140600 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора от кратных гармоник: $P_{n(тр)} = 23 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(тр)} = 25 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя на основной гармонике: $P_{1(ПЭД)} = 125100 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(ПЭД)} = 124800 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя от кратных гармоник: $P_{n(ПЭД)} = 4,9 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(ПЭД)} = 4,5 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности на основной гармонике 50 Гц: $\Delta P_1 = 19200 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_1 = 15800 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности от кратных гармоник: $\Delta P_n = 19 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_n = 20 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- полные потери активной мощности: $\Delta P_{\text{полн}} = 19219 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_{\text{полн}} = 15820 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной мощности ПЭД: $\delta P_n = 18\%$ – без ВКРМ, $\delta P_n = 15\%$ – с ВКРМ.

Для коэффициента мощности 0,72:

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора на основной гармонике: $P_{1(тр)} = 174400 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(тр)} = 169500 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора от кратных гармоник: $P_{n(тр)} = 26 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(тр)} = 32 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя на основной гармонике: $P_{1(ПЭД)} = 145500 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(ПЭД)} = 145200 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя от кратных гармоник:

$P_{n(\text{ПЭД})} = 5,3 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(\text{ПЭД})} = 4,8 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности на основной гармонике 50 Гц: $\Delta P_1 = 28900 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_1 = 24300 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности от кратных гармоник: $\Delta P_n = 21 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_n = 27 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- полные потери активной мощности: $\Delta P_{\text{полн}} = 28921 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_{\text{полн}} = 24327 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной мощности ПЭД: $\delta P_n = 23\%$ – без ВКРМ, $\delta P_n = 20\%$ – с ВКРМ.

Для уточнения потерь активной мощности в кабельной линии скважинного ПЭД воспользуемся (3), представляющей связь активного сопротивления с температурой окружающей среды:

$$R = R_0 [1 + \alpha (t(l) - 20)] , \quad (3)$$

где R – активное сопротивление жилы КЛ, Ом; R_0 – активное сопротивление жилы КЛ при 20 °С, Ом; $t(l)$ – температура окружающей среды как функция длины КЛ, °С; $\alpha = 0,0041$ – температурный коэффициент меди, °С⁻¹.

Экспериментальные измерения температуры вдоль ствола скважины показали, что на глубине ПЭД она может достигать 90 °С, интерполирование данных дает с хорошей точностью линейную зависимость $t(l) = A \cdot l$, где l – длина кабельной линии, м; A – геотермический градиент, значения которых для разных регионов добычи также приведены в [23]. Поэтому распределенную по длине температуру в первом приближении можно заменить средней арифметической температурой между температурами устья скважины – t_y и на глубине ПЭД – $t_{\text{нэд}}$ [23]:

$$t(l) \approx t_{cp} = \frac{t_y + t_{\text{нэд}}}{2}.$$

Таким образом в условиях данных по Тюменской области можно принять $t_y = 20$ °С, $t_{\text{нэд}} = 70$ °С и $t_{cp} = 45$ °С, а пересчитанное по формуле (3) сопротивление имеет значение

$$R = 3,1625 \text{ Ом}.$$

Результаты расчетов суммарных коэффициентов, гармонических составляющих на-

пряжения и тока по каждой фазе на ПЭД при коэффициенте мощности 0,84:

$K_{UA} = 3,70\%$, $K_{UB} = 3,75\%$, $K_{UC} = 3,71\%$;
 $K_{IA} = 2,89\%$, $K_{IB} = 2,96\%$, $K_{IC} = 2,88\%$, без ВКРМ; $K_{UA} = 2,93\%$, $K_{UB} = 2,92\%$, $K_{UC} = 2,87\%$;
 $K_{IA} = 2,77\%$, $K_{IB} = 2,94\%$, $K_{IC} = 2,55\%$, с ВКРМ; $K_{UA} = 3\%$, $K_{UB} = 3,26\%$, $K_{UC} = 3,01\%$;
 $K_{IA} = 13,99\%$, $K_{IB} = 15,18\%$, $K_{IC} = 14,29\%$ – на компенсаторе реактивной мощности.

Для коэффициента мощности 0,72:

$K_{UA} = 3,96\%$, $K_{UB} = 4,06\%$, $K_{UC} = 3,87\%$;
 $K_{IA} = 2,75\%$, $K_{IB} = 2,92\%$, $K_{IC} = 2,65\%$, без ВКРМ; $K_{UA} = 3,17\%$, $K_{UB} = 3,18\%$, $K_{UC} = 3,08\%$;
 $K_{IA} = 2,69\%$, $K_{IB} = 2,66\%$, $K_{IC} = 2,53\%$, с ВКРМ; $K_{UA} = 4\%$, $K_{UB} = 4,2\%$, $K_{UC} = 4,14\%$;
 $K_{IA} = 18,55\%$, $K_{IB} = 19,97\%$, $K_{IC} = 19,73\%$, на ВКРМ. Значения коэффициентов, измеренных на выходе СУ и промышленного трансформатора, не изменяются.

Уточненные потери активной мощности составляют для коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,84$:

- на основной гармонике $\Delta P_1 = 21400 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_1 = 17700 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- кратные гармоники $\Delta P_n = 13 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_n = 16 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 24\%$ – без ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 20\%$ – с ВКРМ;

- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,06\%$ – без ВКРМ;

- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,09\%$ – с ВКРМ;

$\cos\varphi = 0,72$:

- на основной гармонике $\Delta P_1 = 32600 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_1 = 27500 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- кратные гармоники $\Delta P_n = 18 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_n = 22 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 36\%$ – без ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 31\%$ – с ВКРМ;

- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,05\%$ – без ВКРМ;
- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,07\%$ – с ВКРМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная модель электроснабжения куста нефтедобычи с хорошей точностью определяет значения параметров электрического режима и, в частности, на участке «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД», что хорошо согласуется с экспериментальными данными и техническими характеристиками используемых устройств.

Проведенное моделирование в цифровой среде Matlab/Simulink установившихся режимов работы погружных электродвигателей для различных коэффициентов мощности показало, что коэффициенты нелинейных искажений выходного напряжения K_U и тока K_I моделируемой СУ согласуются с техническими данными станций управления, представленных на рынке, в частности рассмотренной «Электрон-05 АВФ2» с частотой ШИМ 2,5 кГц.

Установка ВКРМ не вносит заметных искажений питающего напряжения в системе «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД», а именно: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I остается ниже 5%, который определяется техническими условиями СУ. А значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U ВКРМ не превышает допустимых уровней, определенных ГОСТ 32144-2013.

При моделировании режима работы погружного электродвигателя с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,72$ сравнение результатов для $\cos\varphi = 0,84$ показывает, что установка ВКРМ незначительно изменяет коэффициенты искажения напряжения и тока, но их уровни не превышают 5%. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U на компенсаторе незначительно увеличивается, не превышая 5%, а коэффициент искажения синусоидальности кривой тока K_I увеличивается значительно – порядка 50%.

Также показано (без учета распределения температуры по длине КЛ), что на рассмотренном участке установка внутрискважинного компенсирующего устройства (неуправляемого) снижает потери активной мощности на основной гармонике тока. Потери активной мощности от кратных гармоник (до 18-й гармоники включительно) незначительно увеличиваются, при этом доля потерь от кратных гармоник пренебрежимо мала (сотые доли процента от суммарных потерь) как при использовании компенсатора, так и без него.

Таким образом, устройство ВКРМ не ухудшает в целом показатели качества электроэнергии, связанные с несинусоидальностью питающего напряжения, в системе «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД»; наблюдается снижение потерь активной мощности как в случае с низким коэффициентом мощности, так и с номинальным значением, повышает энергоэффективность работы внутрискважинного электрооборудования.

Список источников

1. Невоструев В. А. Опыт эксплуатации энергоэффективных УЭЦН «Новомет» // Инженерная практика. 2017. № 8. С. 28–32.
2. Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features // Electrical Submersible Pumps Manual. 2018. P. 55–152. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9>.
3. Якимов С. Б. Когда ПЭД с повышенным напряжением – основа стратегии. Нефтегазовая вертикаль. 2015. № 9. С. 19–22.
4. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2016. 456 с.

References

1. Nevostruev V. A. Opyt ekspluatatsii energoeffektivnykh UETSN “Novomet”. *Inzhenernaya praktika*. 2017;(8):28–32. (In Russ.).
2. Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features. *Electrical Submersible Pumps Manual*. 2018:55–152. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9>.
3. Yakimov S. B. Kogda PED с povyshennym napryazheniem – osnova strategii. *Neftegazovaya vertical*. 2015;(9):19–22. (In Russ.).
4. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. *Kachestvo elektroenergii: Guidelines for Calculations*. Moscow: ENAS; 2016. 456 p. (In Russ.).

5. Czarniecki L. S., Bhattarai P. D. A Method of calculating LC parameters of balancing compensators for AC arc furnaces // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32, no. 2. P. 688–695. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2536681>.
6. Смирнов О. В., Копырин В. А. К вопросу об использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2015. № 2. С. 68–70.
7. Копырин В. А., Иордан В. А., Смирнов О. В. Внутрискважинная компенсация реактивной мощности // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2015. № 1. С. 29–32.
8. Копырин В. А., Гара Н. В., Портнягин А. Л. и др. Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности: патент 145053 Рос. Федерация № 2014116437; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.09.2014. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38363331_65216958.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
9. Копырин В. А. Погружной компенсатор реактивной мощности: патент 159860 Рос. Федерация № 2015140690; заявл. 23.09.2015; опубл. 20.02.2016. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37564046_33904549.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
10. Копырин В. А., Смирнов О. В. Оптимизация режимов потребления реактивной мощности установками электроцентробежных насосов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 4. С. 450–458.
11. Копырин В. А., Смирнов О. В., Портнягин А. Л. и др. Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 9. С. 117–124.
12. Копырин В. А., Лосев Ф. А. Исследование устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при использовании внутрискважинного компенсатора // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 1. С. 390–398.
13. Копырин В. А., Хамитов Р. Н., Глазырин А. С. и др. Оценка совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 2. С. 166–175.
14. Karimjonov D. D. Research of asymmetrical and nonsinusoidal currents of asynchronous motor reactive power // *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2023. Vol. 126. P. 345–351. <https://doi.org/10.15863/TAS>.
15. Majumder R., Saha D., Biswas P. et al. Modeling, simulation and FFT based dynamic performance analysis of three phase asynchronous // *International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering*. 2022. Vol. 9, no. 6. P. 7–11.
5. Czarniecki L. S., Bhattarai P. D. A Method of calculating LC parameters of balancing compensators for AC arc furnaces. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(2):688–695. <http://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2536681>.
6. Smirnov O. V., Kopyrin V. A. On the issue of using downhole reactive power compensators. *Oil and Gas Studies*. 2015;(2):68–70. (In Russ.).
7. Kopyrin V. A., Iordan V. A., Smirnov O. V. Downhole reactive power compensation. *Oil and Gas Studies*. 2015;(1):29–32. (In Russ.).
8. Kopyrin V. A., Gara N. V., Portnyagin A. L. et al. Downhole reactive power compensator: RU patent 145053 No. 2014116437; filed April 23, 2014; issued September 10, 2014. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38363331_65216958.pdf (accessed: 10.10.2024). (In Russ.).
9. Kopyrin V. A. Submersible reactive power compensator: RU patent 159860 No. 2015140690; filed September 23, 2015; issued February 20, 2016. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37564046_33904549.pdf (accessed: 10.10.2024). (In Russ.).
10. Kopyrin V. A., Smirnov O. V. Optimisation of reactive power consumption regimes by the electric centrifugal pumps installations. *Izvestiya Tula State University*. 2018;(4):450–458. (In Russ.).
11. Kopyrin V. A., Smirnov O. V., Portnyagin A. L. et al. Influence of downhole compensator on voltage drop in elements of a production well electrical system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(9):117–124. (In Russ.).
12. Kopyrin, V. A., Losev F. A. The stability research of the submersible asynchronous electric motor with downhole compensator. *Izvestiya Tula State University*. 2018;(1):390–398. (In Russ.).
13. Kopyrin V. A., Khamitov R. N., Glazyrin A. S. et al. Evaluation of total cost of possessing the electric centrifugal pump with submersible compensator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(2):166–175. (In Russ.).
14. Karimjonov D. D. Research of asymmetrical and nonsinusoidal currents of asynchronous motor reactive power. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2023;126:345–351. <http://doi.org/10.15863/TAS>.
15. Majumder R., Saha D., Biswas P. et al. Modeling, simulation and FFT based dynamic performance analysis of three phase asynchronous machine. *International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering*. 2022;9(6):7–11.
16. Abdullaev A., Nasretdinova F., Yoldoshova M. et al. Power loss due to the effect of high harmonics in asynchronous engines. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022;(12):1–5. <http://doi.org/10.32743/Uni-Tech.2022.105.12.14732>. (In Russ.).
17. Kumar S. J., Sreenivas G. N. Reduction of current harmonics using active power filters by instantaneous reactive power theory. *International Advanced Re-*

16. Abdullaev A., Nasretidinova F., Yoldoshova M. et al. Power loss due to the effect of high harmonics in asynchronous engines // *Universum: технические науки*. 2022. No. 12. P. 1–5. <http://doi.org/10.32743/Uni-Tech.2022.105.12.14732>.
17. Kumar S. J., Sreenivas G. N. Reduction of current harmonics using active power filters by instantaneous reactive power theory // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2022. Vol. 9, no. 2. P. 638–644. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2022.9296>.
18. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
19. Ankit K. J., Gutta K. C., Vaddi A. K. Modeling and simulation of frequency converter used in speed control of asynchronous motor // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013. Vol. 3, no. 4. P. 1–6.
20. Трансформаторы ТМГ 630 10(6)/0,4 кВ. Эл-кабтранс. URL: <https://elkabtrans.ru/catalog/tmg/tmg-630-10-6-0-4-kv/?oid=555> (дата обращения: 22.10.2024).
21. Станция управления Электон – 05. Руководство по эксплуатации. URL: <https://www.petromarkt.ru/userfls/files/elekton-05.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
22. IEEE Std 519 – 2014 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf (дата обращения: 22.10.2024).
23. Хакимьянов М. И. Исследование потерь мощности в кабеле скважинного погружного электродвигателя // *Электротехника*. 2018. № 2. С. 36–39.
- search *Journal in Science, Engineering and Technology*. 2022;9(2):638–644. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2022.9296>.
18. Chernykh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink. Moscow: DMKPress; 2007. 288 p. (In Russ.).
19. Ankit K. J., Gutta K. C., Vaddi A. K. Modeling and simulation of frequency converter used in speed control of asynchronous motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013;3(4):1–6.
20. Transformatory TMG 630 10(6)/0,4 kV. Elkabtrans. URL: <https://elkabtrans.ru/catalog/tmg/tmg-630-10-6-0-4-kv/?oid=555> (accessed: 22.10.2024). (In Russ.).
21. Stantsiya upravleniya Elekton – 95. Manual, 2004. URL: <https://www.petromarkt.ru/userfls/files/elekton-05.pdf> (accessed: 10.10.2024). (In Russ.).
22. IEEE Std 519 – 2014 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf (accessed: 22.10.2024).
23. Khakimyanov M. I. Issledovanie poter moshchnosti v kabele skvazhinного погружного электродвигателя. *Elektrotehnika*. 2018;(2):36–39. (In Russ.).

Информация об авторах

Д. П. Антипин – старший преподаватель.

М. Е. Овчаренко – студент.

А. А. Заруднев – студент.

About the authors

D. P. Antipin – Senior Lecturer.

M. E. Ovcharenko – Student.

A. A. Zarudnev – Student.

Научная статья
УДК 004.81:58
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-2>



Предсказание признаков растений для моделирования экосистем: комбинированная модель на основе изображений и вспомогательных данных

Валентин Валерьевич Брыкин¹, **Сергей Олегович Крамаров²**, **Адриан Гросу³**

^{1, 2, 3}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹valentin.brykin@mail.ru

²maoovo@yandex.ru

³grosu_a@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5520-6708>

Аннотация. В данной работе представлена комбинированная модель машинного обучения для предсказания признаков растений. Модель объединяет предобученную сверточную нейронную сеть (CNN) со вспомогательными переменными, представленными в виде табличных данных (CSV). Цель исследования – повысить точность предсказания признаков растений, используя как визуальную информацию, так и контекстные данные.

Модель обучалась на наборе данных, состоящем из 9147 изображений растений и соответствующих 167 вспомогательных переменных. Изображения были предобработаны с помощью трех предварительно обученных архитектур сверточных нейронных сетей (InceptionV3, ResNet, VGG19), а дополнительные данные были объединены с помощью слоя concatenate после выпрямления выходов вышеперечисленных CNN. Модель была оптимизирована с использованием алгоритма Adam и оценена соответствующими метриками.

Результаты показали превосходство совмещенной модели над базовой CNN в предсказании признаков растений, что подтверждает эффективность использования дополнительных данных для повышения качества работы. Исследование демонстрирует потенциал гибридных моделей машинного обучения для анализа данных о растениях, полученных от пользователей со всего мира.

Ключевые слова: комбинированная модель, извлечение признаков, изображения растений, регрессия, экосистемы

Для цитирования: Брыкин В. В., Крамаров С. О., Гросу А. Предсказание признаков растений для моделирования экосистем: комбинированная модель на основе изображений и вспомогательных данных // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 18–24. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-2>.

Original article

Plant traits prediction for ecosystem modeling: Combined model based on images and auxiliary data

Valentin V. Brykin¹, **Sergey O. Kramarov²**, **Adrian Grosu³**

^{1, 2, 3}Surgut State University, Surgut, Russia

¹valentin.brykin@mail.ru

²maoovo@yandex.ru

³grosu_a@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5520-6708>

Abstract. The study presents a combined machine learning model for predicting plant traits. The model combines a pre-trained convolutional neural network (CNN) with auxiliary variables represented as comma-separated values (CSV). The aim of the study is to improve the accuracy of plant trait prediction using both visual information and contextual data.

The model is trained on a dataset consisting of 9,147 plant images and the corresponding 167 auxiliary variables. The images are preprocessed using three pre-trained convolutional neural network architectures (InceptionV3, ResNet, VGG19). The supplementary data are combined using a concatenate layer after directing the outputs of the above CNNs. The model is optimized using the Adam algorithm and evaluated with appropriate metrics.

The results show the superiority of the combined model over the baseline CNN in predicting plant traits, confirming the effectiveness of using supplementary data to improve performance. The study demonstrates the potential of hybrid machine learning models to analyze plant data from users around the world.

Keywords: combined model, trait extraction, images of plants, regression, ecosystems

For citation: Brykin V. V., Kramarov S. O., Grosu A. Plant traits prediction for ecosystem modeling: Combined model based on images and auxiliary data. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):18–24. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-2>.

ВВЕДЕНИЕ

Биоразнообразие является базисом устойчивого развития нашей планеты, обеспечивающим экологическую стабильность и поддерживающим биологические ресурсы. Извлечение признаков растений, именуемых plant traits (например, высоты растения, плотности его стебля или площади листьев), является очень важным моментом для изучения экосистем и прогнозирования их реакции на изменения окружающей среды. Еще большую актуальность этот вопрос приобретает в контексте глобального изменения климата, оказывающего значительное влияние на функционирование экосистем. Отсутствие достаточных данных о признаках растений является серьезным ограничением для моделирования экосистем и предсказания их будущего поведения [1–4].

В этой статье исследуется современный подход к извлечению признаков растений из изображений, сделанных пользователями со всего мира. Метод основан на использовании так называемой комбинированной модели, сочетающей сверточные нейронные сети (CNN) со вспомогательными переменными. CNN-блок используется для извлечения визуальных признаков из изображений, а вспомогательные переменные (в частности, информация о климате, почве, местоположении) предоставляют контекстную информацию. Логично, что совмещение этих двух источников информации позволит повысить точность предсказания признаков растений.

Таким образом, основная цель работы – демонстрация эффективности комбинирования моделей машинного обучения.

Работа с исходными данными и моделью машинного обучения выполнялась на языке Python с использованием соответствующих библиотек и документации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комбинированный алгоритм

Алгоритм основан на симбиозе двух подходов машинного обучения: извлечении признаков из фотографий сверточной нейронной сетью и нелинейной регрессии с использованием вспомогательных данных. Этот подход отражает принципы многомодального моделирования (обработка информации разной природы – изображения, переменные), способствующего улучшению качества работы. Кроме того, предобученная CNN играет роль «слабого учителя», уже обладающего знаниями о распознавании образов, тогда как гибридная модель дополнительно обучается на специфических данных о plant traits, что делает ее «сильным учителем», обладающим большей точностью [5].

Общий порядок действий алгоритма представлен в схеме на рис. 1.

Этапы подготовки и предварительной обработки данных

Исходные данные приведены на рис. 2 и 3 и представляют собой два набора информации разных модальностей: более 9000 цветных цифровых изображений растений разных видов.

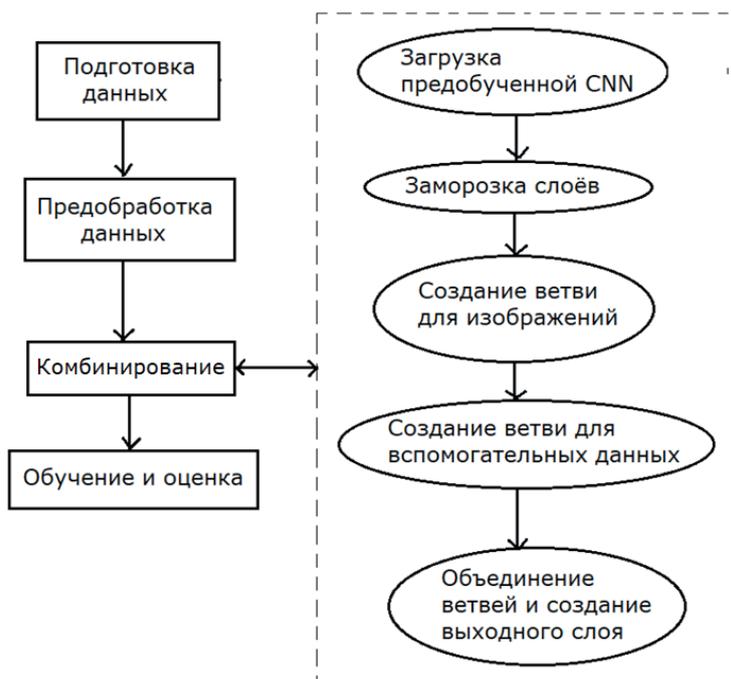


Рис. 1. Схема алгоритма комбинирования
 Примечание: составлено авторами.



Рис. 2. Исходные данные (изображения)

Примечание: составлено авторами по источнику [6].

Изображения были предварительно подготовлены – приведены к единому размеру 224×224 пикселя и нормализованы в диапазоне от 0 до 1 (путем деления значения яркости каждого пикселя на 255 – максимальный показатель для 8-битной глубины цвета).

Вспомогательные переменные в *CSV-файле* для каждого изображения представляют собой вектор из 167 значений, где:

- значение *id* – уникальный идентификатор, а также префикс имени изображения (для связи мультимодальных данных);
- 6 значений *WORLDCLIM_BIO* – климатические переменные;
- 62 значения *SOIL* – переменные почвы;
- 96 значений *MODIS/VOD* – многовременные спутниковые переменные;
- 3 значения *X [*]* – целевые признаки plant traits, которые необходимо предсказать

	id	WORLDCLIM_BIO1_annual_mean_temperature	WORLDCLIM_BIO12_annual_precipitation
0	194715823	16.682079	283.183685
1	194172209	16.196875	498.750000
2	195910605	12.781527	1653.897949
3	194088633	19.231449	1142.380981
4	178419036	0.962713	1418.734741
...
9142	190581683	3.172599	1090.766724
9143	196623053	24.213839	1382.821411
9144	189605934	0.340694	1149.900024
9145	189425745	19.283831	207.538101
9146	187853106	-7.709722	321.004761

9147 rows × 167 columns

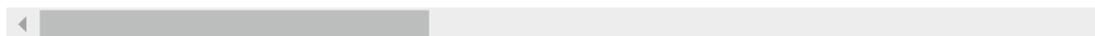


Рис. 3. Исходные данные (вспомогательные переменные в датафрейме)

Примечание: составлено авторами по источнику [6].

(извлечь): X_{11} – площадь листьев, X_{18} – высота растения, X_{26} – сухая масса семян [6, 7].

Для улучшения производительности модели эти данные были также нормализованы [8].

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}. \quad (1)$$

В выражении (1):

x' – нормализованное значение признака;

x – исходное значение признака;

x_{min} – минимальное значение всех x ;

x_{max} – максимальное значение всех x .

Кроме того, строковые значения id были приведены к числовому типу int .

Данные на рис. 2 и 3 были загружены с общедоступного ресурса по исследованию данных Kaggle.

Этап создания комбинированной модели

В качестве основы для извлечения визуальных признаков было использовано несколько предварительно обученных архитектур CNN: InceptionV3, ResNet50, VGG19. Все они были обучены на большом наборе изображений ImageNet.

Крайний слой каждой из моделей был исключен ввиду иной выполняемой задачи – классификации. Для сохранения «знаний»,

полученных при предварительном обучении сети, их оставшиеся слои были подвергнуты «заморозке». Это предотвратит изменение весов в слоях CNN при обучении объединенных моделей задаче регрессии [9].

Данные на выходе CNN-моделей имеют вид 4-мерного тензора в формате

$$V_{4d} = \{b \times m \times n \times k\}, \quad (2)$$

где:

b – размер батча;

m – высота тензора;

n – глубина тензора;

k – количество каналов.

Для успешного комбинирования модели на вход регрессионного блока должен поступать одномерный тензор формата:

$$V_{1d} = \{1 \times (b \times m \times n \times k + f)\}, \quad (3)$$

где f – число признаков после обработки вспомогательных переменных.

Следовательно, возникает необходимость конвертирования тензора (2) в тензор (3). Выполняется данное действие благодаря применению Flatten-слоя выпрямления.

Из выражения (3) понятно, что после выпрямления тензора (2) выполняется операция конкатенации по числу признаков.

Таким образом, ветвь изображений представляет собой замороженную предобученную сверточную модель со скорректированным внешним слоем.

Принцип работы комбинированной (совмещенной, гибридной) модели представлен на рис. 4.

Параметры обучения моделей приведены в табл. 1.

Метрики, использованные для оценки работы моделей:

Средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |y_{i,j} - \hat{y}_{i,j}|. \quad (4)$$

Среднеквадратичная ошибка:

$$MSE = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (y_{i,j} - \hat{y}_{i,j})^2. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (y_{i,j} - \hat{y}_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (y_{i,j} - \bar{y}_j)^2}. \quad (6)$$

В выражениях (4), (5), (6):

N – количество наблюдений (по числу изображений $N = 9147$);

M – количество целевых переменных (в данной работе $M = 3$);

– фактическое значение j -й целевой переменной для i -го наблюдения;

– предсказанное значение j -й целевой переменной для i -го наблюдения;

– среднее значение j -й целевой переменной.

Значение коэффициента детерминации не может превышать 1. Нижний порог неограничен, но отрицательное значение свидетельствует о неработоспособности модели в контексте решаемой задачи [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для доказательства эффективности сочетания сверточной и регрессионной частей результаты извлечения признаков приведены в двух таблицах. В табл. 2 – метрики оценки, обученных задаче регрессии сверточных сетей. В табл. 3 – метрики оценки гибридных моделей с многослойным персептроном в роли нелинейной регрессии.

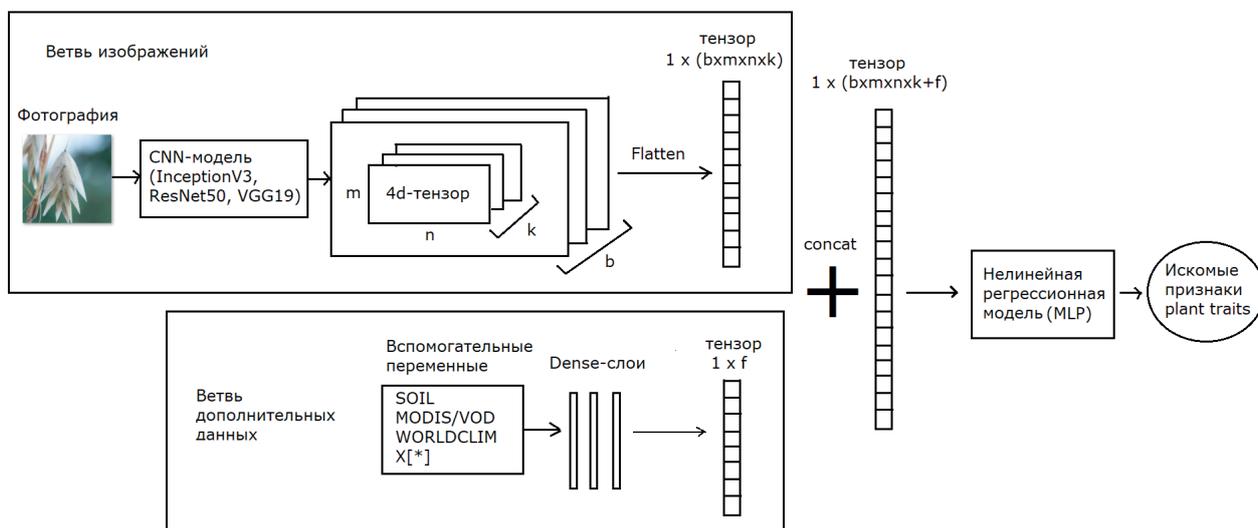


Рис. 4. Функционирование комбинированной модели

Примечание: составлено авторами.

Таблица 1

Характеристики обучения моделей

Оптимизатор/скорость обучения	Adam/0.001
Функция потерь	MSE
Количество эпох	10
Размер батча	32

Примечание: составлено авторами.

Таблица 2

Оценка мономодальных сверточных моделей

Архитектура/Метрика	InceptionV3	ResNet50	VGG19
MAE	157,5	106,9	677,1
MSE	22301,2	14301,4	214982
R ²	0,1	0,14	-2,67

Примечание: составлено авторами.

Таблица 3

Оценка многомодальных комбинированных моделей

Архитектура/Метрика	InceptionV3 + MLP	ResNet50 + MLP	VGG19 + MLP
MAE	98,7	69,9	332,2
MSE	10323,5	5770,1	94223,4
R ²	0,29	0,39	-0,95

Примечание: составлено авторами.

Из табл. 2 и 3 видно, что модель VGG-19 не подходит для исходного набора данных, скорее всего, ввиду архитектурной простоты – коэффициент детерминации отрицателен. В целом невысокое значение R^2 в таблицах объясняется большой сложностью набора исходных данных. Тем не менее эффективность рассматриваемого подхода гибридизации очевидна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен перспективный подход совмещения мультимодальных данных на примере сочетания моделей машинного обучения разной природы. Подтверждена его эффективность в решении задачи определения

признаков растений plant traits: результаты показали, что объединение преимуществ сверточных сетей (CNN) для обработки изображений и регрессионных моделей для интеграции вспомогательных данных позволяет улучшить показатели качества обучения – уменьшить величины MAE, MSE и увеличить.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование данного метода и могут включать оптимизацию гиперпараметров каждой из составляющих комбинированной модели, борьбу с переобучением, изучение исходных данных на предмет корреляции признаков и целевых переменных, а также ансамблирование.

Список источников

1. Демидчик В. В., Шашко А. Ю., Бондаренко В. Ю. и др. Феномика растений: фундаментальные основы, программно-аппаратные платформы и методы машинного обучения // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 3. С. 227–245.
2. Гончаров С. В. Цифровое фенотипирование растений в ботанических садах // Наследие академика Н. В. Цицина: ботанические сады. Отдаленная гибридизация растений и животных : материалы Всерос. науч. конф. 03–07 июля 2023 г., г. Москва. Воронеж : Воронежский ГАУ имени Императора Петра I, 2023. С. 62–64.
3. Покровская Я. К., Каюгина С. М. Перспективы использования искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Достижения молодежной науки для агропромышленного комплекса : сб. материалов LVI науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 14–18 марта 2022 г., г. Тюмень. Тюмень : ГАУ Северного Зауралья, 2022. Т. 1, ч. 4. С. 350–358.

References

1. Demidchik V. V., Shashko A. Y., Bandarenka U. Y. et al. Plant phenomics: fundamental bases, software and hardware platforms, and machine learning. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2020;67(3):227–245. (In Russ.).
2. Goncharov S. V. Digital phenotyping of plants in botanic gardens. In: *Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation "Nasledie akademika N. V. Tsitsina: botanicheskie sady. Otdalennaya gibrizatsiia rastenii i zhivotnykh"*, July 3–7, 2023, Moscow. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great; 2023. p. 62–64. (In Russ.).
3. Pokrovskaya Ya. K., Kayugina S. M. Perspektivy ispolzovaniya iskusstvennogo intellekta v selskom khozyaystve. In: *Proceedings of 56th Research-to-practice conference of students, postgraduates and young scientists "Dostizheniya molodezhnoy nauki dlya agropromyshlennogo kompleksa"*, March 14–18, 2022, Tyumen. Tyumen: Northern Trans-Ural State

4. Мишуров Н. П., Чавыкин Ю. И., Моторин О. А. Цели и задачи искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Управление рисками в АПК. 2021. № 3. С. 39–49.
 5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. / пер. с англ. Н. Н. Кукуль. М.: Изд. дом «Вильямс», 2016. 1104 с.
 6. PlantTraits2024 – FGVC11. URL: <https://www.kaggle.com/competitions/planttraits2024> (дата обращения: 13.09.2024).
 7. Ковалев А. В., Исаева А. С. Оценка качества семян пшеницы с использованием сверточной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12. С. 206–215.
 8. Предварительная обработка данных. URL: <https://scikit-learn.ru/> (дата обращения: 25.09.2024).
 9. Сабитов Б. Р., Сейтказиева Н. С. Методы компьютерного зрения в задачах прогнозирования болезней растений с использованием трансферного обучения // Проблемы автоматизации и управления. 2022. № 3. С. 135–144.
 10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer-Verlag, 2009. 746 p.
- Agricultural University, 2022. Vol. 1, pt. 4. p. 350–358. (In Russ.).
 4. Mishurov N. P., Chavykin Yu. I., Motorin O. A. Goals and objectives of artificial intelligence in agribusiness. *Agricultural Risk Management*. 2021;(3):39–49. (In Russ.).
 5. Khaykin S. Neural networks: full course. 2nd ed. N. N. Kussul, trans. Moscow: Izd. dom “Vilyams”, 2016. 1104 p.
 6. PlantTraits2024 – FGVC11. URL: <https://www.kaggle.com/competitions/planttraits2024> (accessed: 13.09.2024).
 7. Kovalev A. V., Isaeva A. S. Wheat seed quality assessment based on convolutional neural network algorithm. *Engineering Journal of Don*. 2021;(12):206–215. (In Russ.).
 8. Predvaritelnaya obrabotka dannykh. URL: <https://scikit-learn.ru/> (accessed: 25.09.2024). (In Russ.).
 9. Sabitov B. R., Seytkazieva N. S. Metody kompyuternogo zreniya v zadachakh prognozirovaniya bolezney rasteniy s ispolzovaniem transfernogo obucheniya. *Problemy avtomatiki i upravleniya*. 2022;(3):135–144. (In Russ.).
 10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. Springer-Verlag; 2009. 746 p.

Информация об авторах

В. В. Брыкин – аспирант.

С. О. Крамаров – доктор физико-математических наук, профессор.

А. Гросу – аспирант.

About the authors

V. V. Brykin – Postgraduate.

S. O. Kramarov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor.

A. Grosu – Postgraduate.

Научная статья
УДК 004.415.2.031.43
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-3>

Нейросетевая система видеонаблюдения

Никита Евгеньевич Василенко¹, **Наталья Александровна Медведева²**

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

¹vasilenko_ne@edu.surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7880-1026>

²medvedeva_na@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9379-718X>

Аннотация. Целью представленной работы является разработка и внедрение эффективной и доступной по цене автоматической системы видеонаблюдения, способной работать в режиме реального времени и интегрироваться с существующими системами видеонаблюдения. Представленный метод включает в себя анализ существующих на рынке решений, выбор и обучение модели глубокого обучения для обнаружения предметов, разработку пользовательских интерфейсов, контейнеризацию приложения и тестирование системы в реальных условиях. Результатом работы стала система, способная обнаруживать интересующие объекты в режиме реального времени с помощью нейронных сетей и уведомлять пользователя об обнаружении. Система предназначена для использования в общественных местах, таких как аэропорты, вокзалы, школы и другие учреждения, требующие повышенной безопасности.

Ключевые слова: информационная система, искусственные нейронные сети, распознавание образов

Для цитирования: Василенко Н. Е., Медведева Н. А. Нейросетевая система видеонаблюдения // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 25–33. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-3>.

Original article

Neural network surveillance system

Nikita E. Vasilenko¹, **Natalya A. Medvedeva²**

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

¹vasilenko_ne@edu.surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7880-1026>

²medvedeva_na@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9379-718X>

Abstract. The purpose of the paper is to design and implement an efficient and affordable automatic surveillance system, which can operate in real time and integrate with existing surveillance systems. The method presented includes analyzing existing solutions on the market, selecting and training a profound learning model for objects detection, developing user interfaces, containerizing of the application and testing the system in a real-world environment. The result is a system capable of detecting objects of interest in real time using neural networks and notifying the user of the detected items. This system is designed for public places like airports, railway stations, schools, and other institutions needing enhanced security.

Keywords: information system, artificial neural networks, pattern recognition

For citation: Vasilenko N. E., Medvedeva N. A. Neural network surveillance system. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):25–33. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-3>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка видеосистем автоматического обнаружения предметов, входящих в область интересов, имеет критическое значение в контексте обеспечения общественной безопасности [1, 2]. Такие системы обещают значительно улучшить реакцию на потенциальные угрозы и инциденты, предотвращая их возникновение или минимизируя их последствия. Однако существует ряд проблем, связанных с трудностями внедрения, установки, конфигурации и обслуживания подобных систем.

При разработке системы использовались современные методы машинного обучения и искусственного интеллекта, подходы к созданию веб- и десктоп-приложений, а также данные о существующих решениях на рынке. Были проанализированы различные подходы к видеоаналитике и детектированию объектов, такие как алгоритм YOLO и методы сверточных нейронных сетей.

Актуальность работы обусловлена ростом глобальных угроз, таких как преступность и несанкционированные действия, а также возрастающими требованиями к общественной и частной безопасности. Интеграция современных алгоритмов глубокого обучения в систему, способную работать в реальном времени и предоставлять высокую точность обнаружения обещает дать толчок в развитии, как таких систем, так и всей сферы безопасности в целом.

Существуют решения, разработанные такими компаниями, как Videonet, ZeroEyes, Athena Security, Actuate и NtechLab, которые также направлены на улучшение безопасности с использованием видеоаналитики и искусственного интеллекта.

После анализа этих решений можно выделить ряд их недостатков:

1. Закрытость кода: все продукты компаний, кроме NtechLab, которые показали достоинства их алгоритма, не предоставляют доступ к исходному коду, ограничивая возможности развития, кастомизации и интеграции под специфические потребности.

2. Высокая стоимость лицензирования, поддержки и обновлений делают такие системы недоступными для многих организаций, не говоря о персональном использовании.

3. Сложность интеграции с существующими системами безопасности из-за возможной несовместимости или отсутствия необходимых интерфейсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проектировании системы была выбрана модель YOLO («You Only Look Once») [3–6] для задачи обнаружения предметов в реальном времени, что обусловлено рядом причин (рис. 1).

Прежде всего, эта модель представляет собой эффективную архитектуру нейронной сети, в которой входное изображение разби-

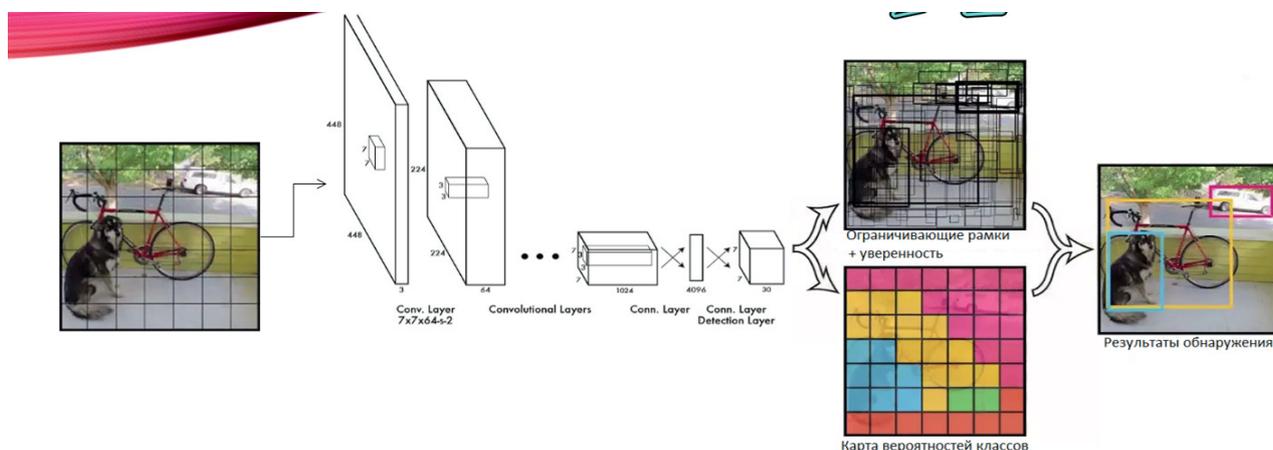


Рис. 1. Принцип работы алгоритма YOLO

Примечание: составлено авторами по [3].

вается на сетку, и каждая ячейка сетки отвечает за обнаружение объектов в своей области.

Параметры этих ячеек (рис. 2) в виде векторов [7] являются выходным результатом работы модели, в основе которой лежит принцип сверточной нейронной сети.

Для получения предсказаний модели, изображению требуется пройти через нее всего один раз. Это отличает алгоритм YOLO от других алгоритмов обнаружения объектов и позволяет выполнять инференс с высокой скоростью (рис. 3), что очень важно для си-

стемы, работающей в режиме реального времени.

Установка необходимых библиотек, импортирование модели, установка датасета, обучение модели и экспорт файла весов производились в среде Google Colab с подключенным Google хранилищем для сохранения файловой структуры проекта (рис. 4–5) [8].

Параметры обучения (рис. 6) подбирались экспериментальным путем для выведения наилучшей точности модели. Крайний вариант модели обучался на протяжении



Рис. 2. Параметры ячеек изображения
 Примечание: составлено авторами по [3].

Model	mAP	FPS	Real Time speed
Fast YOLO	52.7%	155	Yes
YOLO	63.4%	45	Yes
YOLO VGG-16	66.4%	21	No
Fast R-CNN	70.0%	0.5	No
Faster R-CNN VGG-16	73.2%	7	No
Faster R-CNN ZF	62.1%	18	No

Рис. 3. Сравнение скорости и производительности моделей, обученных с наборами данных PASCAL VOC 2007 и 2012 гг.

Примечание: составлено авторами.

```

import os
HOME = '/content/drive/MyDrive'
print(HOME)

/content/drive/MyDrive

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

Mounted at /content/drive

%cd {HOME}
!pip install ultralytics==8.0.196
    
```

Рис. 4. Подключение Google хранилища и установка библиотеки для работы с моделями ИИ

Примечание: составлено авторами.

```
[ ] from ultralytics import YOLO

[ ] !pip install roboflow

from roboflow import Roboflow
rf = Roboflow(api_key="tnnsWsL9TYAoERnfrZvV")
project = rf.workspace("imam-maulana-b4xet").project("handgun-detection-jtvaj")
version = project.version(9)
dataset = version.download("yolov8")
```

Рис. 5. Импорт модели YOLO и установка датасета с помощью библиотеки Roboflow
Примечание: составлено авторами.

```
[ ] !yolo task=detect \
mode=train \
model=yolov8s.pt \
data=/content/drive/MyDrive/Handgun-Detection-9/data.yaml \
epochs=30 \
batch=16 \
device=0 \
imgsz=640
```

Рис. 6. Метод обучения модели на установленном датасете с определенными параметрами обучения
Примечание: составлено авторами.

30-ти эпох, с количеством образцов данных, обрабатываемых нейронной сетью за одну итерацию, равную 16-ти, и с использованием более 4-х Гб видеопамяти.

При конечном инференсе (рис. 7–9) модель показала 78,5% средней точности, что, относительно затраченных ресурсов, является хорошим показателем.

Для создания системы автоматического оповещения пользователя об обнаружении нежелательных предметов в реальном времени использовались современные технологии для реализации серверной и клиентской части программного обеспечения:

1. Qt Designer – инструмент для построения графических интерфейсов для программ, которые используют библиотеку Qt.

2. Разработка веб-приложения осуществлялась с использованием фреймворка Flask. Его главным преимуществом является простая и гибкая архитектура, позволяющая создавать веб-приложения любой сложности.

3. Платформа для контейнеризации Docker, с помощью которого программный код упаковывается

вывается в единый исполняемый файл вместе с библиотеками и зависимостями, чтобы обеспечить его корректный запуск.

4. Библиотека PyQt5 для верстки стороны клиента и создание алгоритма обнаружения предметов для десктоп-приложения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В файле «desktop.py» находится код, интерпретация которого (рис. 10) создаст объект «QApplication», представляющий собой основное окно приложения PyQt5. После чего создастся экземпляр «LoginWindow» (окно входа), установится иконка окна и оно отобразится (рис. 11).

Откроется следующее окно. Если пользователь не регистрировался ранее, то он может это сделать нажатием кнопки «Зарегистрироваться» (рис. 12).

Это действие откроет веб-страницу с разделом регистрации, что позволит пользователю зарегистрироваться (рис. 13).

После регистрации пользователь может войти в личный кабинет. Теперь, после вноса

Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
24/30	4.29G	0.7793	0.5968	1.339	24	640: 100% 303/303 [02:02<00:00, 2.47it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:04<00:00, 2.28it/s]
all	300	363	0.774	0.614	0.73	0.49
Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
25/30	4.15G	0.7622	0.5677	1.313	14	640: 100% 303/303 [02:01<00:00, 2.48it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:04<00:00, 2.25it/s]
all	300	363	0.758	0.663	0.739	0.504
Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
26/30	4.14G	0.7427	0.5408	1.307	14	640: 100% 303/303 [02:01<00:00, 2.50it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:05<00:00, 1.81it/s]
all	300	363	0.755	0.678	0.755	0.514
Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
27/30	4.29G	0.7223	0.5107	1.286	13	640: 100% 303/303 [02:05<00:00, 2.40it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:04<00:00, 2.26it/s]
all	300	363	0.822	0.667	0.765	0.52
Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
28/30	4.29G	0.7029	0.4937	1.258	13	640: 100% 303/303 [02:05<00:00, 2.42it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:04<00:00, 2.11it/s]
all	300	363	0.837	0.678	0.78	0.54
Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
29/30	4.15G	0.688	0.4751	1.249	13	640: 100% 303/303 [02:01<00:00, 2.49it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:05<00:00, 1.70it/s]
all	300	363	0.837	0.677	0.782	0.54
Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
30/30	4.14G	0.6721	0.4523	1.238	13	640: 100% 303/303 [02:02<00:00, 2.48it/s]
Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:04<00:00, 2.18it/s]
all	300	363	0.826	0.686	0.786	0.541

30 epochs completed in 1.119 hours.
Optimizer stripped from runs/detect/train2/weights/last.pt, 22.5MB
Optimizer stripped from runs/detect/train2/weights/best.pt, 22.5MB

Validating runs/detect/train2/weights/best.pt...
Ultralytics YOLOv8.0.196 Python-3.10.12 torch-2.2.1+cu121 CUDA:0 (Tesla T4, 15102MiB)
Model summary (fused): 168 layers, 11125971 parameters, 0 gradients, 28.4 GFLOPs

Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50	mAP50-95): 100% 10/10 [00:09<00:00, 1.07it/s]
all	300	363	0.826	0.686	0.785	0.541

Speed: 0.4ms preprocess, 5.4ms inference, 0.0ms loss, 7.1ms postprocess per image
Results saved to runs/detect/train2
Learn more at <https://docs.ultralytics.com/modes/train>

Рис. 7. Зафиксированные последние эпохи обучения модели с выводом результатов

Примечание: составлено авторами.

```
[ ] model = YOLO('/content/drive/MyDrive/runs/detect/train2/weights/best.pt')  
exported = model.export(format="onnx")
```

Рис. 8. Экспорт файла весов в необходимый для дальнейшей работы формат

Примечание: составлено авторами.

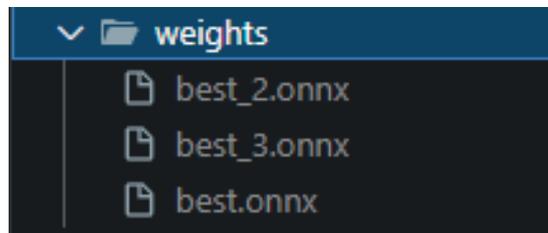


Рис. 9. Каталог с файлами весов

Примечание: составлено авторами.

пользователя в базу данных, можно успешно войти систему локально и указать местоположение камеры, с помощью которой планируется проводить мониторинг (рис. 14–15).

Запустив мониторинг, перед пользователем появится окно мониторинга, где изображение будет передаваться в реальном времени с указанной камеры (рис. 16).

```
desktop.py > ...
1 from PyQt5.QtWidgets import QApplication
2 from PyQt5.QtGui import QIcon
3 import sys
4 import login_window
5
6 def main():
7     app = QApplication(sys.argv)
8     app_icon = QIcon("UI/ICON_32.png")
9
10   mainwindow = login_window.LoginWindow()
11   mainwindow.setWindowIcon(app_icon)
12
13    try:
14        sys.exit(app.exec_())
15    except Exception as e:
16        print(f"An error occurred: {e}")
17    finally:
18        login_window.smtpObj.quit()
19        print("Exiting...")
20
21 if __name__ == "__main__":
22     main()
```

Рис. 10. Содержимое файла desktop.py

Примечание: составлено авторами.

```
(base) PS E:\UNIVERSITY\DIPLом\SOWA> python desktop.py
█
```

Рис. 11. Команда запуска приложения пользователя

Примечание: составлено авторами.

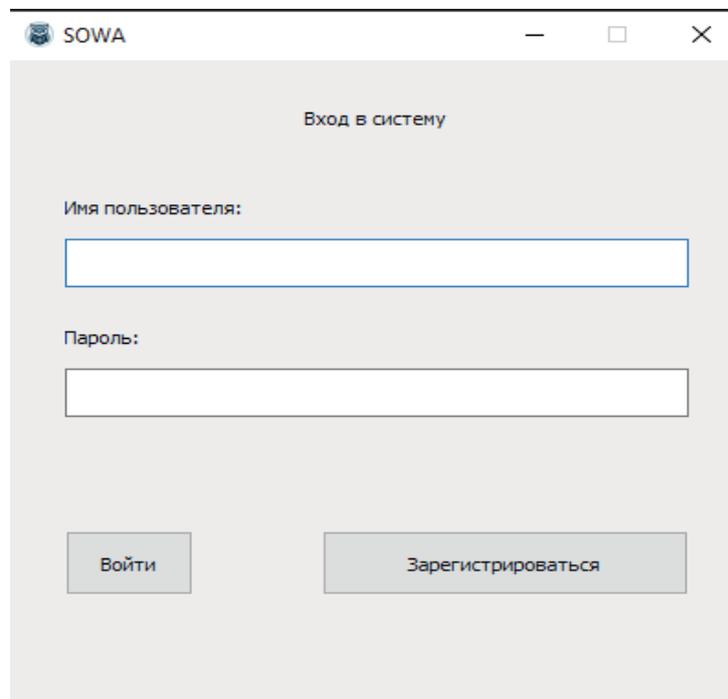


Рис. 12. Окно входа

Примечание: составлено авторами.

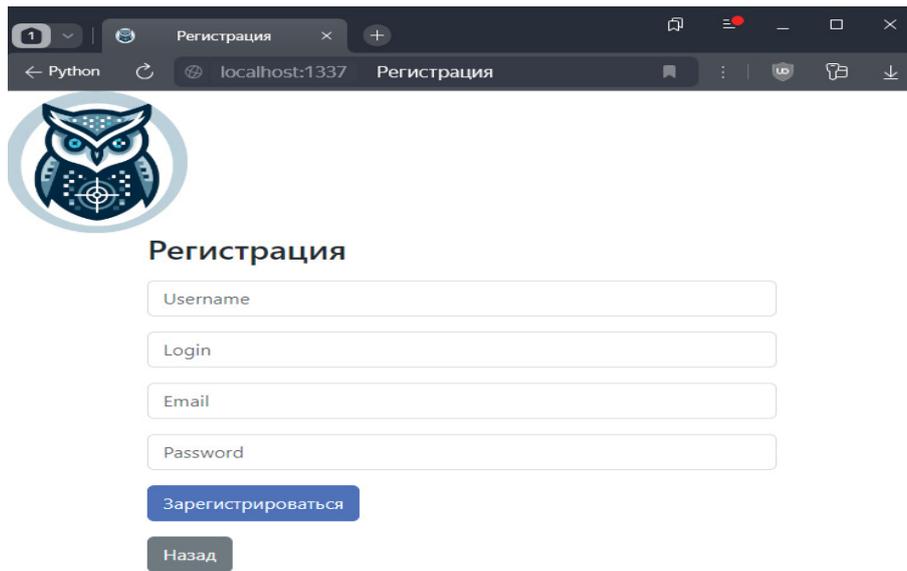


Рис. 13. Страница регистрации
Примечание: составлено авторами.

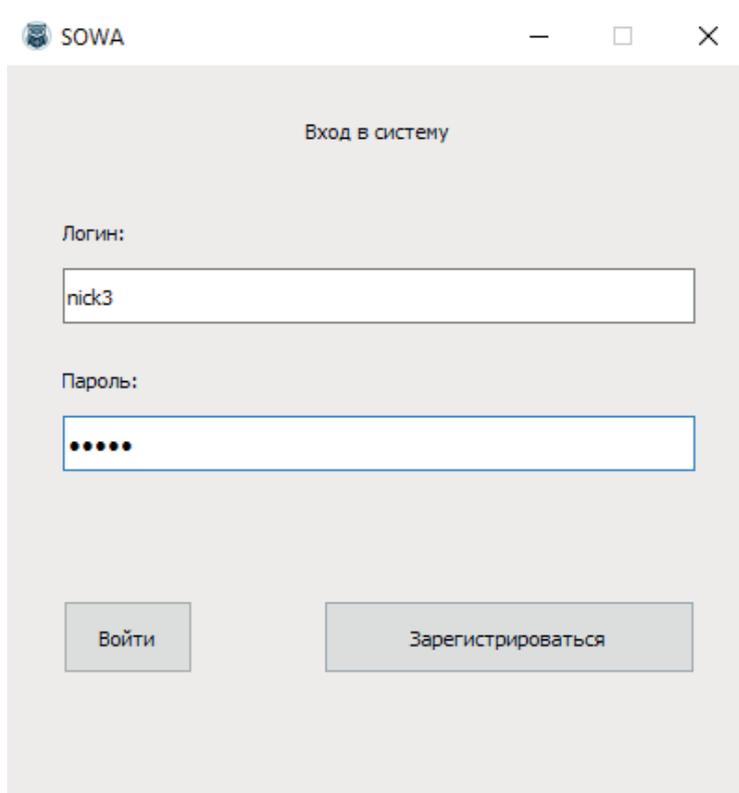


Рис. 14. Вход в систему
Примечание: составлено авторами.

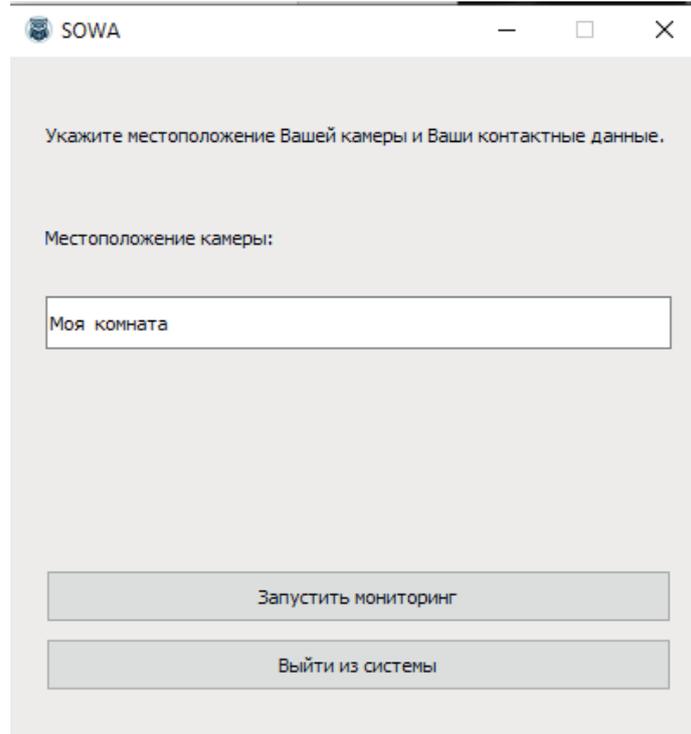


Рис. 15. Заполнение полей окна настройки
Примечание: составлено авторами.

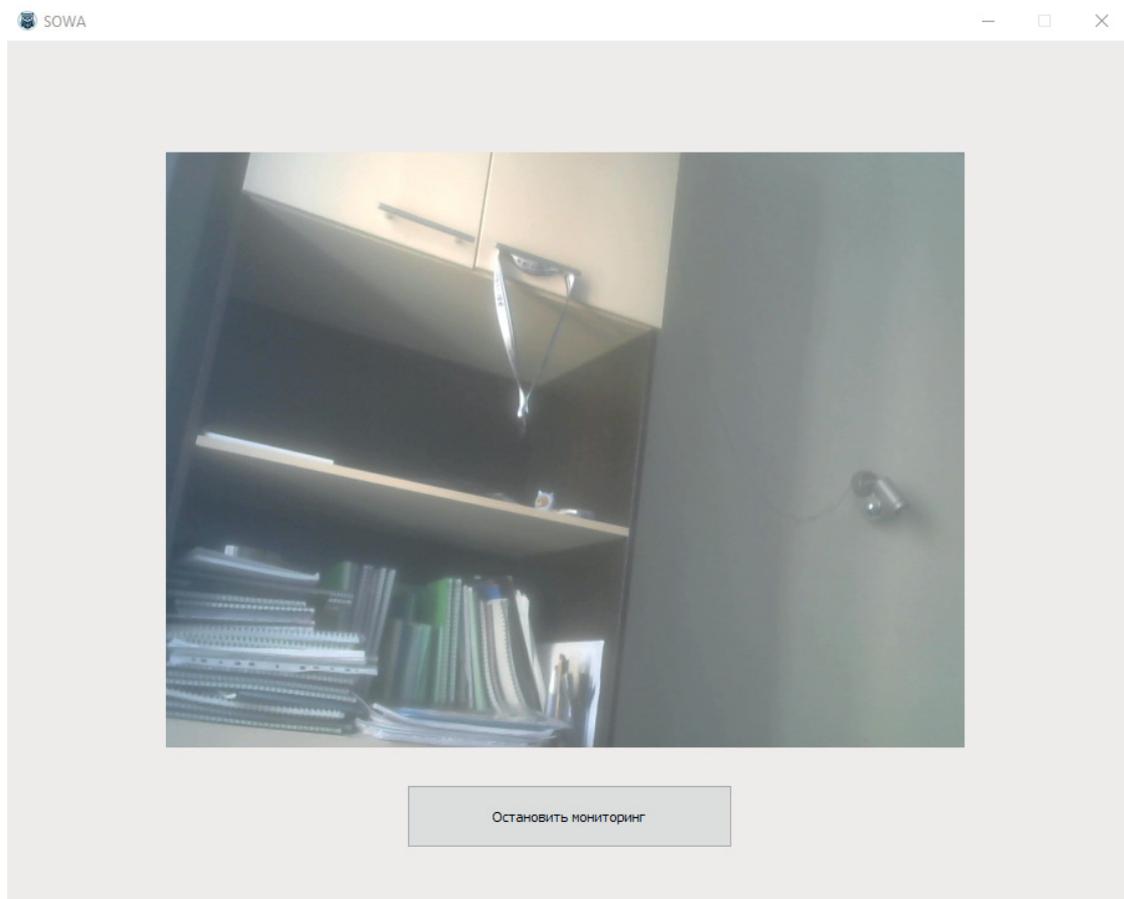


Рис. 16. Процесс мониторинга
Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках научно-исследовательской работы была разработана и реализована интегрированная система, которая включает в себя следующие основные компоненты:

1. Обнаружение предметов в реальном времени. Для этого были использованы технологии компьютерного зрения и глубокого обучения. Эти технологии позволяют системе анализировать видеопоток с камер наблюдения и автоматически определять наличие предметов на изображениях.

2. Автоматическое оповещение. Когда система обнаруживает предметы в поле зрения камеры, она автоматически отправляет оповещение пользователю, а в личном кабинете он сможет посмотреть подробную информацию об обнаружении. Такая система позволяет оперативно реагировать на экстренные ситуации и ее применение способ-

ствует дальнейшему развитию систем безопасности с использованием современных технологий.

3. Доступность и масштабируемость. Для обеспечения доступности и масштабируемости при реализации системы была использована контейнеризация. Этот подход позволил создать изолированную среду выполнения, которая легко переносится и запускается на различных платформах, включая локальные компьютеры. Благодаря этому, система становится доступной для обычных пользователей и способна к масштабированию, позволяя повысить производительность при увеличении вычислительных ресурсов.

Видеосистема автоматического оповещения пользователя об обнаружении предметов повышенного риска в реальном времени является важной частью обеспечения как общественной, так и персональной безопасности.

Список источников

1. Ларина Ю. Событийный видеоконтроль // Безопасность. Достоверность. Информация. 2009. № 83. С. 28–40.
2. VideoNet PSIM – интеллектуальная система безопасности. URL: <https://www.videonet.ru/> (дата обращения: 05.05.2024).
3. Распознавание образов с помощью искусственного интеллекта. URL: <https://habr.com/ru/articles/709432/> (дата обращения: 05.05.2024).
4. YOLO: You Only Look Once – Real Time Object Detection – GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/yolo-you-only-look-once-real-time-object-detection/> (дата обращения: 05.05.2024).
5. Real-Time Object Identification Through Convolution Neural Network Based on YOLO Algorithm. URL: <https://www.sciencepg.com/article/10.11648/j.mcs.20230805.11> (дата обращения: 05.05.2024).
6. YOLO with adaptive frame control for real-time object detection applications. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-021-11480-0> (дата обращения: 05.05.2024).
7. D_0.06 YOLO – Head. URL: <https://junha1125.github.io/blog/artificial-intelligence/2020-08-18-YOLO/> (дата обращения: 05.05.2024).
8. How to Train YOLOv8 Object Detection on a Custom Dataset. URL: <https://blog.roboflow.com/how-to-train-yolov8-on-a-custom-dataset/> (дата обращения: 05.05.2024).

Информация об авторах

Н. Е. Василенко – магистрант.

Н. А. Медведева – старший преподаватель.

References

1. Larina Yu. Sobytiinyi videokontrol. *Bezopasnost. Dostovernost. Informatsiia*. 2009;(83):28–40. (In Russ.).
2. VideoNet PSIM – intelektualnaia sistema bezopasnosti. URL: <https://www.videonet.ru/> (accessed: 05.05.2024). (In Russ.).
3. Raspoznavanie obrazov s pomoshchyu iskusstvennogo intellekta. URL: <https://habr.com/ru/articles/709432/> (accessed: 05.05.2024). (In Russ.).
4. YOLO: You Only Look Once – Real Time Object Detection – GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/yolo-you-only-look-once-real-time-object-detection/> (accessed: 05.05.2024).
5. Real-Time Object Identification Through Convolution Neural Network Based on YOLO Algorithm. URL: <https://www.sciencepg.com/article/10.11648/j.mcs.20230805.11> (accessed: 05.05.2024).
6. YOLO with adaptive frame control for real-time object detection applications. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-021-11480-0> (accessed: 05.05.2024).
7. D_0.06 YOLO – Head. URL: <https://junha1125.github.io/blog/artificial-intelligence/2020-08-18-YOLO/> (accessed: 05.05.2024).
8. How to Train YOLOv8 Object Detection on a Custom Dataset. URL: <https://blog.roboflow.com/how-to-train-yolov8-on-a-custom-dataset/> (accessed: 05.05.2024).

About the authors

N. E. Vasilenko – Master’s Degree Student.

N. A. Medvedeva – Senior Lecturer.

Научная статья
УДК 004.5:519.81
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-4>



Нейросетевая рекомендательная система по подбору контента для онлайн-кинотеатров

Ксения Евгеньевна Кожихова^{1✉}, Дмитрий Викторович Тараканов²,
Иван Вацлавович Чалей³

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

³ПАО «Сургутнефтегаз», Сургут, Россия

¹kozikhova_ksenia@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0003-5564-2027>

²sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

³ivan@chaley.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5274-4296>

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ по таким критериям оценки качества, как нагрузка на систему, объем потребляемой оперативной памяти, время, затраченное на обучение, RMSE (корень из среднеквадратичной ошибки), MAE (средняя абсолютная ошибка), FCP (процент прогнозируемого покрытия) и MSE (среднеквадратичная ошибка). С помощью математических методов принятия решений был выбран самый практичный алгоритм – система на архитектуре DLRM, которая продемонстрировала наилучшие результаты по точности и гибкости в обработке большого объема данных, несмотря на высокую ресурсозатратность. Реализация выбранного алгоритма включала разработку самого алгоритма, проектирование базы данных, создание графического интерфейса пользователя и разработку.

Ключевые слова: рекомендательные системы, анализ данных, машинное обучение, математические методы принятия решений, нейронные сети, база данных, графический интерфейс, программный интерфейс

Для цитирования: Кожихова К. Е., Тараканов Д. В., Чалей И. В. Нейросетевая рекомендательная система по подбору контента для онлайн-кинотеатров // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 34–52. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-4>.

Original article

Neural network-based recommendation system for content selection in online movie theatres

Kseniya E. Kozhikhova^{1✉}, Dmitry V. Tarakanov², Ivan V. Chaley³

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

³“Surgutneftegas” PJSC, Surgut, Russia

¹kozikhova_ksenia@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0003-5564-2027>

²sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

³ivan@chaley.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5274-4296>

Abstract. The article describes a comparative analysis using the following quality assessment criteria: system load, RAM consumption, time spent on training, RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), FCP (First Contentful Paint) and MSE (Mean Square Error). Using mathematical decision-making methods, the most practical algorithm was selected, a system based on DLRM (Deep Learning Recommendation Model) architecture, which showed the best results in terms of accuracy and flexibility in processing large amounts of data, despite having high resource intensiveness. The implementation of the selected algorithm included the development of the algorithm itself, database design, creation of a graphical user interface and development.

Keywords: recommendation systems, data analysis, machine learning, decision-making mathematical methods, neural networks, database, graphical interface, program interface

For citation: Kozhikhova K. E., Tarakanov D. V., Chaley I. V. Neural network-based recommendation system for content selection in online movie theatres. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):34–52. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-4>.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка алгоритмов рекомендаций, которые учитывают индивидуальные предпочтения и поведенческие особенности пользователей, позволяет значительно повысить удовлетворенность пользователей и увеличить их лояльность к платформе. Данная тема особенно актуальна в контексте конкурентной борьбы между различными онлайн-кинотеатрами, где качественные рекомендации могут стать ключевым преимуществом. Помимо этого, успешная рекомендательная система позволит онлайн-кинотеатрам не только повысить удовлетворенность пользователей, но и улучшить такие бизнес-показатели, как удержание аудитории и время просмотра.

Целью данной работы является разработка наиболее эффективной рекомендательной системы по подбору видеоконтента для онлайн-кинотеатров, основанной на сравнительном анализе различных методов и алгоритмов рекомендаций.

Рассмотрим несколько примеров успешного использования рекомендательных систем в онлайн-сервисах.

1. Netflix – крупнейшая развлекательная платформа, которая реализовала оригинальную версию своей системы рекомендаций в далеком 2000 г. [1]. В настоящее время Netflix использует продвинутую систему персонализированных рекомендаций, которая анализирует историю просмотров, рейтинг и поисковое поведение пользователя, чтобы предложить фильмы и телешоу, которые, скорее всего, ему понравятся. Алгоритм также учитывает жанр, актеров, режиссера и другие факторы, чтобы составить персональные рекомендации для каждого пользователя [2].

По оценкам Netflix, около 80% общего времени просмотра видеоконтента приходится на систему рекомендаций, что является впечатляющим результатом [3].

2. Еще одним примером успешной реализации рекомендательной системы является

Amazon. По оценкам, около 35% доходов Amazon приходится на систему рекомендаций [4].

Система рекомендаций Amazon предлагает продукты на основе истории покупок, поиска и поведения пользователя в приложении или на сайте. Она создает персонализированные рекомендации на основе предыдущих покупок пользователя, просмотренных товаров и товаров, добавленных в корзину [2].

Несмотря на разнообразие и гибкость методов, рекомендательные системы сталкиваются с серьезными проблемами, которые существенно влияют на качество моделей и усложняют процесс их разработки. Рассмотрим несколько из этих проблем [5].

1. Холодный старт

Это ситуация, когда система не имеет достаточной информации для генерации точных рекомендаций. Могут возникнуть такие ситуации, когда новый пользователь регистрируется на платформе, система не знает его предпочтений, в результате рекомендации могут быть неточными или общими, или, когда добавляется новый продукт или контент, система не имеет данных о его популярности и релевантности для различных пользователей.

2. Масштабируемость

Речь идет о способности системы обрабатывать и анализировать большие объемы данных, так как увеличение количества пользователей и объектов может существенно увеличить время выдачи рекомендаций.

3. Разреженность данных

Такая проблема возникает, когда большинство пользователей оценивают лишь небольшой процент доступного контента, что приводит к недостаточности данных и сложности в обучении модели.

4. Смещение данных

Данные могут быть смещены или неполными. Например, активные пользователи могут оставлять больше отзывов, что создает

неравномерное представление о предпочтениях всей аудитории.

5. Фильтрационный пузырь

Пользователи могут постоянно получать рекомендации на основе своих прошлых предпочтений, что препятствует открытию для них нового контента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данной работы для обучения рекомендательных систем были использованы данные с веб-сайта MovieLens: 25 млн оценок, примененных к 62 тысячам фильмов 162 тысяч пользователей.

Данные представляют собой следующий набор из 4 файлов.

1. Links.csv – файл, в котором представлено соответствие id фильмов из базы MovieLens с их id в крупнейших базах данных о фильмах imdb.com и tmdb.com. Имеет поля:

- movieId – id фильма;
- imdbId – id фильма на imdb.com;
- tmdbId – id фильма на tmdb.com.

2. Users.csv – файл с информацией о пользователях, который содержит поля:

- userId – id пользователя;
- age – возраст;
- sex – пол.

Эти данные позволяют значительно повысить точность и релевантность рекомендаций, предлагаемых пользователям.

3. Movies.csv – файл с фильмами, который содержит в себе следующую информацию:

- movieId – id фильма;
- title – название фильма, в скобках после названия указана дата выхода;
- genres – жанры фильма, указаны через разделитель.

Пример данных представлен в табл. 1.

В файле представлено более 62 тысяч фильмов, которым присвоены 19 уникальных

жанров. Как видно из табл. 1, одному фильму может быть присвоено несколько жанров.

Построим диаграмму, показывающую распределение фильмов по жанрам, которая представлена на рис. 1.

Рис. 1 наглядно иллюстрирует, что ведущими жанрами являются драма и комедия, они встречаются гораздо чаще других жанров. Анализ этих данных также помогает лучше понять аудиторию и настроить алгоритмы рекомендаций для повышения их точности и релевантности.

Отсортируем фильмы по году выпуска и построим диаграмму, которая отражена на рис. 2.

Как видно из рис. 3, преимущественно в базе MovieLens присутствуют фильмы 2000–2010 гг. выпуска. Знание периодов наибольшего производства видеоконтента позволяет лучше учитывать временные предпочтения пользователей и предлагать более релевантные рекомендации.

4. Ratings.csv – файл с оценками фильмов, которые поставили пользователи. Содержит следующие поля:

- userId – id пользователя;
- movieId – id фильма;
- rating – оценка, поставленная пользователем данному фильму;
- timestamp – время, когда была поставлена оценка фильму, представленное в формате UNIX timestamp (количество секунд, прошедших с 01.01.1970).

Пример входных данных представлен в табл. 2.

Диапазон выставяемых оценок варьируется от 1,0 до 5,0 с шагом 0,5.

Данный файл является основополагающим в обучении методов и дальнейшей реализации рекомендательной системы, поэтому рассмотрим его подробнее. В ре-

Таблица 1

Пример входных данных movies.csv

movieId	title	genres
1	Toy Story (1995)	Adventure Animation Children Comedy Fantasy
8957	Saw (2004)	Horror Mystery Thriller
33615	Madagascar (2005)	Adventure Animation Children Comedy

Примечание: составлено авторами.

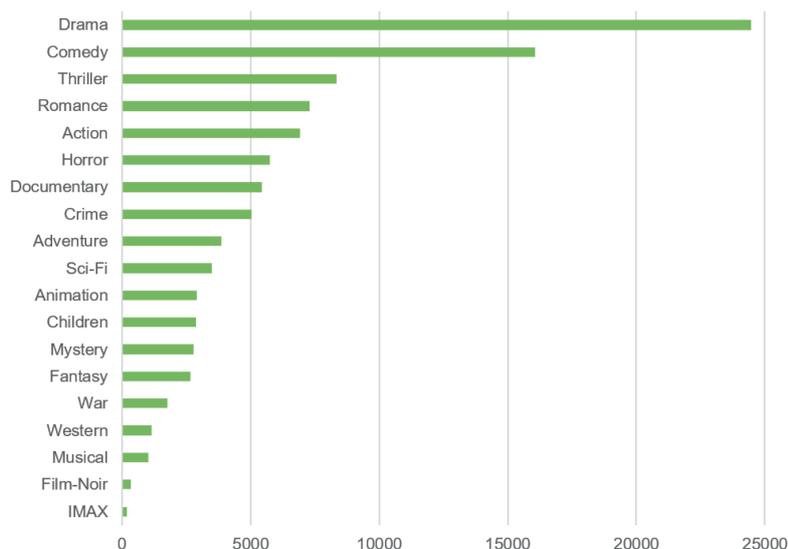


Рис. 1. Диаграмма распределения количества фильмов по жанрам
 Примечание: составлено авторами.

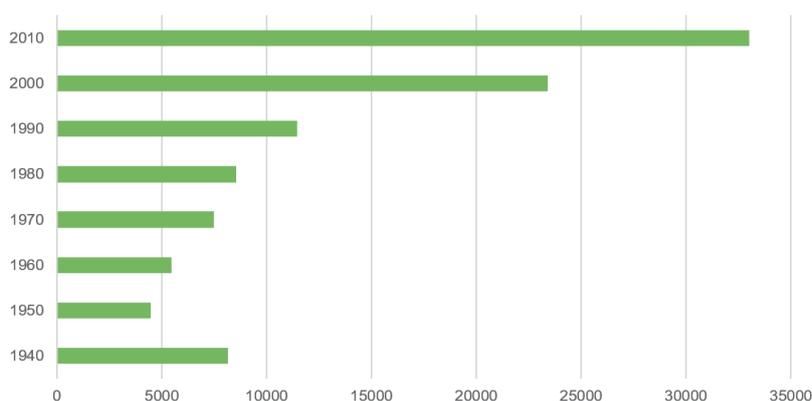


Рис. 2. Диаграмма распределения фильмов по годам выпуска
 Примечание: составлено авторами.

зультате анализа получаем следующую информацию:

- минимальное количество оценок, поставленное одним пользователем: 20;
- медианное количество оценок, поставленное одним пользователем: 71,0;
- среднее количество оценок, поставленное одним пользователем: 153,80793153727367;

- максимальное количество оценок, поставленное одним пользователем: 32202;
- более 75% пользователей поставили менее 162 оценок;
- максимальное количество оценок на один фильм: 81491;
- медианное количество оценок на один фильм: 60;

Таблица 2

Пример входных данных rating.cvs

userId	movieId	rating	timestamp
5183	183309	5,0	1530336311
5183	183833	2,5	1546327827
5183	184619	4,0	1523971175

Примечание: составлено авторами.

– количество фильмов с одной оценкой: 10298;

– более 75% фильмов имеют менее 36 оценок.

Данные показатели не являются оптимальными из-за высокой разреженности данных, что может негативно сказаться на точности прогнозирования.

Обучение методов было реализовано на языке программирования Python 3, который является одним из наиболее популярных языков для анализа данных и машинного обучения благодаря своей простоте и богатой экосистеме библиотек [6]. Также для обучения были применены библиотеки:

– numpy – библиотека для работы с многомерными массивами и матрицами, а также для выполнения различных математических операций [7];

– pandas – библиотека для обработки и анализа данных, которая обеспечивает удобные инструменты для работы с таблицами и временными рядами [8];

– sklearn – библиотека машинного обучения, включающая множество алгоритмов для классификации, регрессии, кластеризации и снижения размерности [9];

– keras – высокоуровневый API для нейронных сетей, работающий поверх TensorFlow, который упрощает создание и обучение глубоких нейронных сетей [10];

– surprise – специализированная библиотека для построения и анализа рекомендательных систем [11];

– csv – модуль для работы с CSV-файлами, позволяет читать и записывать данные в формате CSV [12];

– os – модуль для взаимодействия с операционной системой, обеспечивает доступ к файловой системе и позволяет выполнять системные команды [13];

– time – модуль для работы со временем, предоставляет функции для измерения времени, задержек и форматирования времени [14];

– psutil – библиотека для получения информации о системных ресурсах и процессах, используется для мониторинга производительности [15].

Обучение каждого метода можно разделить на три этапа:

1. Импорт библиотек для сбора критериев оценки качества и подготовки директории с файлами для обучения модели.

2. Индивидуальное обучение каждой модели, тестирование модели на тестовом наборе данных для получения значений критериев оценки качества.

3. Сохранение значений критериев, полученных на втором этапе, в csv-файлы для дальнейшего анализа.

Для каждого метода были собраны результаты работы метода:

– на неотсортированном наборе данных;

– на отсортированном наборе данных по возрасту и полу;

– на отсортированном наборе данных по жанру;

– на отсортированном наборе данных по жанру, возрасту и полу.

После получения всех результатов составлена результирующая таблица для каждого алгоритма.

Аппаратная часть, на которой были обучены алгоритмы рекомендательных систем:

процессор: Intel core i5-12400F, 6 ядер, 12 потоков;

оперативная память: ADATA 32GB DDR4.

Рассмотрим общие критерии оценки качества для каждого метода с целью дальнейшего выбора наиболее оптимального алгоритма рекомендательной системы.

Итоговый результат обучения метода Co-Clustering продемонстрирован в табл. 3.

Как видно из результирующей табл. 3, данный метод быстро обучился, при этом не используя большие ресурсы персонального компьютера.

Итоговый результат обучения метода KNNBaseline продемонстрирован в табл. 4.

Как видно из результирующей табл. 4, алгоритм достаточно быстро обучился, но ему потребовалось более 4 Гб оперативной памяти в среднем (17 Гб в максимуме).

Итоговый результат обучения метода KNNBasic продемонстрирован в табл. 5.

Как видно из результирующей табл. 5, алгоритм достаточно быстро обучился, но ему по-

Таблица 3

Общий результат обучения алгоритма Co-Clustering

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	15,30	134213632	2156,0000	0,9419	0,7311	0,5899	0,8872
По полу и возрасту	17,00	135294976	164,6500	0,9771	0,7568	0,5976	0,9555
По жанру	20,70	136196096	275,5400	0,9292	0,7152	0,6199	0,8643
По жанру, возрасту и полу	20,00	136228864	235,0182	0,9448	0,7266	0,5992	0,8942
Среднее общее	18,25	135483392	707,8021	0,9483	0,7324	0,6017	0,9003

Примечание: составлено авторами.

Таблица 4

Общий результат обучения алгоритма KNNBaseline

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	14,300	17231249415	1661,0000	0,8878	0,6802	0,6196	0,7882
По полу и возрасту	18,100	119967744	124,8583	0,9013	0,6903	0,6217	0,8126
По жанру	18,500	121020416	69,7937	0,8653	0,6520	0,6267	0,7494
По жанру, возрасту и полу	19,600	119853056	57,3000	0,8805	0,6637	0,6044	0,7771
Среднее общее	17,625	4398022658	478,2380	0,8837	0,6716	0,6181	0,7818

Примечание: составлено авторами.

Таблица 5

Общий результат обучения алгоритма KNNBasic

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	18,200	21971861513	1559,0000	0,9607	0,7445	0,4494	0,923
По полу и возрасту	18,800	123564032	124,1000	0,9698	0,7492	0,4880	0,9407
По жанру	19,800	123142144	64,8079	0,9937	0,7082	0,5631	0,8688
По жанру, возрасту и полу	36,900	122216448	53,3833	0,9458	0,7181	0,5338	0,8971
Среднее общее	23,425	5585196034	450,3228	0,9675	0,7300	0,5086	0,9074

Примечание: составлено авторами.

требовалось более 20% ЦП и более 5 Гб оперативной памяти в среднем (21 Гб в максимуме).

Итоговый результат обучения метода KNNWithZScore продемонстрирован в табл. 6.

Как видно из результирующей табл. 6, алгоритм достаточно быстро обучился, но ему потребовалось более 5 Гб оперативной памяти в среднем (20 Гб в максимуме).

Итоговый результат обучения метода NMF продемонстрирован в табл. 7.

Как видно из результирующей табл. 7, алгоритм быстро обучился, но ему потребовалось более 20% ЦП и более 4 Гб оперативной памяти в среднем (13 Гб в максимуме).

Итоговый результат обучения метода SlopeOne продемонстрирован в табл. 8.

Как видно из результирующей табл. 8, алгоритму для полного обучения на неотсор-

тированном наборе данных потребовалось 1,5 часа, при этом было затрачено более 10 Гб оперативной памяти (максимум), нагрузка на ЦП была в пределах нормы.

Итоговый результат обучения метода k-Means продемонстрирован в табл. 9.

Из результирующей табл. 9 видно, что, как и предыдущему алгоритму, алгоритму k-Means потребовалось время для полного обучения. В максимуме было использовано около 21 Гб оперативной памяти, но ЦП при этом не был сильно нагружен.

Итоговый результат обучения метода SVD продемонстрирован в табл. 10.

Как видно из результирующей табл. 10, алгоритм достаточно быстро обучился, не затратив больших ресурсов персонального компьютера.

Таблица 6

Общий результат обучения алгоритма KNNWithZScore

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	15,800	20887633928	1651,0000	0,9146	0,6956	0,5939	0,8366
По полу и возрасту	19,600	119324672	123,2833	0,9384	0,7133	0,6188	0,8812
По жанру	19,600	118132736	68,8753	0,8740	0,6579	0,6319	0,7650
По жанру, возрасту и полу	22,700	124276736	55,2333	0,9071	0,6832	0,6072	0,8272
Среднее общее	19,425	5312342018	474,5980	0,9085	0,6875	0,6130	0,8275

Примечание: составлено авторами.

Таблица 7

Общий результат обучения алгоритма NMF

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	15,0	1304428544	1791,0000	0,9371	0,7211	0,5991	0,8781
По полу и возрасту	17,3	142761984	153,0333	0,9604	0,7378	0,6142	0,9237
По жанру	25,8	142954496	251,5684	0,9143	0,6965	0,6253	0,8370
По жанру, возрасту и полу	26,3	143896576	188,7250	0,9400	0,7181	0,6024	0,8878
Среднее общее	21,1	433510400	596,0817	0,9380	0,7184	0,6103	0,8817

Примечание: составлено авторами.

Таблица 8

Общий результат обучения алгоритма SlopeOne

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	15,10	11318329348	5950,000	0,898	0,6899	0,6133	0,8063
По полу и возрасту	16,40	145141760	393,1000	0,9358	0,7161	0,6151	0,8764
По жанру	16,10	149635072	217,0853	0,8782	0,6645	0,6369	0,7720
По жанру, возрасту и полу	23,00	147943424	175,5417	0,9075	0,6881	0,6057	0,8275
Среднее общее	17,65	2940262401	1683,9320	0,9049	0,6897	0,6178	0,8206

Примечание: составлено авторами.

Таблица 9

Общий результат обучения алгоритма k-Means

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	14,90	22265462793	6032,0000	0,9181	0,6964	0,6136	0,843
По полу и возрасту	17,00	417189888	125,6083	0,9399	0,7150	0,6203	0,8841
По жанру	18,60	417157120	68,4605	0,8736	0,6580	0,6368	0,7642
По жанру, возрасту и полу	25,30	417652736	54,6083	0,9039	0,6810	0,6095	0,8212
Среднее общее	18,95	5879365634	1570,1690	0,9089	0,6876	0,6201	0,8281

Примечание: составлено авторами.

Таблица 10

Общий результат обучения алгоритма SVD

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	14,000	13481541632	1374,0000	0,8712	0,6703	0,6282	0,7591
По полу и возрасту	18,800	107778048	96,2667	0,8932	0,6858	0,6155	0,7982
По жанру	17,900	133238784	143,2632	0,8602	0,6589	0,6272	0,7407
По жанру, возрасту и полу	15,200	144293888	116,6667	0,8673	0,6635	0,6026	0,7539
Среднее общее	16,475	3466713088	432,5492	0,8730	0,6696	0,6184	0,7630

Примечание: составлено авторами.

Итоговый результат обучения метода DLRM продемонстрирован в табл. 11.

Как видно из результирующей табл. 11, алгоритм очень долго обучался (максимальное значение – более 3-х дней), затратив при этом большие ресурсы ЦП, но не используя больше 2 Гб оперативной памяти.

Итоговый результат обучения гибридного метода k-Means + SVD продемонстрирован в табл. 12.

Как видно из результирующей табл. 12, алгоритм долго обучался (максимально – больше суток), затратив в среднем 6 Гб оперативной памяти (22 Гб в максимуме).

Итоговый результат обучения гибридного метода KNNBasic + k-Means продемонстрирован в табл. 13.

Как видно из результирующей табл. 13, алгоритм обучался долго (максимально – больше 1,5 дня), затратив в среднем 6 Гб оперативной памяти (22 Гб в максимуме).

Итоговый результат обучения гибридного метода KNNBasic + SVD продемонстрирован в табл. 14. Как видно из результирующей табл. 14, алгоритм обучался долго (максимально 1,5 дня), используя при этом около 30% ЦП и 6 Гб памяти в среднем (22 Гб в максимуме). Данный метод достаточно требователен по ресурсам.

В табл. 15 приведен общий результат, взятый из строк «Среднее общее» в табл. 3–14, для всех обученных методов выше.

Как видно из табл. 15, алгоритмы все разные, имеют разные значения критериев и нет явного лидера по производительности и результату.

Таблица 11

Общий результат обучения алгоритма DLRM

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	91,70	1616904192	249894,0000	0,9773	0,739	0,5805	0,9551
По полу и возрасту	54,60	1480040448	1457,1250	0,9779	0,7452	0,5744	0,9565
По жанру	58,90	1447968768	2593,2074	0,9296	0,7038	0,5889	0,8655
По жанру, возрасту и полу	82,20	1341693952	1947,9750	0,9472	0,7211	0,5790	0,9009
Среднее общее	71,85	1471651840	63973,0800	0,9580	0,7273	0,5807	0,9195

Примечание: составлено авторами.

Таблица 12

Общий результат обучения алгоритма k-Means + SVD

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	18,7	22271754249	95095,0000	0,8770	0,6742	0,6197	0,7691
По полу и возрасту	18,8	1527545856	857,4000	0,8925	0,6852	0,6282	0,7967
По жанру	19,9	1530687488	1411,6689	0,8455	0,6451	0,6332	0,7154
По жанру, возрасту и полу	19,8	1528791040	965,3833	0,8631	0,6583	0,6046	0,7474
Среднее общее	19,3	6714694658	24582,3600	0,8695	0,6657	0,6214	0,7572

Примечание: составлено авторами.

Таблица 13

Общий результат обучения алгоритма KNNBasic + k-Means

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	17,2	22938648585	139540	0,9098	0,7005	0,5928	0,8277
По полу и возрасту	19,60	403456000	929,3917	0,9218	0,7077	0,6019	0,8500
По жанру	18,20	1521176576	1334,4958	0,8832	0,6689	0,6266	0,7811
По жанру, возрасту и полу	24,80	1527468032	990,3250	0,9020	0,6832	0,5998	0,8159
Среднее общее	19,95	6597687298	35698,5500	0,9042	0,6901	0,6053	0,8187

Примечание: составлено авторами.

Таблица 14

Общий результат обучения алгоритма KNNBasic + SVD

Набор данных	ЦП, %	Память, байт	Время обучения, с	RSME	MAE	FCP	MSE
Неотсортированный	18,700	22271754249	95095,0000	0,8920	0,6896	0,5927	0,7957
По полу и возрасту	26,200	414904320	956,4750	0,9076	0,7005	0,6006	0,8238
По жанру	34,200	419827712	1535,0605	0,8652	0,6630	0,6191	0,7494
По жанру, возрасту и полу	36,000	420458496	1141,7750	0,8762	0,6698	0,5964	0,7693
Среднее общее	28,775	5881736194	24682,0800	0,8853	0,6807	0,6022	0,7846

Примечание: составлено авторами.

Таблица 15

Общие показатели обучения всех методов

Алгоритм рек. системы	Критерии						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
SVD	16,475	3466713088	432,5492	0,8730	0,6696	0,6184	0,7630
Co-Clustering	18,250	135483392	707,8021	0,9483	0,7324	0,6017	0,9003
KNNBaseline	17,625	4398022658	478,2380	0,8837	0,6716	0,6181	0,7818
KNNBasic	23,425	5585196034	450,3228	0,9675	0,7300	0,5086	0,9074
KNNWithZScore	19,425	5312342018	474,5980	0,9085	0,6875	0,6130	0,8275
NMF	21,100	433510400	596,0817	0,9380	0,7184	0,6103	0,8817
SlopeOne	17,650	2940262401	1683,9320	0,9049	0,6897	0,6178	0,8206
DLRM	71,850	1471651840	63973,0800	0,9580	0,7273	0,5807	0,9195
k-Means	18,950	5879365634	1570,1690	0,9089	0,6876	0,6201	0,8281
KNNBasic + k-Means	19,950	6597687298	35698,5500	0,9042	0,6901	0,6053	0,8187
KNNBasic + SVD	28,775	5881736194	24682,0800	0,8853	0,6807	0,6022	0,7846
k-Means + SVD	19,300	6714694658	24582,3600	0,8695	0,6657	0,6214	0,7572

Примечание: составлено авторами.

Для выбора наиболее оптимального алгоритма рекомендательной системы используем математические методы принятия решений.

Воспользуемся комбинированным критерием для выбора алгоритма. Для установки ограничений будет использован критерий Антиидеальной точки (Y3, Y4, Y5, Y6), а для выбора алгоритма – критерий Идеальной точки (Y1, Y2, Y4).

1. Определение весов критериев.

Так как изначально нет оценок экспертов, попросим независимых экспертов оценить критерии. Оценки отображены в табл. 16.

Нормализуем полученные данные по (1):

$$b_{ij} = 1 - \frac{a_{ij} - 1}{n}, \quad (1)$$

где

a_{ij} – значение из табл. 16,
 n – количество критериев.

Нормализация оценок продемонстрирована в табл. 17.

Выполняем расчет по (2):

$$c_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=0}^n b_{ij}}, \quad (2)$$

где

b_{ij} – значение из табл. 17,

n – количество критериев,

$\sum_{j=0}^n b_{ij}$ – сумма рангов для i -го эксперта.

Вычисляем вес критерия по (3):

$$y_j = \sum_{i=0}^m \frac{c_{ij}}{m}, \quad (3)$$

где

c_{ij} – значение из табл. 18,

m – количество экспертов,

$\sum_{i=0}^m c_{ij}$ – сумма рангов для j -го критерия.

Все расчеты отображены в табл. 18.

Таблица 16

Оценка независимых экспертов

Эксперт	Критерии							Сумма рангов
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	
Э1	1	3	4	6	6	6	2	28
Э2	2	1	5	7	4	6	3	28
Э3	3	2	4	6	6	6	1	28
Э4	3	4	1	7	6	5	2	28
Э5	2	1	4	6	5	7	3	28
Э6	4	5	1	3	2	6	7	28

Примечание: составлено авторами.

Таблица 17

Нормализация оценок экспертов

Эксперт	Критерии							Сумма рангов
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	
Э1	1,00	0,71	0,86	0,57	0,29	0,29	0,29	4
Э2	0,86	1,00	0,71	0,43	0,57	0,29	0,14	4
Э3	0,71	0,86	1,00	0,57	0,29	0,29	0,29	4
Э4	0,71	0,57	0,86	1,00	0,29	0,43	0,14	4
Э5	0,86	1,00	0,71	0,57	0,43	0,14	0,29	4
Э6	0,57	0,43	0,14	1,00	0,86	0,29	0,71	4

Примечание: составлено авторами.

Таблица 18

Получение весов критериев от среднего значения суммы для каждого критерия

Эксперт	Критерии							Сумма рангов
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	
Э1	0,25	0,18	0,21	0,14	0,07	0,07	0,07	1
Э2	0,21	0,25	0,18	0,11	0,14	0,07	0,04	1
Э3	0,18	0,21	0,25	0,14	0,07	0,07	0,07	1
Э4	0,18	0,14	0,21	0,25	0,07	0,11	0,04	1
Э5	0,21	0,25	0,18	0,14	0,11	0,04	0,07	1
Э6	0,14	0,11	0,04	0,25	0,21	0,07	0,18	1
СУММ	1,18	1,14	1,07	1,04	0,68	0,43	0,46	6
Вес коэф.	0,20	0,19	0,18	0,17	0,11	0,07	0,08	1

Примечание: составлено авторами.

2. Нормализация критериев

Для нормализации критериев используем критерий Севиджа. Нормализация критериев критерием Севиджа – это метод, использующийся в многокритериальном анализе, который позволяет привести к одной числовой шкале различные критерии, которые имеют разный масштаб и единицы измерения.

Сначала необходимо определить максимальное значение для каждого критерия. Затем для каждого критерия рассчитывается разность между максимальным значением и реальными значениями.

После этого для каждого критерия рассчитывается минимальное значение разности. Далее выбирается максимальное значение минимальной разности – это и будет максимальным критерием. Используя формулу, каждый показатель нормализуется по максимальному критерию.

Нормализованный показатель для каждого критерия рассчитывается по (4):

$$Z_i = \frac{C_{max} - Z_i}{C_{max} - C_{min}}, \quad (4)$$

где

Z_i – реальное значение i -го критерия,

C_{\max} – максимальное значение разности между максимальным и реальным значениями,

C_{\min} – минимальное значение разности между максимальным и реальным значениями.

Расчеты приведены в табл. 19.

Для критериев Y1, Y6 и Y7 выполним смену направления. В табл. 20 представлены нормализованные критерии.

Данные в табл. 20 обозначают какую-либо величину. Необходимо перейти к безразмерным шкалам. Для этого используем Относительную нормализацию. Выполняем расчеты по (5):

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\text{MAX}(a_j)}, \quad (5)$$

где

a_{ij} – значение из табл. 19,

$\text{MAX}(a_j)$ – значение максимума из табл. 20,

Расчеты внесены в табл. 21.

Применим ограничение в виде критерия Антиидеальной точки для критериев 3, 4, 5 и 6. Ограничения Антиидеальной точки используется для минимизации отклонения от наилучшего возможного решения. Этот метод заключается в том, чтобы найти решение, которое

Таблица 19

Нормализация критерием Севиджа

Алгоритм	Критерии						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X1	16,475	3466713088	432,5492	0,873	0,6696	0,6184	0,763
X2	18,25	135483392	707,8021	0,9483	0,7324	0,6017	0,9003
X3	17,625	4398022658	478,238	0,8837	0,6716	0,6181	0,7818
X4	23,425	5585196034	450,3228	0,9675	0,73	0,5086	0,9074
X5	19,425	5312342018	474,598	0,9085	0,6875	0,613	0,8275
X6	21,1	433510400	596,0817	0,938	0,7184	0,6103	0,8817
X7	17,65	2940262401	1683,932	0,9049	0,6897	0,6178	0,8206
X8	71,85	1471651840	63973,08	0,958	0,7273	0,5807	0,9195
X9	18,95	5879365634	1570,169	0,9089	0,6876	0,6201	0,8281
X10	19,95	6597687298	35698,55	0,9042	0,6901	0,6053	0,8187
X11	28,775	5881736194	24682,08	0,8853	0,6807	0,6022	0,7846
X12	19,3	6714694658	24582,36	0,8695	0,6657	0,6214	0,7572
Макс	71,85	6714694658	63973,08	0,9675	0,7324	0,6214	0,9195
Мин	16,475	135483392	432,5492	0,8695	0,6657	0,5086	0,7572

Примечание: составлено авторами.

Таблица 20

Нормализация критерием Севиджа

Алгоритм	Критерии						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X1	55,375	3466713088	432,5492	0,873	0,6696	0,003	0,1565
X2	53,6	135483392	707,8021	0,9483	0,7324	0,0197	0,0192
X3	54,225	4398022658	478,238	0,8837	0,6716	0,0033	0,1377
X4	48,425	5585196034	450,3228	0,9675	0,73	0,1128	0,0121
X5	52,425	5312342018	474,598	0,9085	0,6875	0,0084	0,092
X6	50,75	433510400	596,0817	0,938	0,7184	0,0111	0,0378
X7	54,2	2940262401	1683,932	0,9049	0,6897	0,0036	0,0989
X8	0	1471651840	63973,08	0,958	0,7273	0,0407	0
X9	52,9	5879365634	1570,169	0,9089	0,6876	0,0013	0,0914
X10	51,9	6597687298	35698,55	0,9042	0,6901	0,0161	0,1008
X11	43,075	5881736194	24682,08	0,8853	0,6807	0,0192	0,1349
X12	52,55	6714694658	24582,36	0,8695	0,6657	0	0,1623
Макс	55,375	6714694658	63973,08	0,9675	0,7324	0,1128	0,1623

Примечание: составлено авторами.

Таблица 21

Использование относительной нормализации

Алгоритм	Критерии						
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X1	0,297517	0,51628753	0,006761	0,902326	0,914255	5,48227	4,701171
X2	0,329571	0,02017715	0,011064	0,980155	1	5,33422	5,547135
X3	0,318284	0,65498476	0,007476	0,913385	0,916985	5,47961	4,817006
X4	0,423025	0,83178705	0,007039	1	0,996723	4,508865	5,590881
X5	0,35079	0,79115169	0,007419	0,939018	0,938695	5,434397	5,098583
X6	0,381038	0,06456145	0,009318	0,969509	0,980885	5,410461	5,432532
X7	0,318736	0,43788475	0,026323	0,935297	0,941699	5,47695	5,056069
X8	1,297517	0,21916884	1	0,990181	0,993037	5,14805	5,665434
X9	0,342212	0,87559687	0,024544	0,939432	0,938831	5,49734	5,10228
X10	0,360271	0,98257443	0,558025	0,934574	0,942245	5,366135	5,044362
X11	0,519639	0,87594991	0,38582	0,915039	0,92941	5,338652	4,834258
X12	0,348533	1	0,384261	0,898708	0,90893	5,508865	4,665434
Гамма	0,20	0,19	0,18	0,17	0,11	0,07	0,08
Z	0,30	0,02	0,01	0,90	0,91	4,51	4,67

Примечание: составлено авторами.

максимально удалено от всех нежелательных характеристик (антиидеальных точек) и максимально близко к идеальным характеристикам.

Алгоритм использования ограничения Антиидеальной точки включает в себя следующие шаги.

1. Вычислить расстояние от каждой точки (варианта решения) в матрице оценок до антиидеальной точки по следующей (6):

$$q_i = \sum_{j=1}^m \gamma_j^2 * (z_j - x_{ij})^2, \quad (6)$$

где

j – это индекс критерия,

γ – это вес коэффициентов, который был найден на этапе обработки оценок экспертов,

z – это минимальное значение для критерия j (из всех алгоритмов),

x – это значение критерия конкретного алгоритма.

2. Просуммировать и получить столбец с суммами для каждого метода рекомендательной системы.

3. На основе среднего значения столбца с суммами отсеять те методы рекомендаций, которые ниже среднего.

Расчеты в табл. 22.

Находим среднее значение z_{gr} для последнего столбца в табл. 22, равное 0,008138, и исключаем алгоритмы X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X9 и X11, т.к. они меньше рассчитанного значения z_{gr} .

Таблица 22

Использование ограничения критерием Антиидеальной точки

Алгоритм	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Сумма
X1			0,000000	0,000000	0,000000	0,004834		0,004835
X2			0,000001	0,000198	0,000106	0,003476		0,003780
X3			0,000000	0,000006	0,000001	0,004808		0,004815
X4			0,000000	0,000306	0,000099	0,000000		0,000404
X5			0,000000	0,000048	0,000011	0,004370		0,004430
X6			0,000000	0,000149	0,000066	0,004147		0,004363
X7			0,000012	0,000040	0,000014	0,004782		0,004847
X8			0,031458	0,000249	0,000090	0,002084		0,033882
X9			0,000010	0,000049	0,000011	0,004985		0,005056
X10			0,009690	0,000038	0,000014	0,003750		0,013492
X11			0,004582	0,000008	0,000005	0,003513		0,008108
X12			0,004544	0,000000	0,000000	0,005102		0,009646

Примечание: составлено авторами.

Применим критерий Идеальной точки для оставшихся критериев. Критерий Идеальной точки широко используется в теории принятия решений при ранжировании альтернатив. Он является одним из наиболее эффективных критериев для принятия решений в группе.

Критерий Идеальной точки предполагает, что при принятии решения индивид выбирает тот вариант, который находится ближе всего к его идеальному представлению о желаемом результате. Основная идея заключается в том, чтобы найти оптимальное решение, которое минимизирует расстояние до всех критериев, максимально приближаясь к идеальному результату по каждому из них.

Алгоритм использования критерия Идеальной точки включает в себя следующие шаги:

1. Вычислить расстояние от каждой точки (варианта решения) в матрице оценок до идеальной точки по следующей (7):

$$q_i = \sum_{j=1}^m \gamma_j^2 * (x_{ij} - z_j)^2, \quad (7)$$

где

j – это индекс критерия,

γ – это вес коэффициентов, который был найден на этапе обработки оценок экспертов,

z – это минимальное значение для критерия j (из всех алгоритмов),

x – это значение критерия конкретного алгоритма.

2. Просуммировать и получить столбец с суммами для каждого метода (алгоритма) рекомендательной системы.

3. Выбрать альтернативу с максимальным значением суммы (учитывая исключения, которые были сделаны ограничением критерия Антиидеальной точки).

Расчеты находятся в табл. 23.

В данном случае лучшей альтернативой является алгоритм X8 – это нейронная сеть на базе архитектуры DLRM. Данный алгоритм показывает достаточно высокий результат точности, а также является одним из немногих алгоритмов, который не нагружает оперативную память, из-за чего имеет большую ресурсоемкость по входным данным для обучения модели и соответственно выдачи рекомендаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация рекомендательной системы, построенной на архитектуре DLRM, включает в себя разработку алгоритма, проектирование базы данных, а также графического и программного интерфейса.

Система реализована на языке программирования Python с использованием библиотек numpy, pandas, csv, os, которые ранее применялись и при обучении методов. Помимо данных библиотек потребуются еще следующие:

– flask – легковесный веб-фреймворк для Python, предназначенный для создания веб-приложений и API [16];

– psycopg2 – библиотека для взаимодействия с PostgreSQL базами данных из Python [17];

Таблица 23

Использование критерия Идеальной точки

Алгоритм	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Сумма
X1	0,000000	0,008930					0,000008	0,008937
X2	0,000040	0,000000					0,004655	0,004695
X3	0,000017	0,014621					0,000138	0,014775
X4	0,000608	0,023899					0,005128	0,029635
X5	0,000110	0,021566					0,001123	0,022799
X6	0,000269	0,000071					0,003523	0,003864
X7	0,000017	0,006330					0,000914	0,007261
X8	0,038584	0,001437					0,005988	0,046009
X9	0,000077	0,026548					0,001143	0,027768
X10	0,000152	0,033604					0,000860	0,034616
X11	0,001904	0,026570					0,000171	0,028645
X12	0,000100	0,034832					0,000000	0,034932

Примечание: составлено авторами.

– tkinter – встроенный в Python стандартный модуль для создания графических пользовательских интерфейсов (GUI) [18];
– pickle – встроенный модуль Python для сериализации и десериализации объектов (конвертация объектов в байтовый поток и обратно) [19].

Алгоритм работы рекомендаций будет зависеть от того, является ли человек зарегистрированным пользователем онлайн-кинотеатра или нет.

Если пользователь зарегистрирован на сервисе онлайн-кинотеатра, то берутся данные, хранящиеся в базе данных сервиса, и формируются в один список из `userId`. Затем этот список передается в функцию для выдачи предсказаний, загружается уже обученная модель алгоритма по рекомендательным системам, после чего выдается `movieId`, который система заранее знает.

Если же пользователь не зарегистрирован, то есть два решения данной ситуации.

1. Предложить незарегистрированному пользователю список самых популярных и высоко оцененных фильмов/сериалов в сервисе, таким образом можно будет как получить в будущем информацию о данном пользователе, так и не испортить его впечатление в качестве посетителя сервиса.

2. Попросить пользователя ввести свои возраст, пол, а также выбрать предпочитаемые жанры фильмов и методом ближайших точек найти пользователей по похожим параметрам и предложить фильмы и сериалы, которые можно будет предложить пользователям с аналогичными данными профиля.

Блок-схема данного алгоритма реализована на рис. 3.

В первую очередь нужно спроектировать базу данных. В качестве СУБД была выбрана PostgreSQL, так как данная технология открыта и хорошо интегрируется с Python. На рис. 4 представлена будущая БД, которую необходимо разработать.

БД включает в себя 5 табл.:

– `users` – таблица, в которой хранится информация о пользователях, а точнее `userId`

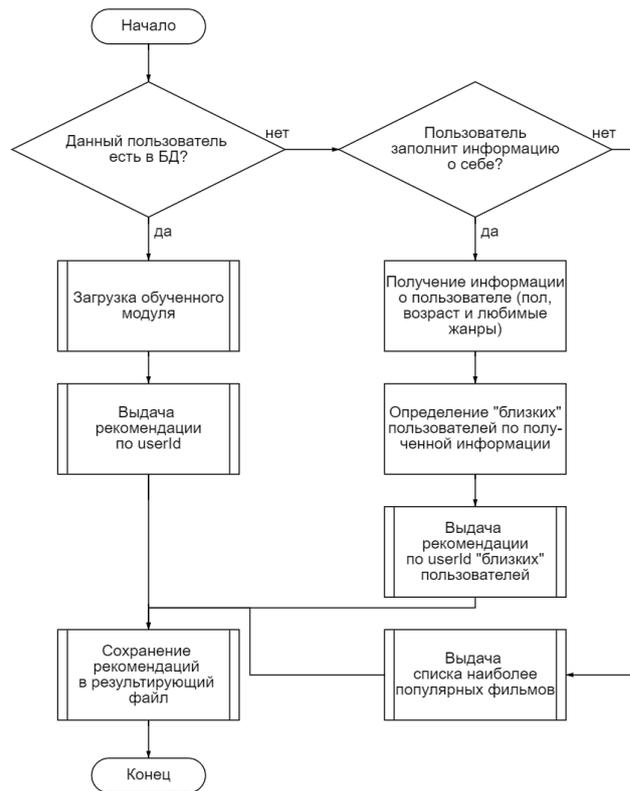


Рис. 3. Блок-схема алгоритма рекомендаций

Примечание: составлено авторами.

(уникальный идентификатор пользователя), `age` (возраст пользователя) и `sex` (пол пользователя);

– `movies` – таблица, в которой хранится информация о видеоконтенте, а точнее `movieId` (уникальный идентификатор), `title` (название видеоконтента), `genres` (жанр видеоконтента);

– `ratings` – таблица, в которой хранится информация об оценках пользователей, а точнее `userId` (уникальный идентификатор пользователя, который оставил оценку), `movieId` (уникальный идентификатор видеоконтента в сервисе), `rating` (оценка пользователя), `timestamp` (время, когда была поставлена оценка пользователем);

– `links` – таблица, в которой хранится информация об уникальном идентификаторе видеоконтента на крупных стриминговых площадках, а точнее `movieId` (уникальный идентификатор видеоконтента в сервисе MovieLens), `imdbId` (уникальный идентификатор видеоконтента в сервисе IMDb), `tmdbId` (уникальный идентификатор

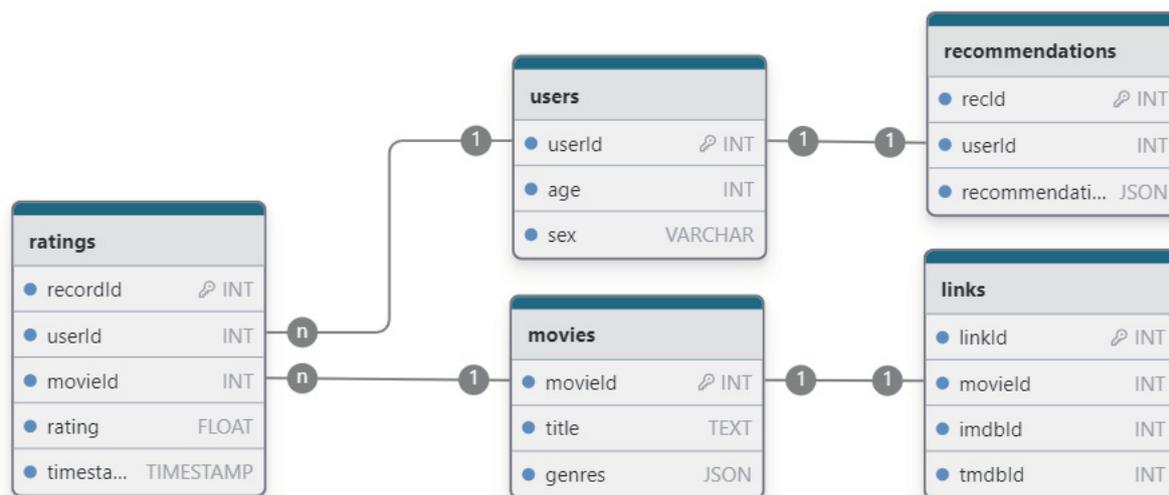


Рис. 4. Схема базы данных
Примечание: составлено авторами.

видеокартента в сервисе The Movie Database). Это сделано для будущей интеграции сервиса с другими системами, так как movieId предназначен только для внутренней БД, в то время как imdbId и tmdbId являются уникальными идентификаторами крупнейших внешних сервисов;

– recommendations – таблица, в которой хранится информация о рекомендации для пользователей, а точнее userId (уникальный идентификатор пользователя), recommendation (список с movieId, который предлагается для просмотра пользователю).

Связи в БД между таблицами:

– users.userId – ratings.userId (связь один ко многим), так как один человек может оставлять множество оценок на различный видеоконтент;

– movies.movieId – ratings.movieId (связь один ко многим), так как один фильм может иметь множество оценок от пользователей;

– users.userId – recommendations.userId (связь один к одному), так как один человек всегда имеет лишь один список рекомендаций в сервисе;

– movies.movieId – links.movieId (связь один к одному), так как у одного фильма лишь одна привязка на IMDB и TMDb.

В ходе разработки системы по выдаче рекомендаций была реализована административная панель для работы с моделью, а также для

небольших точечных изменений данных в БД. Графический интерфейс, он же GUI, представляет собой способ взаимодействия пользователя с компьютером с использованием графических элементов, например окон, кнопок и меню [20].

Реализованный графический интерфейс представлен на рис. 5.

На интерфейсе расположены кнопки со следующим функционалом.

1. Кнопка «Выдача рекомендаций», представленная на рис. 6, отвечает за формирование списка рекомендаций. Можно выбрать csv-файл с id пользователей либо запросить загрузку актуальных данных из БД.

2. С помощью кнопки «Пользователи», которая изображена на рис. 7, можно добавить или удалить пользователя из БД, сделана для небольших точечных изменений.

3. С помощью кнопки «Фильмы», представленной на рис. 8, можно добавить или удалить фильм из БД, сделана для небольших точечных изменений.

4. Кнопка «Рейтинг», которая изображена на рис. 9, позволяет добавить или удалить рейтинг фильма из БД, сделана для небольших точечных изменений.

5. Кнопка «Ссылки» продемонстрирована на рис. 10, дает возможность добавить или удалить ссылку на фильм из БД, сделана для небольших точечных изменений.

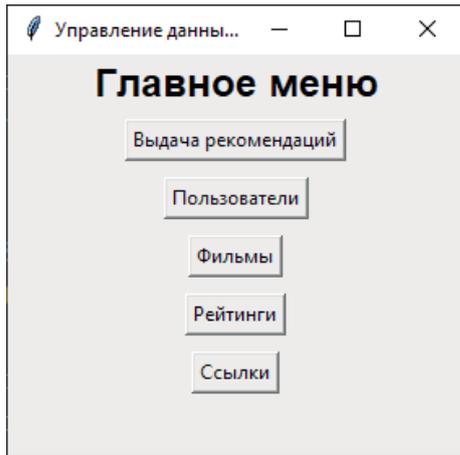


Рис. 5. Главное меню ПО
Примечание: составлено авторами.

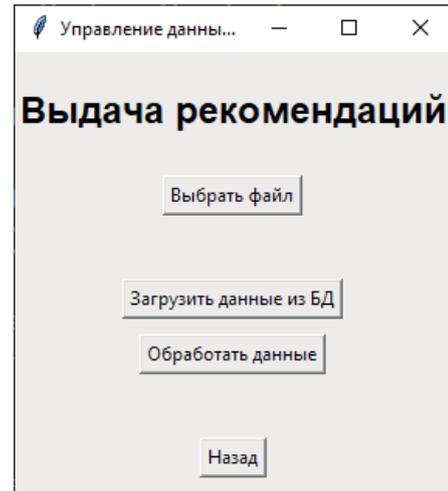


Рис. 6. Выбор действий по кнопке «Выдача рекомендаций»
Примечание: составлено авторами.

Данное меню было реализовано для небольших изменений данных. Для массовых изменений на стороне базы данных можно воспользоваться платформой pgAdmin или другими профильными инструментами.

Реализуем API рекомендательной системы для возможной будущей интеграции с существующими онлайн-кинотеатрами. Интерфейс реализован на базе библиотеки Flask.

Разработанный программный интерфейс приложения имеет следующие ссылки.

1./recommendations_client_service – get запрос для выдачи рекомендаций зарегистрированным пользователям в сервисе онлайн-ки-

нотеатра. Возвращает двухсотый код, а также json объект со списком фильмов (id, название, предполагаемая оценка пользователя), которые можно предложить человеку в качестве рекомендаций. В случае ошибки возвращает пятисотый код.

Имеет следующие параметры:

- user_id – id пользователя в сервисе онлайн-кинотеатра;
- num_recommendations (необязательный) – количество рекомендаций на одного пользователя, по умолчанию выдает 5 рекомендаций.

2./recommendations_no_client_service_by_model – get запрос для выдачи рекоменда-

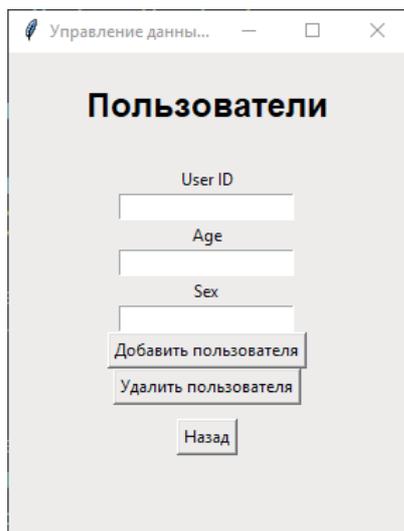


Рис. 7. Выбор действий по кнопке «Пользователи»
Примечание: составлено авторами.



Рис. 8. Выбор действий по кнопке «Фильмы»
Примечание: составлено авторами.

Рис. 9. Выбор действий по кнопке «Рейтинг»
Примечание: составлено авторами.

Рис. 10. Выбор действий по кнопке «Ссылки»
Примечание: составлено авторами.

ций незарегистрированным пользователям, но про которых есть информация об их поле, возрасте и любимых жанрах, полученная с другого сервиса, к которому в дальнейшем с помощью API будет подключена рекомендательная система. Возвращает двухсотый код, а также json объект со списком фильмов (id и название), которые можно предложить человеку в качестве рекомендаций. В случае ошибки возвращает пятисотый код.

Имеет следующие параметры:

- sex – пол пользователя;
- age – возраст пользователя;
- genres – любимые жанры в формате: genre1 |genre2 |...|genreN;
- num_recommendations (необязательный) – количество рекомендаций на одного пользователя, по умолчанию выдает 25 рекомендаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной магистерской диссертации была проведена разработка рекомендательной системы для онлайн-кинотеатров. Основное внимание уделялось сравнению и анализу трех типов рекомендательных систем: совместной фильтрации, гибридных систем и систем на архитектуре DLRM.

Для оценки качества работы каждого алгоритма использовались различные критерии, включая нагрузку на систему, объем потребляемой оперативной памяти, время,

затраченное на обучение модели, а также метрики качества рекомендаций: RMSE, MAE, FCP и MSE.

Проведенный анализ показал, что каждая из рассмотренных систем имеет свои сильные и слабые стороны. Совместная фильтрация продемонстрировала высокую точность рекомендаций при сравнительно низкой нагрузке на систему, но потребовала значительного времени на обучение модели. Гибридные системы показали хорошее соотношение между точностью и производительностью, комбинируя преимущества различных подходов. Система на архитектуре DLRM оказалась наиболее ресурсозатратной, однако она продемонстрировала наилучшую точность и гибкость в обработке большого объема данных.

На основе проведенного анализа и с использованием математических методов принятия решений был выбран наилучший алгоритм для реализации рекомендательной системы. Лидером оказалась система на архитектуре DLRM, обеспечившая оптимальное соотношение между точностью рекомендаций и производительностью системы.

Реализация выбранного алгоритма включала в себя несколько этапов: разработку самого алгоритма, проектирование базы данных для хранения и обработки данных, создание графического интерфейса пользователя и разработку

API для интеграции рекомендательной системы с другими компонентами онлайн-кинотеатра.

Разработанная система на архитектуре DLRM показала высокие результаты по точности и качеству рекомендаций, что подтверждает возможность ее использования в реальных условиях.

Список источников

1. Глубокое погружение в рекомендательную систему Netflix. Хабр : офиц. сайт. URL: <https://habr.com/ru/articles/677396/> (дата обращения: 24.06.2024).
2. 10 Remarkable Real-World Examples of Recommender Systems. URL: <https://appstekcorp.com/blog/10-remarkable-real-world-examples-of-recommender-systems/> (дата обращения: 24.06.2024).
3. Deep Dive into Netflix's Recommender System. Medium. URL: <https://towardsdatascience.com/deep-dive-into-netflixs-recommender-system-341806ae3b48> (дата обращения: 24.06.2024).
4. How retailers can keep up with consumers. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/how-retailers-can-keep-up-with-consumers> (дата обращения: 24.06.2024).
5. Recommender systems: benefits and practical guidelines for software professionals. URL: <https://swforum.eu/online-sw-forum/software-technology/6/recommender-systems-benefits-and-practical-guidelines> (дата обращения: 24.06.2024).
6. Python: Skillfactory media. Честные истории о карьере в IT. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/python/> (дата обращения: 24.06.2024).
7. Библиотека NumPy: всё, что нужно знать новичку. URL: <https://skillbox.ru/media/code/biblioteka-numpy-vsye-chto-nuzhno-znat-novichku/> (дата обращения: 24.06.2024).
8. Работаем с Pandas: основные понятия и реальные данные. URL: <https://skillbox.ru/media/code/rabotaem-s-pandas-osnovnye-ponyatiya-i-realnye-dannye/> (дата обращения: 24.06.2024).
9. Библиотека Scikit-learn: как создать свой первый ML-проект. Skillbox. URL: <https://skillbox.ru/media/code/biblioteka-scikitlearn-kak-sozdat-svoy-pervyy-mlproekt/> (дата обращения: 24.06.2024).
10. Keras: библиотека глубокого обучения на Python. URL: <https://ru-keras.com/home/> (дата обращения: 24.06.2024).
11. Overview. A Python scikit for recommender systems. URL: <https://surpriselib.com/> (дата обращения: 24.06.2024).
12. csv – CSV File Reading and Writing. URL: <https://docs.python.org/3/library/csv.html> (дата обращения: 24.06.2024).
13. Библиотека os. Все о Python. Программирование на Python 3. URL: <https://all-python.ru/osnovy/os.html> (дата обращения: 24.06.2024).

Таким образом, задачи, поставленные в начале исследования, были успешно решены, а цель достигнута. Результаты данной работы могут служить основой для дальнейших исследований в области рекомендательных систем и их применения в различных сферах, связанных с подбором персонализированного контента.

References

1. Glubokoe pogruzhenie v rekomendatelnuyu sistemu Netflix. URL: <https://habr.com/ru/articles/677396/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
2. 10 Remarkable Real-World Examples of Recommender Systems. 2023. URL: <https://appstekcorp.com/blog/10-remarkable-real-world-examples-of-recommender-systems/> (accessed: 24.06.2024).
3. Deep Dive into Netflix's Recommender System: Medium. URL: <https://towardsdatascience.com/deep-dive-into-netflixs-recommender-system-341806ae3b48> (accessed: 24.06.2024).
4. How retailers can keep up with consumers. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/how-retailers-can-keep-up-with-consumers> (accessed: 24.06.2024).
5. Recommender systems: benefits and practical guidelines for software professionals. URL: <https://swforum.eu/online-sw-forum/software-technology/6/recommender-systems-benefits-and-practical-guidelines> (accessed: 24.06.2024).
6. Python. Skillfactory media. Chestnyye istorii o karyere v IT. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/python/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
7. Biblioteka NumRu: vsyo, chto nuzhno znat novichku. URL: <https://skillbox.ru/media/code/biblioteka-numpy-vsye-chto-nuzhno-znat-novichku/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
8. Rabotaem s Pandas: osnovnye ponyatiya i realnye dannye. URL: <https://skillbox.ru/media/code/rabotaem-s-pandas-osnovnye-ponyatiya-i-realnye-dannye/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
9. Biblioteka Scikit-learn: kak sozdat svoj pervy ML-proekt. Skillbox. URL: <https://skillbox.ru/media/code/biblioteka-scikitlearn-kak-sozdat-svoy-pervyy-mlproekt/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
10. Keras: biblioteka glubokogo obuchenie na Python. URL: <https://ru-keras.com/home/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
11. Overview. A Python scikit for recommender systems. URL: <https://surpriselib.com/> (accessed: 24.06.2024).
12. csv – CSV File Reading and Writing. URL: <https://docs.python.org/3/library/csv.html> (accessed: 24.06.2024).
13. Biblioteka os: Vse o Python. Programmirovaniye na Python 3. URL: <https://all-python.ru/osnovy/os.html> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).

14. time – Time access and conversions. URL: <https://docs.python.org/3/library/time.html> (дата обращения: 24.06.2024).
15. psutil documentation. URL: <https://psutil.readthedocs.io/en/latest/index.html> (дата обращения: 24.06.2024).
16. Фреймворк Flask: как он работает и зачем нужен. URL: <https://skillbox.ru/media/code/freymvork-flask-kak-on-rabotaet-i-zachem-nuzhen/> (дата обращения: 24.06.2024).
17. How to Connect and Operate PostgreSQL with Python Using psycopg2 Lib. URL: <https://geekpython.in/integrate-postgresql-database-in-python> (дата обращения: 24.06.2024).
18. tkinter – Python interface to Tcl/Tk. URL: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (дата обращения: 24.06.2024).
19. pickle – Python object serialization. URL: <https://docs.python.org/3/library/pickle.html> (дата обращения: 24.06.2024).
20. GUI: Skillfactory media. Честные истории о карьере в IT. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/gui/> (дата обращения: 24.06.2024).
14. time – Time access and conversions. URL: <https://docs.python.org/3/library/time.html> (accessed: 24.06.2024).
15. psutil documentation. URL: <https://psutil.readthedocs.io/en/latest/index.html> (accessed: 24.06.2024).
16. Freymvork Flask: kak on rabotaet i zachem nuzhen. URL: <https://skillbox.ru/media/code/freymvork-flask-kak-on-rabotaet-i-zachem-nuzhen/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).
17. How to Connect and Operate PostgreSQL with Python Using psycopg2 Lib. URL: <https://geekpython.in/integrate-postgresql-database-in-python> (accessed: 24.06.2024).
18. tkinter – Python interface to Tcl/Tk. URL: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (accessed: 24.06.2024).
19. pickle – Python object serialization. URL: <https://docs.python.org/3/library/pickle.html> (accessed: 24.06.2024).
20. GUI: Skillfactory media. Chestnyye istorii o karyere v IT. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/gui/> (accessed: 24.06.2024). (In Russ.).

Информация об авторах

К. Е. Кожихова – аспирант.

Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент.

И. В. Чалей – доктор технических наук, профессор.

About the authors

K. E. Kozhikhova – Postgraduate.

D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

I. V. Chaley – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.



Оценка информационной избыточности модулярных процессоров

Александр Алексеевич Кузнецов
ПАО «Сургутнефтегаз», Сургут, Россия
vip.kuznecov@mail.ru

Аннотация. В 70–80-х гг. прошлого века ученые Казахстана, работающие в институтах Академии наук, провели исследование относительно потенциала применения системы остаточных классов в совокупности с троичной системой счисления. Их цель заключалась в разработке специализированных устройств для обработки данных. В рамках этого исследования они стремились создать эффективный способ представления комплексных чисел и кватернионов в специфических форматах. В ходе исследований выяснилось, что для уменьшения избыточности информации при отображении элементов модулярных векторов в цифровых регистрах, которые задействуют троичный элементный базис, можно использовать комбинацию, состоящую из системы остаточных классов и с троичной системой счисления.

Ключевые слова: вычеты по модулю, модулярные коды, тривалентный эффект, троичное числовое представление

Для цитирования: Кузнецов А. А. Оценка информационной избыточности модулярных процессоров // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 53–59. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-5>.

Original article

Assessment of information redundancy of modular processors

Aleksandr A. Kuznetsov
“Surgutneftegas” PJSC, Surgut, Russia
vip.kuznecov@mail.ru

Abstract. In the 70s–80s of the last century, scientists of Kazakhstan working in the institutes of the Academy of Sciences conducted a study of potential applications of the residue number system in conjunction with a ternary number system. Their aim was to develop specialized devices for data processing. As part of that study, they sought to create an efficient way to represent complex numbers and quaternions in specialized formats. The use of this combination made it possible to reduce information redundancy when displaying modular vectors in digital registers that use a ternary element base.

Keywords: modulo deductions, modular codes, trivalent effect, ternary numerical representation

For citation: Kuznetsov A. A. Assessment of information redundancy of modular processors. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):53–59. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-5>.

ВВЕДЕНИЕ

В 1960-х г. профессор МГУ С.В. Фомин выдвинул основополагающую концепцию, согласно которой в позиционной системе счисления присутствует оптимальное основание. Выбор оптимального основания позво-

ляет минимизировать количество символов, необходимых для представления конечного числа информационных единиц. Это основание – натуральный логарифм (e), который равен приблизительно 2,71828. Сравнение с традиционными системами счисления пока-

зывает, что троичная система является одной из систем счисления, которые наиболее близки к этому оптимальному основанию. Действительно, неравенство вида выполняется. Троичная система счисления, в свою очередь, повышает информационную емкость по сравнению с двоичной, поэтому возможно представлять дискретные данные с использованием регистра с тем же количеством цифр. Эта особенность привлекает разработчиков вычислительных систем, поскольку троичная система потенциально предлагает более эффективное представление и обработку данных. Использование трех значений в троичной системе обеспечивает повышенную плотность хранения данных по сравнению с двоичной, которая использует только два значения. Это может привести к уменьшению требуемой памяти и более эффективному использованию доступных ресурсов. Однако реализация троичной системы счисления в современных вычислительных устройствах сталкивается с определенными трудностями.

Основным недостатком троичных систем являются большие затраты на аппаратуру. Троичная логика требует более сложных схем и элементов, чем двоичная. Это связано с необходимостью обрабатывать три состояния сигнала вместо двух. Недостатком троичной системы счисления является меньшая надежность обработки трех состояний в элементе памяти в отличие от двоичной, где существуют лишь два состояния. Однако, несмотря на недостатки троичной системы, исследуются возможности и производятся совершенствования вычислительных устройств для оптимальной реализации троичной системы счисления. Исследования в этой области продолжаются, и троичная система может стать ключевым фактором в создании новых, более эффективных вычислительных устройств будущего.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применение троичной системы счисления в модулярном кодировании дискретной информации

В середине 70-х годов ученые столкнулись с определенными проблемами при приме-

нении различных цифровых решений, а также использовании развивающихся инновационных решений, которые основываются на представлении информации в модулярном формате [1]. Этот подход подразумевал использование арифметических операций в различных модулях для повышения вычислительной эффективности и обеспечения устойчивости к ошибкам. Рассматривая эволюцию процессорных технологий, можно выделить внедрение специализированных форматов данных для обработки комплексных чисел.

В этот период происходило интенсивное исследование новых сфер применения модулярной арифметики. В рамках плодотворного сотрудничества между неправительственными организациями – «Алмазом» и Институтом математики и механики Академии наук Казахской ССР (ИММ АН КазССР), а также «Астрофизикой» из Москвы – реализовывались несколько проектов. В данных проектах использовались инновационные математические подходы, такие как комплексные числа и кватернионы, при моделировании динамики летательных аппаратов. В свою очередь, комплексные числа – числа, которые можно представить в виде суммы действительного и мнимого чисел, где мнимое число равно произведению действительного числа и квадратного корня из -1 (i), а кватернионы – четырехмерные числа, которые можно представить в виде суммы действительного числа и трех мнимых чисел, каждое из которых связано с разными воображаемыми единицами (i, j, k). Вычисления в обсуждаемых исследовательских проектах выполнялись посредством арифметики по модулю, которая представляет собой математический метод, позволяющий производить арифметические операции с числами, используя их представления по модулю набора выбранных простых чисел [2].

В период своего сотрудничества с Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова академик В.М. Амербаев заинтересовался троичной системой счисления, применяемой в созданных там ЭВМ «Сетунь» и «Сетунь-70» [3]. Исследования коллег

из ведущего российского вуза, Московского государственного университета, обладавших обширным практическим опытом в сфере оптимизации информационных процессов, послужили катализатором для изучения перспектив интеграции троичной системы счисления и системы остаточных классов. Результаты проведенных изысканий показали, что этот подход обладает потенциалом для повышения эффективности представления числовых данных в модулярной форме, способствуя сокращению избыточности информации.

Уникальные особенности модулярной арифметики включают возможность отдельного проведения операций над числовыми элементами векторных представлений, а также способствуют созданию кодов для контроля целостности обрабатываемых данных в модулярных формах, которые устойчивы к помехам [4].

Данные, представленные в виде модулярных форматов в регистрах двоичной и троичной системах счисления, вызывают проблему чрезмерной избыточности представления.

Использование модулярной арифметики в работе специализированных цифровых устройств, таких как процессоры, ведет к решению первоочередной задачи, а именно выбор оснований для отображения пар взаимно простых чисел. Данные, обрабатываемые в этих устройствах, представляются в модулярном формате, и каждый элемент является остатком от деления на модуль. Модулярная арифметика находит применение в различных областях, таких как криптография, кодирование и теория чисел.

В основном все электронные устройства разработаны с использованием двоичных элементов. Модулярный вектор применяется с целью отображения числовых значений в формате модулярной арифметики, компоненты этого вектора представлены в формате двоичных регистрах. Существует следующая проблема: не все комбинации бинарных величин в регистре способны отображать значения вычетов по взаимно простым основаниям. Таким образом, появляется эффект, который называют бивалентным отображением вычетов

по основаниям, то есть информационной избыточностью [5].

В стенах Академии наук Казахской ССР группа разработчиков, специализирующихся на цифровых фильтрах и контроллерах, столкнулась с непростым вызовом. В поисках решения они обратили внимание на троичную систему счисления, отличающуюся высокой информационной емкостью. Суть их идеи заключалась в том, чтобы оценить так называемый тривалентный эффект – избыточность, возникающую при представлении чисел в троичной системе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пусть A – некоторый вектор в модулярной арифметике, представляющий числовое значение:

$$A(\text{mod}P) \leftrightarrow (a_1 \text{ mod } p_1 \dots a_n \text{ mod } p_n),$$

где a_i наименьший неотрицательный вычет по модулю,

$\{p_1, \dots, p_n\}$ – множество простых или взаимно простых чисел, которые называются основаниями модулярной арифметики.

Верхняя грань числового значения вычислительного диапазона модулярной арифметики вычисляется по формуле:

$$P = \prod_1^n p_i. \quad (1)$$

Введем новое понятие для явления тривалентного эффекта в отношении единичного основания δ_i , а также понятие для полного числового вычислительного диапазона, обозначив его как Δ_n с n -регистровой троичной разрядной сетки модулярного процессора:

$$\delta_i = [\log_3 p_i] - \log_3 p_i = n_i - \log_3 p_i \geq 0,$$

$$\Delta_n = \sum_1^n \delta_i,$$

где выражение $n_i = [\log_3 p_i]$ – целая не меньшая часть, которая будет равна троичной разрядности регистра для отображения вычета по определенному основанию.

При использовании специально подобранных базисов, которые были определены с использованием троичной системы счисления, возможно значительное уменьшение проблемы

информационной избыточности. Вследствие этого возможно достижение тривалентного эффекта, а также нулевой избыточности.

Рассмотрим пример, в котором определим следующие тритовые основания: $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\} = \{229, 233, 239, 241, 242, 243 = 3^5\}$, где числовое значение глубины разрядной сетки будет составлять 30 трит. Вычислим значение вычислительного диапазона по формуле (1), полученное значение равно $180'729'058'527'458$ и превышает $8'630'377'364'883$, или 3^{29} [6, 7]. В двоичной разрядной сетке для отображения полученного диапазона потребуется 48 бит. Характеристики выбранных тритовых модулярных оснований приведены в табл. 1 [7].

Вычислить информационную избыточность для каждого регистра можно следующим образом, используя представленную ниже формулу [7]:

$$3^{n_i} - \rho_i,$$

где 3^{n_i} – объем данных, отображаемый в тричной системе счисления, а ρ_i – это модулярное основание.

Следующая формула позволяет вычислить относительный информационный эффект [7]:

$$(3^{n_i} - \rho_i)/3^{n_i}, \quad (2)$$

где 3^{n_i} – объем данных, отображаемый в тричной системе счисления, а ρ_i – это модулярное основание.

Для данного случая вычислим значение информационной избыточности по формуле (2), получим: $(205'891'132'094'649 - 180'729'058'527'458)/205'891'132'094'649 = 12,22\%$.

Если сравнить вычисленное значение показателя с вариантом выбора, где основание с аналогичной длиной разрядной сетки, в разработанных двоичных вычислительных машинах, можно увидеть, что полученный показатель гораздо меньше.

Рассмотрим пример, в котором определим следующие тритовые основания: $= \{193, 223, 229, 243, 257, 263, 293\}$ с центральным основанием, равным 243. Получим глубину разрядной сетки, равную 35 тритам. Вычислим значение вычислительного диапазона по формуле (1), получим значение, равное $47'430'796'761'902'979$ и превышающее $16'677'181'699'666'568$, или 3^{35} . В двоичной разрядной сетке для отображения полученного диапазона потребуется 55 бит. В табл. 2 приведены ключевые особенности, определяющие выбор тритовых модулярных оснований.

Рассмотрим пример, в котором определим следующие тритовые основания: $= \{2137,$

Таблица 1

Модулярные основания тричного варианта

Характеристика	1	2	3	4	5	6
Процессорные разряды	1–5	6–10	11–15	16–20	21–25	25–30
Модулярные основания	229	233	239	241	242	243
Количество используемых трит	5	5	5	5	5	5
Значение тривалентного эффекта	0,054	0,038	0,015	0,008	0,004	0,000
Информационная избыточность	0,058	0,041	0,016	0,008	0,004	0,000

Примечание: составлено на основе источника [7].

Таблица 2

Модулярные основания тричного варианта с центральным основанием 243

Наименование характеристик	1	2	3	4	5	6	7
Процессорные разряды	1–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30	31–35
Модулярные основания	193	223	229	243	257	263	293
Количество используемых трит	5	5	5	5	5	5	5
Значение тривалентного эффекта	0,210	0,078	0,054	0,000	0,054	0,078	0,210
Информационная избыточность	0,206	0,082	0,058	0,000	0,058	0,082	0,206
Знак информационной избыточности	+	+	+		-	-	-

Примечание: составлено авторами.

2153, 2161, 2187, 2213, 2221, 2237} с центральным основанием равным 243. Получим глубину разрядной сетки, равную 49 тритам. Вычислим значение вычислительного диапазона по формуле (1), получим значение, равное $239'303'919'038'536'791'602'541$, или 3^{48} . В двоичной разрядной сетке для отображения полученного диапазона потребуется 78 бит. Табл. 3 содержит сведения о специфике выбора тритовых модулярных оснований, используемых в этом процессе.

Из табл. 2 и 3 можно сделать вывод, что попарно взаимно простые модулярные основания, симметрично расположенные относительно центрального основания, имеют одинаковые значения информационной избыточности, но различаются по знаку, благодаря чему достигается нулевая суммарная информационная избыточность.

В дальнейшем был разработан способ, основанный на выборе попарно взаимно простых оснований модулярной арифметики. Данный способ направлен на уменьшение тривалентного эффекта. Такой выбор способствует значительному сокращению избыточности информации, а в некоторых случаях вообще достичь ее отсутствия.

При сравнении информационной избыточности в табл. 1 с табл. 2 и 3 можно сделать вывод, что при выборе попарно взаимно простых оснований, симметрично расположенных относительно центрального основания, достигается меньшая информационная избыточность. При достижении нулевого тривалентного эффекта также достигается нулевая информационная избыточность.

Тривалентный эффект отображения вычетов по модулю – уникальная особенность, которая проявляется в случае использования регистров в качестве хранилищ и манипуляторов информации.

В период с 1962 по 1963 гг. в стенах Научно-исследовательского института НИИ-37 Зеленоградского научного центра микроэлектроники была разработана опытная модель вычислительной машины ЦВМТ340 А. Эта машина использовала уникальную модулярную арифметику, которая стала основой для дальнейших разработок. В 1963 г. произошла существенная модернизация ЦВМТ340 А, в результате которой появилась ЦВМК340 А – модулярная машина, производство которой было налажено и продолжалось до середины 70-х гг. [7]. Результаты исследований, полученные в ходе разработки вычислительной машины ЦВМК340 А, послужили основой для создания модулярной системы «Алмаз» в 1968 г. Отличительной особенностью этих систем стала реализация двоичной логики с 45-разрядной разрядностью модулярного процессора. Такая архитектура обеспечивала высокую производительность на задачах, характеризующихся повышенной сложностью.

Исследователи разработали новый метод, который позволяет эффективно бороться с тривалентным эффектом – распространенной проблемой в работе регистров. Этот эффект возникает из-за ограничения емкости регистра, что приводит к искажению информации при обработке больших чисел. Суть нового метода заключается в использовании симметричных модулярных оснований, которые представляют

Таблица 3

Модулярные основания тричного варианта с центральным основанием 2187

Наименование характеристик	1	2	3	4	5	6	7
Процессорные разряды	1–7	8–14	15– 21	22– 28	29–35	36–42	43–49
Основания	2137	2153	2161	2187	2213	2221	2237
Количество используемых трит	7	7	7	7	7	7	7
Значение тривалентного эффекта	0,021	0,014	0,011	0,000	0,011	0,014	0,021
Информационная избыточность	0,023	0,016	0,012	0,000	0,012	0,016	0,023
Знак информационной избыточности	+	+	+		-	-	-

Примечание: составлено авторами.

собой попарно взаимно простые друг к другу и симметричные относительно степени двойки или тройки. При этом избыточная информация, возникающая при обработке больших чисел, «перераспределяется» между этими основаниями. То есть часть информации, превышающая емкость одного регистра, запоминается в другом регистре, использующем другое основание. Такой подход позволяет избежать потерь информации и минимизировать влияние тривалентного эффекта.

В области анализа и разработки компьютерных систем существует проблема регистрового эффекта и информационной избыточности модулярных процессов.

Рассмотрим эту проблему на примере модулярных процессоров типа 41–50 «Лидер», К340 А, 5Э53, «Алмаз», ЦВМ Т340 А. Характеристики разрядной сетки, в частности ее параметрические значения, представлены в табл. 4 и 5 [7].

В двоичной разрядной сетке для отображения вычислительного диапазона потребуется 42 бита. Табл. 5 содержит исчисленное численное значение информационной избыточности, равное, для этой разрядности модулярного процессора в составе ЦВМ [7].

Информационной избыточностью, равной 78,4%, обладает двоичный модулярный про-

цессор. В свою очередь, проектируемый троичный модулярный процессор обладает гораздо меньшей избыточностью [7].

В ходе дальнейших исследований был предложен инновационный подход к устранению тривалентного эффекта и перераспределению избыточности в симметричных модулярных базах, что позволило смягчить негативные последствия этого эффекта.

Данный подход опирается на отбор взаимно простых пар модулей, которые будут симметрично расположены от центрального модуля, и обеспечивает возможность использования избыточности одних оснований для того, чтобы представить числовые значения вычетов, которые выходят за пределы емкости разрядов регистра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Патент предлагает техническое решение, которое оптимизирует способ хранения данных в цифровом регистре [8]. Вместо того чтобы размещать группы чисел в однородных блоках одинаковой длины, как это делалось традиционно, данное решение позволяет сократить информационную избыточность. Это достигается за счет более эффективного использования доступного пространства для хранения данных.

Таблица 4

Модулярные основания для двоичного варианта

Разряды бинарного процессора	1	2–4	5–9	10–15	16–20	21–25	26–30	31–34	35–39	40–45
Модулярные основания	2	5	23	63	17	19	29	13	31	61
Разрядность регистров	1	3	5	6	5	5	5	4	5	6
Бивалентный эффект	0	0,678	0,476	0,023	0,913	0,752	0,142	0,300	0,046	0,069
Информационная избыточность	0	0,375	0,281	0,016	0,469	0,406	0,094	0,188	0,031	0,047
% информационной избыточности	0	37,50	28,13	1,56	46,88	40,63	9,38	18,75	3,13	4,69

Примечание: составлено на основе источника [7].

Таблица 5

Вычислительные диапазоны модулярных ЦВМ для двоичного варианта

Вычислительный диапазон	3336597244890
Разрядность бинарная реальная	45
Разрядность бинарная необходимая	42
Избыточность бинарного диапазона	35184372088801
Бивалентный эффект	3,398
Информационная избыточность	0,784

Примечание: составлено на основе источника [7].

Выбор взаимно простых оснований, симметрично расположенных относительно центрального основания, позволяет достигать меньшей информационной избыточности, а в некоторых случаях и нулевой информационной избыточности.

Данное решение не только оптимизирует процесс проектирования, но и делает его более эффективным. Оно позволяет создавать однородные блочные регистры, являющиеся фунда-

ментом для разрядной сетки вычислительной машины, с помощью более совершенных методов. Это достигается благодаря новому подходу к структуре регистра, который упрощает ее, и оптимизированному размещению данных, что позволяет сократить затраты на разработку и производство. В результате процесс проектирования становится более эффективным и экономичным, а создаваемые вычислительные машины – более надежными и эффективными.

Список источников

1. Магомедов Ш. Г. Преобразование представлений чисел в модулярной арифметике в системах остаточных классов с разными основаниями // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 4. С. 32–39.
2. Акушский И. Я., Амербаев В. М., Пак И. Т. Основы машинной арифметики комплексных чисел. Алма-Ата : Наука, 1970. 248 с.
3. Амербаев В. М., Пак И. Т. Параллельные вычисления в комплексной плоскости. Алма-Ата : Наука, 1984. 183 с.
4. Инютин С. А. Основы модулярной алгоритмики : моногр. Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2009. 297 с.
5. Амербаев В. М., Тельпухов Д. В., Константинов А. В. Бивалентный дефект модулярных кодов. Выбор технологичных модулей, понижающий бивалентный дефект // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2008. с. 462–465.
6. Инютин С. А. Модулярные вычисления для задач большой алгоритмической сложности. URL: <https://computer-museum.ru/books/archiv/sokcon06.pdf> (дата обращения: 01.11.2024).
7. Инютин С. А. Модулярные процессоры – оценки, история борьбы и победы над бивалентным дефектом // Развитие вычислительной техники в России и странах бывшего СССР: история и перспективы SoRuCom-2017 : сб. тр. IV Междунар. конф., 3–5 октября 2017 г., г. Зеленоград, М. : ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2017. 427 с. URL: https://www.sorucm.org/pdf/SORUCOM_2017.pdf (дата обращения: 15.11.2024).
8. Инютин С. А. Способ и устройство размещения групп чисел в однородных блоках цифрового регистра : патент 2015109196/08 Рос. Федерация №2591009; заявл. 17.03.2015; опубл. 10.07.2016. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2591009C1_20160710.pdf (дата обращения: 15.11.2024).

Информация об авторе

А. А. Кузнецов – инженер-программист I категории.

References

1. Magomedov Sh. G. Conversion of numeration in modular arithmetic in the systems of residual classes with different bases. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics*. 2014;(4):32–39. (In Russ.).
2. Akushskiy I. Ya., Amerbaev V. M., Pak I. T. Osnovy mashinnoy arifmetiki kompleksnykh chisel. Alma-Ata: Nauka; 1970. 248 p. (In Russ.).
3. Amerbaev V. M., Pak I. T. Parallelnye vychisleniya v kompleksnoy oblasti. Alma-Ata: Nauka; 1984. 183 p. (In Russ.).
4. Inyutin S. A. Osnovy modulyarnoy algoritmiki. Khandy-Mansiysk: Poligrafist; 2009. 297 p. (In Russ.).
5. Amerbaev V. M., Telpukhov D. V., Konstantinov A. V. Bivalentnyi defekt moduliarnykh kodov. Vybortekhnologichnykh modulei, ponizhaiushchii bivalentnyi defekt. *Problems of Advanced Micro and Nanoelectronic Systems Development*. 2008. P. 462–465. (In Russ.).
6. Inyutin S. A. Modulyarnye vychisleniya dlya zadach bolshoy algoritmicheskoy slozhnosti. URL: <https://computer-museum.ru/books/archiv/sokcon06.pdf> (accessed: 01.11.2024). (In Russ.).
7. Inyutin S. A. Moduliarnye protsessory – otsenki, istoriia borby i pobedy nad bivalentnym defektom. In: *Proceedings of the SoRuCom-2017. 4th International Conference “Computer Technology in Russia and in the Former Soviet Union”*, October 3–5, 2017, Zelenograd. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2017. 427 p. URL: https://www.sorucm.org/pdf/SORUCOM_2017.pdf (accessed: 15.11.2024). (In Russ.).
8. Inyutin S. A. Method and Device for Arrangement of Groups of Numbers in Homogeneous Units of Digital Register: RU Patent 2015109196/08 No. 2591009, filed March 17, 2015; issued July 10, 2016. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2591009C1_20160710.pdf (accessed: 15.11.2024). (In Russ.).

About the author

A. A. Kuznetsov – Software Engineer of Category 1.

Научная статья
УДК 004.056.55
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-6>



Анализ и сравнение блочных алгоритмов симметричного шифрования

Иван Владиславович Поддубный¹, **Михаил Яковлевич Брагинский²**

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

¹ivan_poddubnyy01@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2985-0871>

²mick17@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

Аннотация. В современном мире криптография стала неотъемлемой частью информационной безопасности. В условиях постоянного развития технологий и увеличения объемов, передаваемых данных, необходимость их надежной защиты становится крайне актуальной. Эта статья посвящена сравнительному анализу современных симметричных алгоритмов шифрования. Критериями сравнения были приняты безопасность, сложность, производительность, применимость, а также стандартизация.

Ключевые слова: криптоанализ, блочное шифрование, симметричные алгоритмы шифрования, криптоалгоритмы, сравнение алгоритмов, производительность

Для цитирования: Поддубный И. В., Брагинский М. Я. Анализ и сравнение блочных алгоритмов симметричного шифрования // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23. № 4. С. 60–68. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-6>.

Original article

Analysis and comparison of block symmetric encryption algorithms

Ivan V. Poddubnyy¹, **Mikhail Ya. Braginsky²**

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

¹ivan_poddubnyy01@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2985-0871>

²mick17@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>

Abstract. In modern world, cryptography has become an essential part of the information security. With the constant development of technologies and increasing volumes of transmitted data, the necessity of their reliable protection becomes extremely urgent. This article is devoted to a comparative analysis of modern symmetric encryption algorithms. The comparison criteria are security, complexity, performance, applicability, and standardization.

Keywords: cryptanalysis, block encryption, symmetric encryption algorithms, cryptoalgorithms, algorithm comparison, performance

For citation: Poddubnyy I. V., Braginsky M. Ya. Analysis and comparison of block symmetric encryption algorithms. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):60–68. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-6>.

ВВЕДЕНИЕ

Сложно спорить с тем, что криптография играет одну из главных ролей в защите информации в цифровом мире. Вопросы, связанные с криптобезопасностью, стали особенно актуальны с появлением исследований квантовых вычислений. Симметричное шифрование является крайне распространенным за счет своих особенностей, связанных с высокой эффективностью, позволяющим не терять производительность даже при увеличении скорости обмена информацией.

Цель данного исследования заключается в сравнительном анализе алгоритмов симметричного шифрования блочного типа. Задачи исследования включают: оценку устойчивости алгоритмов к различным видам атак, анализ требований к ресурсам, производительности, а также оценку сложности реализации конкретных алгоритмов.

Несмотря на значительное количество исследований в этой теме, некоторые вопросы требуют дополнительного изучения. Например, вопросы, связанные с совместимостью алгоритмов шифрования с современными протоколами передачи данных, и их адаптация к новейшим угрозам безопасности. Нельзя также не обратить внимание на вопрос производительности алгоритмов в различных условиях их применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существуют два основных типа симметричных алгоритмов: блочные и потоковые шифры. Блочный шифр оперирует блоками открытого и зашифрованного текстов, размер которых зачастую равен 64 бита. Поточковый шифр взаимодействует с открытым и зашифрованным текстом, обрабатывая по одному биту, байту или слову из 32 бит. Главной особенностью, отличающей один тип от другого, можно считать тот факт, что блочный шифр преобразует один и тот же блок открытого текста в один и тот же блок шифротекста, а потоковый шифр один и тот же символ при каждом шифровании превращает в разные символы шифротекста. В этой работе рассматриваются алгоритмы блочного типа.

Данное исследование касается трех блочных алгоритмов шифрования: Data Encryption Standard (далее – DES), FEAL (Fast data Encipherment Algorithm) и ГОСТ 28147-89. Эти алгоритмы были выбраны в связи с их широкой применяемостью и значимостью в области информационной безопасности.

Алгоритм DES, разработанный в 1975 г. и принятый как стандарт годом позже, представляет собой блочный шифр, оперирующий 64-битовыми блоками. То есть на вход алгоритму поступает открытый текст длиной 64 бита, а в результате работы алгоритма на выходе получится 64 бита зашифрованного текста. Длина ключа, используемого при шифровании, равняется 56 битам. Причем он представляется в виде 64-битовой числовой последовательности, но каждый восьмой бит является битом проверки на четность для проверки правильности ключа.

Алгоритм DES использует исключительно стандартную арифметику и логические операции над блоками, что позволяло легко реализовывать его даже на аппаратуре 1970-х годов. В нем применяются два основных метода шифрования: смещение и перестановка. Такая комбинация этих методов повторяется 16 раз, то есть выполняется 16 раундов. Причем для каждого нового раунда исходный 56-битный ключ используется для генерации новых наборов 48-битных подключей, используя специальную заданную последовательность перестановок.

Перед первой и после заключительной перестановки выполняется специальная перестановка, при которой входной блок представляется по заданной последовательности перестановок. Важно отметить, что заключительная перестановка является обратной по отношению к начальной, что позволяет использовать один и тот же алгоритм как для шифрования, так и для расшифровки. Затем блоки разделяются на две 32-битовые последовательности: левую и правую. Затем выполняется 16 раундов. Затем происходят операции перестановки с расширением, операция XOR с ключом, подстановка с помощью S-блоков и прямая перестановка.

Расширяющая перестановка позволяет расширить правую половину данных с 32 бит до 48. Основной криптографической целью данной операции является усиление лавинного эффекта, из-за которого возрастает зависимость битов результата от битов исходных данных за счет влияния одного бита на две подстановки. То есть алгоритм DES спроектирован так, чтобы зависимость каждого бита шифротекста от каждого бита открытого текста и каждого бита ключа возникала как можно раньше.

Подстановка с помощью S-блоков представляет из себя восемь таблиц (эти таблицы являются константами и доступны во многих источниках, например [1]), состоящих из четырех строк и шестнадцати столбцов. Каждый элемент является 4-битовым числом. 48-битовое сообщение делится на каждый из восьми S-блоков и преобразуется по следующему правилу: из 6 бит на входе S-блока берется первый и шестой бит, они объединяются и образуют 2-битовое число, которое соответствует строке таблицы, а биты со второго по пятый образуют 4-битовое число, которое соответствует столбцу. Найденное 4-битовое число и является искомой подстановкой. Важно отметить, что подстановка с помощью S-блоков является ключевым этапом всего алгоритма DES, так как другие этапы алгоритма являются линейными и поддаются анализу. В свою очередь, описанные подстановки являются нелинейными, и именно они обеспечивают этому алгоритму криптостойкость. Затем прямая перестановка перетасовывает все биты сообщения по специальному P-блоку (так же, как и S-блок он является константой [1]). При этом никакие биты не теряются и не используются дважды. С точки зрения затрат памяти DES позволяет использовать крайне малое ее количество. Это связано с длиной ключа 56 битов и оперируемым 64-битовым блоком данных.

К сожалению, алгоритм шифрования DES с 2012 г. является крайне не рекомендованным к использованию [2]. Причем в научных кругах его критиковали практически с самого его появления [3]. Основными темами для обсуждения стали длина ключа, множество кон-

стант в виде S-блоков и количество итераций самого алгоритма.

Длина ключа является крайне важным аспектом любого алгоритма шифрования. Это связано с возможностью его получения методом грубой силы – обычным перебором всех возможных значений ключа. В момент разработки алгоритма было понимание того, что лишь суперкомпьютер за 20 млн долл. сможет раскрыть ключ за один день, однако уже к 1990 г. стало очевидно, что стандарт DES в течение нескольких лет полностью утратит свою криптостойкость.

Вопросы, касающиеся S-блоков, связаны с озабоченностью, что во время их разработки государственные структуры США оставили намеренные лазейки, позволяющие без труда осуществлять криптоанализ алгоритма. Также в научных источниках можно найти различные замечания об особенностях составления S-блоков, но использовать их для атак на алгоритм так и не получилось [4].

Вопросы, связанные с количеством раундов, обращаются к выбору именно 16 раундов. Описанный выше лавинный эффект возникает после 8 раундов [5]. Причем при попытке применить в алгоритме менее 16 раундов, он начинает быть уязвим к атаке с известным открытым текстом.

Алгоритм FEAL был впервые опубликован в 1987 г. В нем используется 64-битовый блок и 64-битовый ключ. Он является идейным преемником рассмотренного выше алгоритма DES, но с усовершенствованной функцией раунда и попыткой увеличения скорости шифрования за счет уменьшения количества раундов.

Шифрование в алгоритме начинается с операции XOR над правой половиной, полученной в результате деления исходной последовательности на две 32-битовые последовательности. Затем они проходят через n раундов (важно отметить, что в первой редакции алгоритм насчитывал лишь 4 раунда), на каждом из которых правая половина комбинируется с 16 битами ключа действиями, описанными ниже, и суммируется операцией XOR с левой половиной. Затем половины переставляются. После n раундов начинается этап, при котором полови-

ны не переставляются. Левая и правая половины суммируются операцией XOR и сцепляются в один 64-битовый блок. Затем операцией XOR он суммируется с другими 64 битами ключа, и на этом алгоритм заканчивается. Полный алгоритм проиллюстрирован на рис. 1 [6].

Комбинирование в алгоритме FEAL заключается в преобразовании 32 бит данных и 16 бит ключа при помощи разделения данных на 8-битовые фрагменты, суммирования операцией XOR и заменой друг друга. Внутри этой функции используется две функции, которые определены следующим образом.

В алгоритме FEAL используется функция генерации ключа, которая заключается в делении на две половины 64-битового ключа, а затем применение к ним операции XOR и функции f , изображенной на рис. 2. В ней происходит разбиение двух 32-битовых последовательностей на 8-битовые блоки, которые комбинируются и заменяются. Функции f_k для вычисления и проиллюстрированы на рис. 3. Полученные 16-битовые блоки ключа используются в основном алгоритме. Важно отметить, что алгоритм FEAL имеет крайне низкие требования к памяти благодаря небольшой длине ключа и малому количеству раундов.

Криптоанализ алгоритма уже в 1989 г. показал, что для атаки на алгоритм FEAL доста-

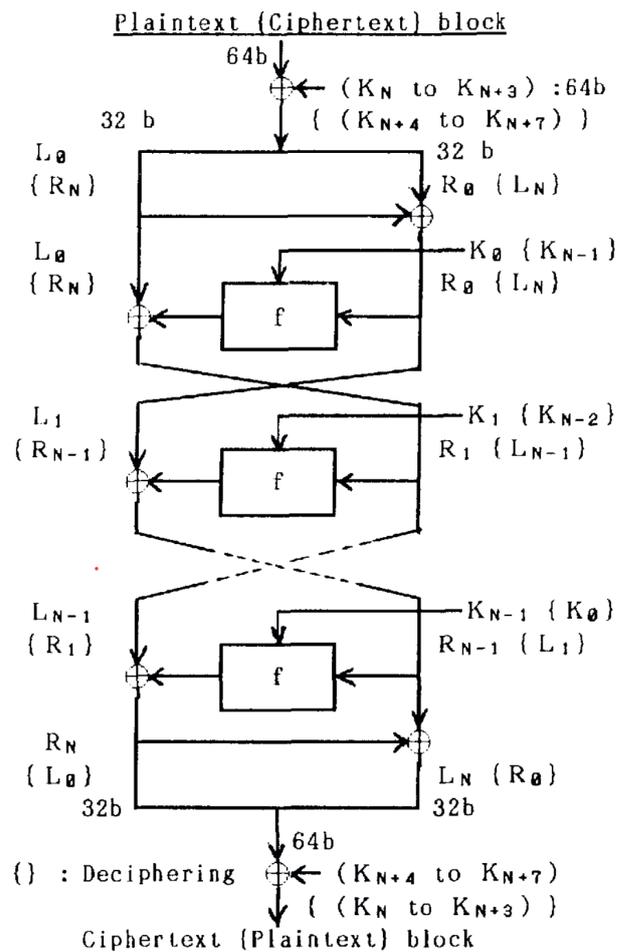


Рис. 1. Один раунд алгоритма FEAL
 Примечание: взято из [6].

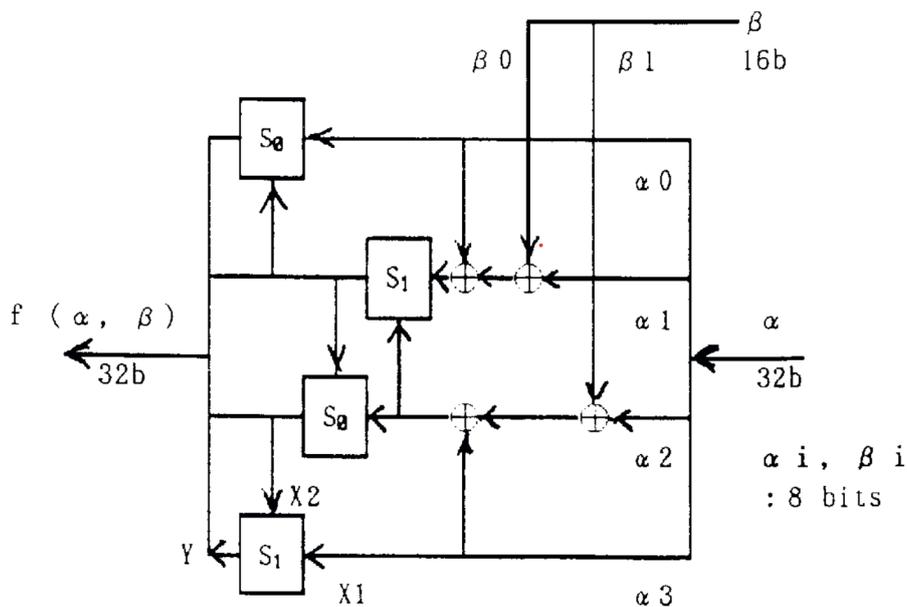


Рис. 2. Функция f
 Примечание: взято из [6].

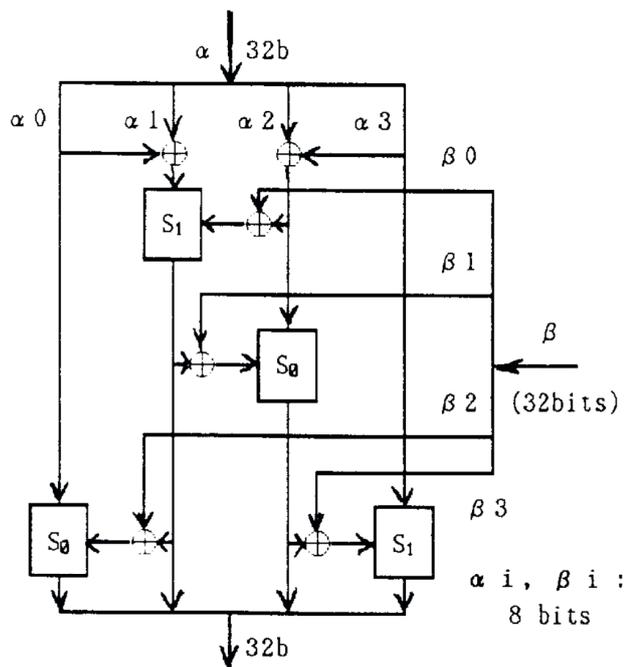


Рис. 3. Функция f_k
 Примечание: взято из [6].

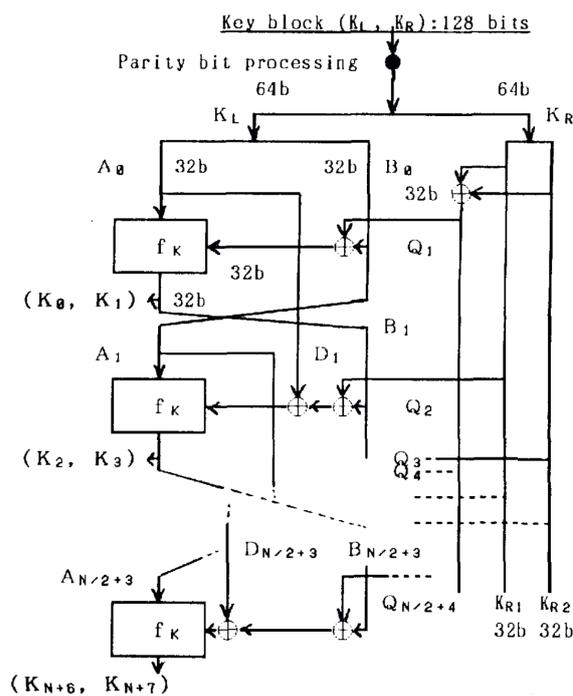


Рис. 4. Алгоритм FEAL-NX
 Примечание: взято из [6].

точно подобрать открытый текст размером 10000 блоков [7]. Эта научная работа спровоцировала появление усовершенствованного алгоритма FEAL-N, особенность которого заключается в переменном числе раундов, а впоследствии и FEAL-NX, который использовал 128-битовый ключ. Алгоритм этого шифра показан на рис. 4. Со временем в алгоритм привнесли динамическую функцию перестановки и назвали его FEAL-N (X)S.

Симметричный блочный криптоалгоритм ГОСТ 28147-89 был разработан в Советском Союзе в 1989 г. Этот алгоритм является 64-битовым, длина ключа шифра составляет 256 бит. Алгоритм состоит из 32 раундов, в каждом из которых применяется довольно тривиальный алгоритм шифрования. Как и в рассмотренных выше алгоритмах, открытый текст длиной 64 бита делится на две 32-битовые половины и для каждого i -го раунда выполняются две операции, используя подключ K_i :

$$L_i = R_{(i-1)}; R_i = L_{(i-1)} \oplus f(R_{(i-1)}, K_i).$$

Одна из основных особенностей алгоритма ГОСТ заключается в использовании в шиф-

ровании секретных S-блоков, которые так же, как и ключ, должны храниться в тайне. Правая половина и i -й подключ суммируются по модулю. Затем полученная строка делится на восемь 4-битовых последовательностей, каждый из которых проходит через один из S-блоков. В качестве подключей используется исходный ключ, раздробленный на восемь 32-битовых последовательностей. Причем в каждом раунде применяется своя ключевая последовательность, просто меняя их поочередно.

В криптоанализе ГОСТ научные исследователи делают акцент на сложности проведения атаки методом грубой силы. Это связано с большой по тем временам ключевой последовательностью – 256 бит. Учитывая закон Мура, такой алгоритм в теории сможет оставаться безопасным по крайней мере 200 лет. Также нужно понимать, что секретность S-блоков и большое количество раундов, в сравнении с вышеописанным DES, повышает сложность алгоритма для атакующего еще и с позиции дифференциального и линейного криптоанализа. Стоит учитывать, что благодаря большой длине ключа и 64-битовой шифруемой последовательности ГОСТ тре-

бует для работы больше памяти, чем алгоритмы FEAL и DES.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цель исследования заключалась в сравнительном анализе алгоритмов симметричного шифрования блочного типа. Основная гипотеза работы заключалась в том, что, несмотря на схожесть в принципах работы, описанные алгоритмы имеют значительные различия в уровне защиты и эффективности.

С точки зрения устойчивости к атакам про каждый алгоритм можно сказать следующее.

1. Алгоритм ГОСТ применяется в России и ряде других стран по сей день. Его основными достоинствами являются длина ключа 256 битов, 32 раунда шифрования, а также секретные S-блоки. Это позволяет быть устойчивым на протяжении десятилетий к атаке методом грубой силы и дифференциальному криптоанализу, хотя и с некоторыми оговорками [8].

2. FEAL – это алгоритм шифрования, который способен работать с ключами более 128 битов и использует сложные методы замен и подстановок, за счет чего он устойчив не только к атаке методом грубой силы, но еще и к дифференциальному криптоанализу.

3. DES использует всего 56 битов ключевых данных, что делает его крайне ненадеж-

ным к атаке методом грубой силы, а за счет малого количества раундов позволяет реализовывать атаки с использованием открытых текстов и дифференциального анализа.

Для сравнения с практической точки зрения эффективности описанных алгоритмов были написаны программы на языке Си для оценки временных затрат на шифрование и дешифрование. В качестве исходных кодов применялись реализации алгоритм ГОСТ [9], алгоритм DES [10] и алгоритм FEAL [11]. В одном тесте выполнялись шифровка и дешифровка, используя в качестве входной и ключевой последовательности выходную последовательность предыдущего теста. Для первого теста открытый текст и ключевая последовательность представляет собой шестнадцатеричное число 9474B8E8C73BCA7D. Таким образом, в каждом тесте ни ключевая последовательность, ни открытый текст не повторялись дважды. Время, требуемое на эти операции, отсчитывалось программным методом. Всего для каждого алгоритма было проведено 1000 тестов, чтобы минимизировать влияние других процессов системы на итоговый результат. Тесты выполнялись подряд без изменения аппаратной и программной конфигурации тестового стенда. Итоговые графики представлены на рис. 5–7, при изучении которых можно об-

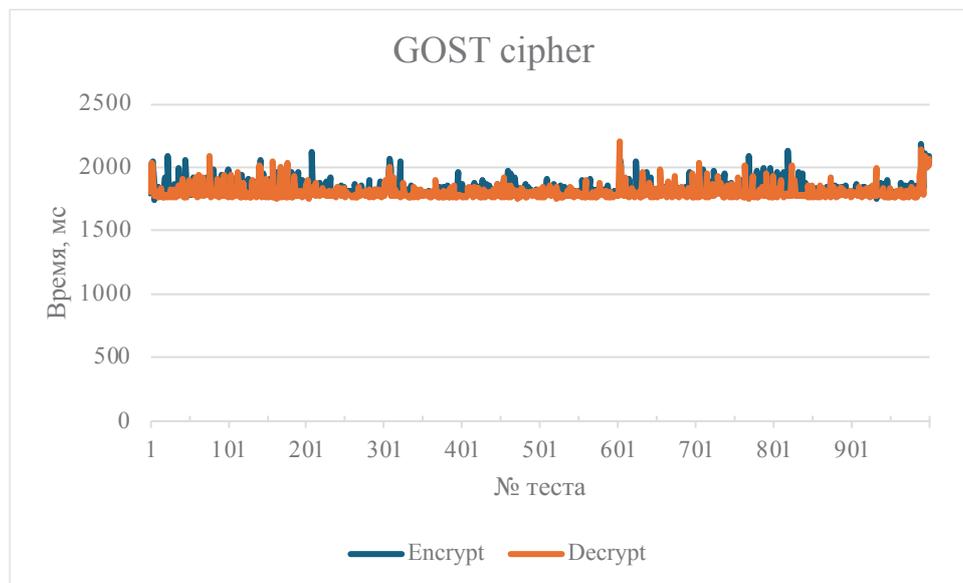


Рис. 5. График временных затрат на шифрование и дешифрование алгоритмом ГОСТ

Примечание: составлено авторами.

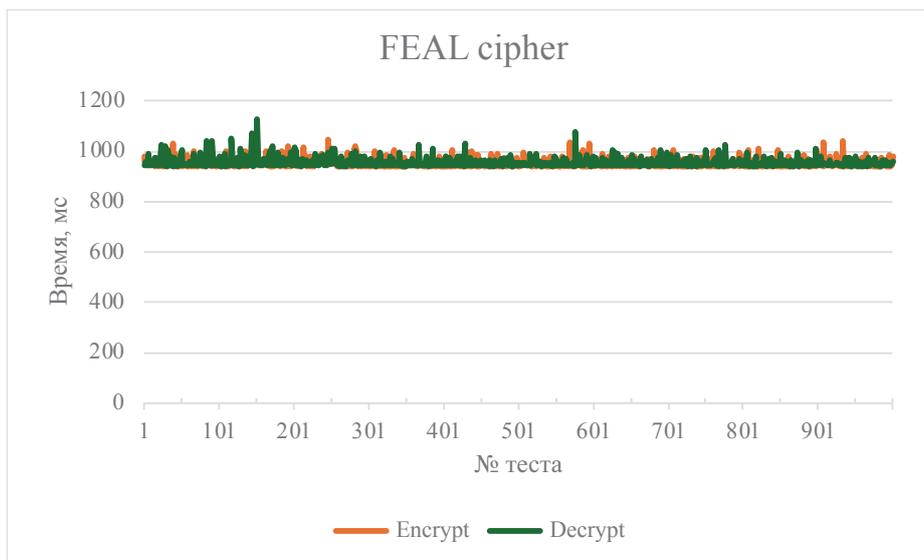


Рис. 6. График временных затрат на шифрование и дешифрование алгоритмом FEAL

Примечание: составлено авторами.

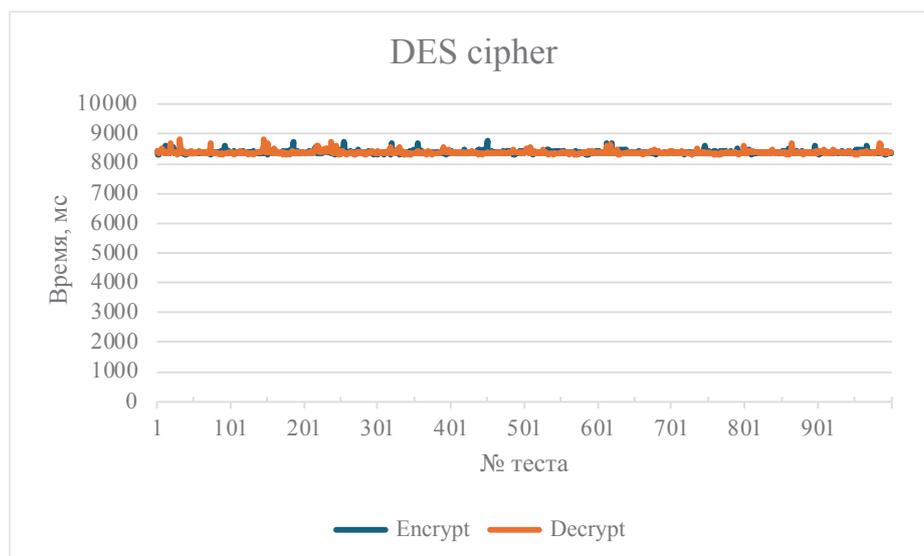


Рис. 7. График временных затрат на шифрование и дешифрование алгоритмом DES

Примечание: составлено авторами.

наружить некоторые временные «всплески». Это связано с работой фоновых процессов в операционной системе тестового стенда.

Также были вычислены средние времена решения задач шифрования и дешифрования для каждого рассмотренного алгоритма шифрования (табл. 1).

По представленным результатам можно сделать следующие выводы.

1. Алгоритм FEAL показал наилучший результат среди рассмотренных алгорит-

мов по времени шифрования и дешифрования. Среднее время выполнения 1000 итераций алгоритма составило около 959 мс. Это подтверждает его сравнительно высокую эффективность и делает его наиболее предпочтительным выбором для алгоритмов, требующих высокую скорость обработки данных.

2. Тестирование алгоритма ГОСТ показало, что его эффективность лишь немного проигрывает алгоритму FEAL. Среднее время выполнения 1000 итераций составило около

Результаты тестирования алгоритмов шифрования

Название алгоритма	Среднее время шифрования 1000 открытых текстов, мс	Среднее время дешифрования 1000 открытых текстов, мс	Среднее время шифрования и дешифрования 1000 открытых текстов, мс	Отношение к наилучшему результату по среднему времени шифрования и дешифрования
ГОСТ	1825,892	1808,496	1817,194	1,9
FEAL	958,322	959,303	958,8125	1
DES	8399,292	8387,661	8393,4765	8,8

Примечание: составлено авторами.

1817 мс, что в 1,9 раза медленнее, чем алгоритм FEAL.

3. DES при тестировании показал наилучшие результаты со средним результатом выполнения 1000 итераций около 8393 мс, что в 8,8 раза медленнее алгоритма FEAL. Этот результат подтверждает неактуальность этого алгоритма с точки зрения производительности и делает его непригодным в использовании в современных системах.

В заключение хочется подчеркнуть важную мысль о том, что алгоритм DES не только небезопасен с точки зрения криптоанализа, но еще и неэффективен в сравнении с аналогичными алгоритмами шифрования FEAL и ГОСТ. FEAL, в свою очередь, является эффективным для решения современных задач криптографии, а ГОСТ, занимая промежуточное положение, может быть использован для более специфичных задач, требующих алгоритмов российского производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках описанной работы были озвучены цели и задачи, направленные на оценку алгоритмов симметричного шифрования блочного типа с точки зрения их эффективности, требований к ресурсам, а также защищенности. В процессе исследования получилось подтвердить мысль о том, что, несмотря на сравнительно похожие алгоритмы, используемые в каждом из шифров, итоги анализа и тестов сильно различаются.

Алгоритм DES в ходе анализа показал свою крайне слабую защиту к криптоанализу, и он

по праву является не рекомендованным к использованию. Алгоритмы ГОСТ и FEAL являются вполне актуальными и по сей день, обеспечивая надежную защиту шифруемой информации.

Анализ требований к ресурсам показал, что алгоритм FEAL требует наименьшее количество вычислительных ресурсов, что позволяет его использовать, например, в различных мобильных системах.

Тестирование производительности показало, что FEAL является наиболее эффективным алгоритмом, обеспечивая минимальные временные затраты на шифрование и дешифрование. Алгоритм ГОСТ продемонстрировал временные затраты на те же операции чуть выше, однако в разы лучше, чем алгоритм DES.

В заключение этого исследования стоит еще раз подчеркнуть важность выбора алгоритма в зависимости от конкретных требований к безопасности и производительности. Анализируя вектор развития технологий, можно полагать, что с ростом вычислительных мощностей будут появляться новые, более совершенные алгоритмы шифрования, которые будут обеспечивать высокий уровень защиты и эффективности. Важно понимать, что растущее количество кибератак делает более актуальными вопросы, связанные с кибербезопасностью, что ведет к необходимости проведения дальнейших исследований в этой области и усовершенствования существующих алгоритмов шифрования для поддержания их актуальности в вопросах, связанных с ответом на новые вызовы в области информационной безопасности.

Список источников

1. The DES Algorithm Illustrated. URL: <https://page.math.tu-berlin.de/~kant/teaching/hess/kryptows2006/des.htm> (дата обращения: 27.09.2024).
2. Remove the highly insecure DES encryption from the Useraccounts. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/services-hub/unified/health/remediation-steps-ad/remove-the-highly-insecure-des-encryption-from-useraccounts> (дата обращения: 27.09.2024).
3. Denning D. E., Dorothy E. Digital signatures with RSA and other public-key cryptosystems. Communications of the ACM. USA : ACM, 1984. p. 388–392.
4. Davio M., Desmedt Y., Fosseprez M. et al. Analytical Characteristics of the DES. Advances in Cryptology. Heidelberg : Springer, 1984. p. 171–202.
5. Konheim A. G. Cryptography, a primer. New York, 1981. 432 p.
6. Miyaguchi S. The FEAL Cipher Family. Advances in Cryptology-CRYPTO' 90. Heidelberg : Springer, 1990. p. 628–638.
7. Gilbert H., Chasse G. A Statistical Attack of the FEAL-8 Cryptosystem. Advances in Cryptology. Heidelberg : Springer, 1991. p. 22–33.
8. Ko Y., Hong S., Lee W. et al. Related Key Differential Attacks on 27 Rounds of XTEA and Full-Round GOST. Heidelberg : Springer, 2004. P. 299–316.
9. Шнайер Б. Прикладная криптография: протоколы, алгоритмы и исходный код на C. 2-е изд. М. : Дialeктика, 2022. 1040 с.
10. DES algorithm. URL: <https://github.com/dhuertas/DES/blob/master/des.c> (дата обращения: 01.10.2024).
11. feal-8.c. URL: <https://github.com/deeptechlabs/encryption/blob/master/FEAL8-WI/feal-8.c> (дата обращения: 01.10.2024).

Информация об авторах

И. В. Поддубный – магистрант.

М. Я. Брагинский – кандидат технических наук, доцент.

References

1. The DES Algorithm Illustrated. URL: <https://page.math.tu-berlin.de/~kant/teaching/hess/kryptows2006/des.htm> (accessed: 27.09.2024).
2. Remove the highly insecure DES encryption from the Useraccounts. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/services-hub/unified/health/remediation-steps-ad/remove-the-highly-insecure-des-encryption-from-useraccounts> (accessed: 27.09.2024).
3. Denning D. E., Dorothy E. Digital signatures with RSA and other public-key cryptosystems. Communications of the ACM. USA: ACM; 1984. p. 388–392.
4. Davio M., Desmedt Y., Fosseprez M. et al. Analytical Characteristics of the DES. Advances in Cryptology. Heidelberg: Springer; 1984. p. 171–202.
5. Konheim A. G. Cryptography, a primer. New York; 1981. 432 p.
6. Miyaguchi S. The FEAL Cipher Family. Advances in Cryptology-CRYPTO' 90. Heidelberg: Springer; 1990. p. 628–638.
7. Gilbert H., Chasse G. A Statistical Attack of the FEAL-8 Cryptosystem. Advances in Cryptology. Heidelberg: Springer; 1991. p. 22–33.
8. Ko Y., Hong S., Lee W. et al. Related Key Differential Attacks on 27 Rounds of XTEA and Full-Round GOST. Heidelberg: Springer; 2004. P. 299–316.
9. Schneier B. Applied cryptography: protocols, algorithms and source code in C. 2nd ed. Moscow: Dialektika; 2022. 1040 p. (In Russ.).
10. DES algorithm. URL: <https://github.com/dhuertas/DES/blob/master/des.c> (accessed: 01.10.2024).
11. feal-8.c. URL: <https://github.com/deeptechlabs/encryption/blob/master/FEAL8-WI/feal-8.c> (accessed: 01.10.2024).

About the authors

I. V. Poddubnyy – Master's Degree Student.

M. Ya. Braginsky – Doctor of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья

УДК 004.415:616.8-08

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-7>



Современные информационные технологии в амбулаторной реабилитации неврологических пациентов

Эдмон Гарникович Тунян^{1✉}, Варвара Борисовна Тютюнник²,
Ростислав Станиславович Сазиков³, Тарас Владимирович Гавриленко⁴

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

^{3,4}Сургутский филиал научно-исследовательского центра «Курчатовский институт», Сургут, Россия

¹tunyan@edro.su[✉], <https://orcid.org/0009-0003-3260-1310>

²vari0200@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3180-5367>

³sazikov@edro.su, <https://orcid.org/0009-0005-0078-0013>

⁴taras.gavrilenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>

Аннотация. Интеграция современных информационных систем и цифровых технологий в медицинские учреждения снижает затраты, повышает качество оказываемых медицинских услуг, расширяет их доступность и позволяет сэкономить время для врачей. Отдельное внимание уделяется реабилитации пациентов с неврологическими отклонениями в период амбулаторного лечения, которые требуют тщательного мониторинга и корректировки лечебно-восстановительных процедур. Существующие решения в основном требуют специализированной аппаратуры, которые не поддерживаются на территории Российской Федерации или не предоставляют нужный функционал для сотрудников медицинских учреждений. Цель данного исследования – выявить практики, которые помогут улучшить процесс диагностики и мониторинга состояния неврологических пациентов посредством разработки методов и алгоритмов сопровождения неврологических пациентов, которые соответствуют российским стандартам (ГОСТ) и нормативно-правовым актам.

В статье выполнен обзор существующих методов диагностики и постановки диагнозов врачами-неврологами, а также инструментов для автоматизации процесса мониторинга состояния пациентов в период амбулаторного лечения. На основе выполненного анализа сделано описание к системе, разработаны функциональные и нефункциональные требования, включающие такие характеристики, как безопасность, надежность, удобство использования и совместимость с другими медицинскими системами. Для примера рассмотрена система «НейроДом», позволяющая осуществлять дистанционный мониторинг и поддержку пациентов посредством веб-приложения, интегрированного с носимыми устройствами и мобильными приложениями.

Результаты исследования показывают, что информационные системы обеспечивают более точную диагностику, повышают эффективность мониторинга пациентов в период реабилитации и позволяют выполнить корректировку назначенного лечения. Это в конечном счете ведет к повышению качества жизни неврологических пациентов и повышает эффективность и доступность оказываемой медицинской помощи в период амбулаторного лечения.

Ключевые слова: информационная система, нейрореабилитация, амбулаторное лечение, мониторинг состояния, амбулаторное сопровождение, качество жизни пациентов, программное обеспечение, телемедицина, ГОСТ

Для цитирования: Тунян Э. Г., Тютюнник В. Б., Сазиков Р. С., Гавриленко Т. В. Современные информационные технологии в амбулаторной реабилитации неврологических пациентов // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 69–82. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-7>.

Original article

Modern information technologies in outpatient rehabilitation of neurological patients

Edmond G. Tunyan^{1✉}, Varvara B. Tyutyunnik², Rostislav S. Sazikov³, Taras V. Gavrilenko⁴

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

^{3,4}Surgut Branch of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Surgut, Russia

¹tunyan@edro.su✉, <https://orcid.org/0009-0003-3260-1310>

²vari0200@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3180-5367>

³sazikov@edro.su, <https://orcid.org/0009-0005-0078-0013>

⁴taras.gavrilenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3243-2751>

Abstract. The integration of modern information systems and digital technologies in medical institutions helps to reduce costs, improve the quality of medical services, expand their accessibility, and save time for doctors. We give special attention to the rehabilitation of patients with neurological disorders during outpatient treatment, requiring careful monitoring and adjustment of therapeutic and restorative procedures. Existing solutions mainly rely on specialized equipment that is either not supported by the Russian Federation or does not provide the necessary functionality for medical personnel. The aim of this study is to identify practices that can improve the process of diagnosis and monitoring of neurological patients by developing methods and algorithms for supporting neurological patients that comply with Russian standards (GOST) and regulatory legal acts.

The article reviews current neurologist diagnostic methods and tools for automated patient monitoring during outpatient treatment. The analysis produced a system description and the development of functional and non-functional requirements, including safety, reliability, user-friendliness, and compatibility with other medical systems. The NeuroDom system, for example, enables remote patient monitoring and support through a web application that integrates with wearable and mobile applications.

The results of the study show that information systems ensure more accurate diagnosis, increase the efficiency of patient monitoring during rehabilitation, and enable adjustments to the prescribed treatment, ultimately leading to an improved quality of life for neurological patients and enhancing the efficiency and accessibility of medical care during outpatient treatment.

Keywords: information system, neurorehabilitation, outpatient treatment, condition monitoring, outpatient support, patient quality of life, software, telemedicine, GOST

For citation: Tunyan E. G., Tyutyunnik V. B., Sazikov R. S., Gavrilenko T. V. Modern information technologies in outpatient rehabilitation of neurological patients. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):69–82. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-7>.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом вместе с развитием информационных систем и цифровых технологий растет и внедрение их в медицинские учреждения. Согласно данным N3.Health, подобные системы существенно минимизируют затраты и повышают качество оказываемых медицинских услуг, обеспечивают более широкую доступность, сокращают время работы самого врача [1].

Для качественной реабилитации после заболеваний или травм функций нервной систе-

мы необходимо длительный период выполнять реабилитационные процедуры, которые в основном выходят за рамки стационарного лечения.

На данный момент имеющиеся информационные системы либо направлены на их использование вместе с специализированным оборудованием, либо не поддерживаются на территории Российской Федерации, либо не покрывают весь спектр необходимого врачам функционала [2].

Анализ предметной области

Исследование и разработка методов и алгоритмов для диагностики и лечения пациентов с использованием современных технологий растет с каждым годом во всем мире.

Большинство медицинских задач довольно эффективно решаются при помощи информационных систем, которые разрабатываются не только для помощи медицинским работникам, но и для упрощения и облегчения жизни пациентов.

Например, в Российской Федерации для пациентов существует множество онлайн-сервисов для консультаций с детскими и взрослыми врачами разных специализаций (СберЗдоровье, Яндекс.Здоровье, ONDOC, Доктор Рядом), для записи на прием к специалисту (SmartMed, Инфодоктор, Инфодоктор), также есть онлайн-агрегаторы аптек для поиска нужных препаратов (Аптеки «2 ГИС»).

Согласно результатам анализа данных исследования «Глобальное бремя болезней, травм и их факторов риска», представленным в журнале *Lancet Neurology*, в 2021 г. более 3 миллиардов человек в мире страдают неврологическими заболеваниями и их число с каждым годом растет. Согласно «Межсекторальному глобальному плану действий по борьбе

с эпилепсией и другими неврологическими расстройствами на 2022–2031 гг.» (МГПД), неврологические заболевания являются одной из ведущих причин смертности и инвалидности в мире, вызывая около 9 миллионов смертей в год. Увеличивается бремя этих заболеваний, особенно в странах с низким и средним уровнем дохода, где доступ к лечению и диагностике остается ограниченным.

Долю пациентов, для которых проводится терапия и для которых она неэффективна, отражают данные (рис. 1), среди них лидируют именно неврологические заболевания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы тестирования и постановки диагнозов

Для понимания, как сопровождать неврологических пациентов в «темный период», требуется как понимание патофизиологии заболеваний, так и сочетание разных методов и оценок симптомов пациентов. Течение многих неврологических заболеваний является сложно предсказуемым; так, у одного пациента процесс реабилитации идет быстро, а у другого с такими же симптомами возникают осложнения. Для эффективной постановки диагноза и определения динамики течения

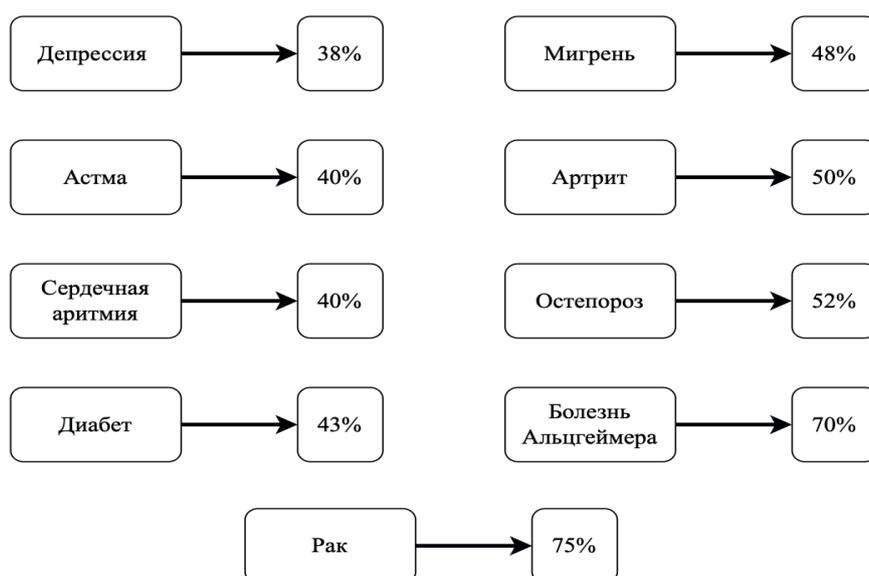


Рис. 1. Доля пациентов, проходящих терапию, которая была неэффективна

Примечание: составлено авторами на основе данных из информационно-аналитического издания «Вместе против рака» [3].

заболеваний необходимо использовать комплексный подход, сочетание клинических обследований и практик с современными цифровыми технологиями и датчиками.

Первым этапом диагностики неврологических пациентов является оценка рефлексов. Врач-невролог проводит различные тесты для проверки поверхностных и глубоких рефлексов, а также оценивает чувствительность и силу произвольных движений. Например, силу мышц можно определить как вручную, путем противодействия определенным простым действиям, так и используя динамометр. Используя полученные результаты, можно сделать классификации по международной шкале от 0 до 5, это поможет определить степень пареза или паралича.

В зависимости от симптомов выделяют нарушения центрального и периферического генеза, и для каждого из этих типов необходимо провести специфическое тестирование. Например, центральный паралич можно выявить с помощью таких методов, как проба Барре, Будды и Мингаццини, в то время как для периферических нарушений актуально определение атрофии и гипотонии мышц. Также необходимо обращать внимание на развитие непривычных рефлекторных движений (например, одновременное или вторичные движения пораженной руки при кашле или чихании), которые, в свою очередь, указывают на проблему, связанную с работой головного мозга.

Разберем для примера диагностику паркинсонизма, который является вторым по распространенности неврологическим заболеванием после болезни Альцгеймера, она в основном поражает пожилое население. Болезнь Паркинсона отличается такими симптомами, как замедленная речь (брадилалия), снижение двигательной активности (олигокинезия), маскообразное лицо (гипомимия), поза «просителя» и др. Для выявления состояния пациентов используются разные типы функциональных тестов – это диадохокинез, проверка письменного навыка, громкость звучания голоса. Тщательное внимание уделя-

ется перемещению пациента: вставанию его со стула, развороту на 180 градусов, так как это играет важную роль при постановке диагноза и выборе метода лечения.

При постановке диагноза неврологических заболеваний используется множество инструментальных методов исследования. В их числе электроэнцефалография (ЭЭГ), магнитно-резонансная томография (МРТ) и компьютерная томография (КТ), все они являются обязательными при комплексном обследовании. Данные технологии используются для определения точного места поражения и трудно обнаруживаемых изменений, которые сложно выявить во время медицинского осмотра. Применение таких методов диагностики, как нейровизуализация, в частности при МРТ, стало стандартом при диагностике таких заболеваний, как рассеянный склероз, опухоли головного и спинного мозга, эпилепсия и др.

Для выявления разных видов нарушений используются следующие тесты. Когнитивные нарушения оцениваются с помощью нескольких видов шкал, одним из них является Монреальская шкала оценки когнитивных функций (MoCA). Данная шкала включает различные аспекты когнитивных способностей, включая навыки зрительно-моторной координации, сосредоточенность, внимание, речь, запоминание, арифметические способности, восприятие времени и пространства. Наивысший результат теста составляет 30 баллов, результат в 26 баллов и выше принято считать нормой. Для более глубокого анализа эмоционального состояния пациента используется Госпитальная шкала тревоги и депрессии HADS (Hospital Anxiety and Depression Scale), состоящая из 14 вопросов, направленных на выявление признаков тревожных и депрессивных расстройств. В зависимости от итогов тестирования пациенты классифицируются по следующим категориям: отсутствие симптомов (0–7 баллов), латентные проявления (8–10 баллов) и ярко выраженные клинические симптомы (11 и более баллов). Для общего определения когнитив-

ного состояния познавательных функций применяется Краткая шкала оценки психического статуса MMSE (Mini-Mental State Examination), которая оценивает такие показатели, как ориентация в пространстве, внимание, память и вербальные навыки. Баллы по данной шкале варьируются от 0 до 30, где значения от 0 до 9 показывают на тяжелую деменцию, 10–20 – на умеренную, 21–24 – на легкую, а 25–30 – сохранность когнитивных способностей.

Для оценки координационных нарушений, таких как проблемы с равновесием, используется Шкала Берг (Berg Balance Scale). Данная шкала состоит из 14 тестов, нацеленных на оценку возможностей пациента выполнять различные действия, такие как вставание со стула, повороты, ходьба, удержание равновесия. Каждый тест оценивается по шкале от 0 до 4 баллов, где 0 означает невозможность выполнять задание, а 4 – его полное выполнение. Наивысший показатель – 56 баллов. Результаты меньше 20 баллов указывают на необходимость использования инвалидного кресла, в то время как диапазон от 21 до 40 баллов говорит о том, что пациенту необходима помощь при ходьбе, а резуль-

тат от 41 до 56 баллов показывает на полную независимость при перемещении. Для более подробной оценки ходьбы и баланса используется Dynamic Gait Index (DGI), который определяет способность пациента перемещаться в затрудненных условиях, включая изменение скорости, перешагивание препятствий и повороты (рис. 2). Наилучший результат по этой шкале составляет 24 балла. Лица, проходящие лечение и набравшие от 0 до 18 баллов, относятся к группе высокого риска падения, от 19 до 24 баллов – к группе с низким риском падения.

Шкала Берг и DGI также используются для оценки двигательных дисфункций, но дополнительно применяется Международная согласованная оценочная шкала атаксии ICARS (International Cooperative Ataxia Rating Scale). Данная шкала была разработана с целью определения степени выраженности атаксии – нарушения координации, обусловленной повреждением мозжечка. Шкала ICARS предназначена для оценивания нескольких аспектов состояния пациента, включая позу и походку, способность выполнять конкретные движения, нарушения речи и нарушения глазодвигательной функции. Баллы варьируют-

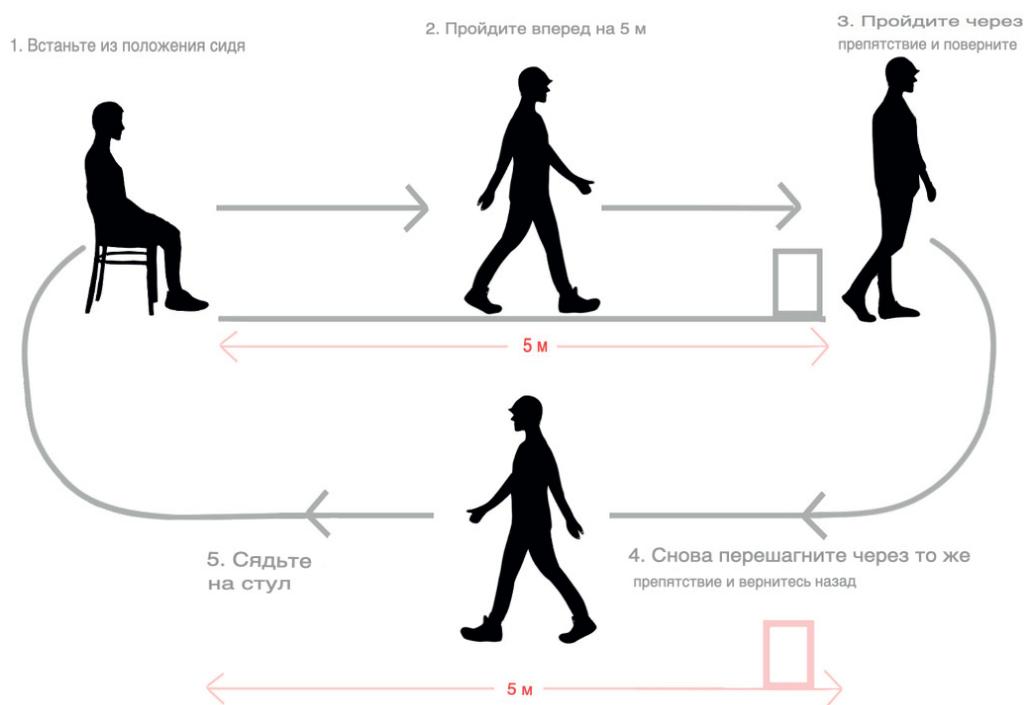


Рис. 2. Тест на преодоление препятствий у людей с инсультом
Примечание: составлено по источнику [4].

ся от 0 до 100: баллы от 0 до 10 соответствуют легкой атаксии, от 10 до 25 – умеренной, от 25 до 50 – выраженной, от 50 до 80 – резко выраженной, а результат от 80 до 100 указывает на существенное ограничение мобильности, когда пациент прикован к постели.

Нарушения мелкой моторики кистей рук оцениваются при помощи теста 9-Hole Peg Test (9НРТ), который определяет скорость выполнения мелких моторных движений. Тест оценивает функции верхних конечностей, пациент для этого должен выполнить движения с небольшими предметами за ограниченное время. Чтобы определить функциональное состояние нижних конечностей, применяется тест Timed 25-Foot Walk Test (25FT), при этом фиксируется время, за которое пациент проходит 25 футов, или примерно 8 метров, что позволяет оценить его физические способности и способность к передвижению.

Применение данных тестов в системе удаленного мониторинга неврологических пациентов позволяет врачам не только точно устанавливать диагноз, степень и характер нарушений у пациентов, но и эффективно анализировать динамику и их состояние в процессе реабилитации, что помогает оперативно корректировать лечение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Инструменты для автоматизации мониторинга динамики реабилитации

Современные технологии выполняют важную роль при реабилитации неврологических пациентов, они как собирают и обрабатывают данные о состоянии пациентов, так и могут вносить корректировку в процесс реабилитации пациентов в реальном времени. Максимальную эффективность демонстрируют системы, объединяющие телемедицинские платформы, датчики и мобильные приложения, что позволяет осуществлять дистанционный мониторинг и оценку прогресса пациентов в реальном времени на всех этапах реабилитации.

Для примера рассмотрим систему «НейроДом», являющуюся одним из ключевых решений в области автоматизации процесса дистанционного мониторинга пациентов. Она разработана на основе авторских методик, ориентированных на восстановление двигательных и когнитивных функций пациентов [5]. Данная система представляет собой веб-приложение, обеспечивающее выполнение восстановительных процедур в домашних условиях с непрерывным мониторингом состояния пациента и оперативной связью с врачом (рис. 3).

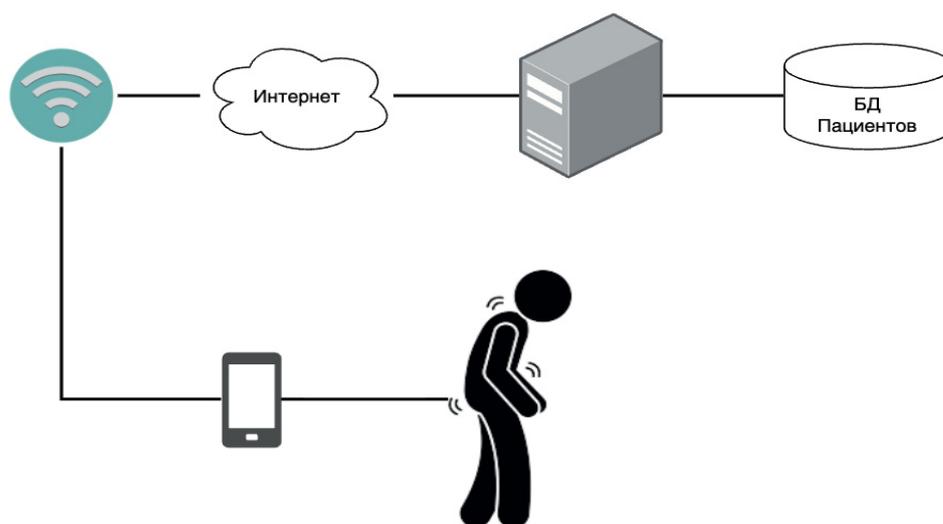


Рис. 3. Тест на преодоление препятствий у людей с инсультом

Примечание: составлено авторами на основе руководства для врачей по нейрореабилитации [5].

Портал «НейроДом» обеспечивает такие функциональные возможности, как отслеживание динамики состояния пациентов. Для оценки система применяет международные шкалы, такие как Berg Balance Scale, Dynamic Gait Index и ICARS. Это позволяет отслеживать динамику реабилитации и вносить корректировку в процесс реабилитации в зависимости от текущих показателей. Сбор данных о состоянии пациента осуществляется при выполнении упражнений и тестов. Пациент вводит показатели, такие как артериальное давление, пульс до начала заданий, а система фиксирует выполнение упражнений и выявляет потенциальные проблемы, приостанавливая выполнение упражнений при превышении допустимых значений показателей состояния организма. Система предоставляет врачам возможность назначать индивидуальные комплексы упражнений и осуществлять контроль за их выполнением, а пациентам дает доступ к видеoinструкциям и обратной связи. В случае затруднений при выполнении упражнений пациентом может отправить уведомление, которое поможет врачу определить причины затруднений и внести необходимые корректировки в реабилитационную программу.

Таким образом, телемедицинские платформы позволяют обеспечивать удаленный контроль за состоянием пациентов и вносить изменения в программу реабилитации в режиме реального времени. Взаимодействие с такими системами помогает поддерживать постоянный контроль пациента со стороны врача, что особенно важно в период амбулаторного лечения. Носимые устройства и сенсоры являются необходимым дополнением к телемедицинским системам, обеспечивают непрерывный мониторинг состояния физиологических показателей реабилитируемого, таких как пульс, активность и артериальное давление. Эти устройства позволяют врачам оперативно реагировать на изменение состояния пациента и корректировать лечение. Мобильные приложения для пациентов становятся незаменимой частью в процессе реабилитации, предоставляя легкий доступ

к инструкциям и информации о динамике. Подобные системы способствуют соблюдению лечебных рекомендаций и облегчают мониторинг пациента. Средства анализа и визуализации показателей обеспечивают оперативное получение данных и их интерпретацию для врачей. Визуализация физиологических показателей пациентов в виде графиков и отчетов позволяет легко отслеживать прогресс и оперативно принимать решение о корректировке программы.

Требования к программному обеспечению

Во время разработки программного обеспечения для сопровождения неврологических пациентов в период амбулаторного лечения необходимо учитывать требования, гарантирующие его корректную работоспособность, надежность, безопасность и выполнение действующих стандартов и законодательства Российской Федерации. Ниже описаны основные требования к программному обеспечению с перечислением соответствующих ГОСТов.

1. Функциональные требования:

– организация электронных медицинских записей (ЭМЗ), приложение должно обеспечивать функционал ввода, хранения и управления данными пациентов, включая анамнез, результаты обследований, диагнозы и назначения врача. ГОСТ Р 52636-2006 «Информационные технологии в здравоохранении. Электронная история болезни. Общие положения» [6];

– мониторинг физиологических показателей, реализация функций сбора данных о состоянии пациента как вручную, так и посредством интеграции с носимыми устройствами и сенсорами. ГОСТ Р 52633.4-2011 «Информационные технологии в здравоохранении. Функциональные модели электронных медицинских записей. Часть 4. Функциональные профили» [7];

– назначение и контроль выполнения реабилитационных программ, возможность врача назначать индивидуальные комплексы упражнений и отслеживать их выполнение пациентом;

– обеспечение коммуникации между пациентом и медицинским персоналом, встроенный чат или система сообщений для оперативного взаимодействия;

– обучающие материалы и справочная информация, предоставление пациентам доступа к образовательным материалам о заболевании, методах лечения и реабилитации;

– система напоминаний, автоматические напоминания о приеме лекарств, выполнении упражнений и запланированных визитах к врачу;

– поддержка мультипользовательского режима, возможность работы с приложением несколькими специалистами одновременно при соблюдении конфиденциальности данных;

– персонализация интерфейса, настройка интерфейса под индивидуальные потребности пользователя (размер шрифта, цветовая схема и т. д.);

– интеграция с электронными медицинскими системами, обеспечение взаимодействия с существующими медицинскими информационными системами лечебно-профилактических учреждений. ГОСТ Р 55062-2012 «Информационные технологии в здравоохранении. Взаимодействие медицинских информационных систем. Общие положения» [8];

– отчеты и аналитика, формирование отчетов о состоянии пациента, динамике лечения, статистических данных для анализа эффективности терапии.

2. Нефункциональные требования:

2.1. Надежность и отказоустойчивость

– высокая доступность системы, обеспечение непрерывной работы приложения с минимальным временем простоя. ГОСТ Р 51897-2002 «Надежность программного обеспечения. Общие требования и рекомендации» [9];

– механизмы резервирования, реализация резервного копирования данных и возможность восстановления системы после сбоев.

2.2. Безопасность и конфиденциальность

– защита персональных данных, соответствие требованиям Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных». Реали-

зация аутентификации и авторизации пользователей, шифрование данных при передаче и хранении. Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» [10];

– криптографическая защита информации, использование сертифицированных средств криптографической защиты информации (СКЗИ). ГОСТ 28147-89 «Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования» [11];

– регистрация и аудит событий, ведение журнала событий системы для отслеживания действий пользователей и обнаружения несанкционированного доступа. ГОСТ Р 57580.1-2017 «Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Общие положения» [12].

2.3. Удобство использования (юзабилити)

– интуитивно понятный интерфейс, дизайн приложения должен быть понятен пользователям с различным уровнем компьютерной грамотности, включая пожилых пациентов. ГОСТ Р ИСО 9241-210-2014 «Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 210. Руководство по эргономическому проектированию интерактивных систем» [13];

– доступность для людей с ограниченными возможностями, поддержка специальных режимов для пользователей с нарушениями зрения, слуха и моторики. ГОСТ Р 52872-2012 «Информационные технологии. Руководство по обеспечению доступности программных продуктов и услуг» [14].

2.4. Совместимость и интеграция

– интероперабельность, обеспечение взаимодействия с различными платформами и системами через стандартизированные интерфейсы и протоколы. ГОСТ Р 55062-2012 [8];

– поддержка стандартных форматов данных, использование общепринятых форматов обмена данными (HL7, DICOM) [15].

2.5. Производительность и масштабируемость

– оптимальная производительность, система должна обеспечивать быстрое выполнение операций без задержек, даже при большом количестве пользователей;

– масштабируемость, возможность увеличения производительности и объема обрабатываемых данных без значительных изменений архитектуры системы.

3. Требования к качеству программного обеспечения:

– соответствие жизненному циклу разработки ПО, использование процессов разработки в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 «Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств»;

– управление конфигурацией, ведение контроля версий и изменений в программном обеспечении. ГОСТ Р ИСО 10007-2007 «Системы менеджмента качества. Руководящие указания по менеджменту конфигурации» [16].

4. Требования к документации:

– полная и актуальная документация, разработка технической и пользовательской документации, включая руководства по установке, настройке и эксплуатации. ГОСТ 19.101–77 «Единая система программной документации. Виды программ и программных документов» [17];

– документация на русском языке, все документы должны быть доступны на государственном языке Российской Федерации.

5. Требования к эргономике и доступности:

– эргономичный дизайн, учет принципов эргономики при разработке пользовательского интерфейса. ГОСТ Р ИСО 9241-11-2011 «Эргономические требования при использовании визуальных дисплеев» [18];

– соблюдение стандартов веб-доступности, при разработке веб-приложений необходимо соответствовать требованиям ГОСТ Р 52872-2012 [14].

6. Требования к тестированию и качеству:

– планирование и проведение тестирования, разработка плана тестирования, включающего функциональное, интеграцион-

ное, нагрузочное и стресс-тестирование. ИСО/МЭК/ИИЭР 29119 «Информационная технология. Тестирование программного обеспечения. Часть 2. Процессы тестирования» [19];

– автоматизированное тестирование, использование средств автоматизации для повышения эффективности и полноты тестирования;

– управление дефектами, введение системы отслеживания и устранения ошибок в программном обеспечении.

7. Требования к сопровождению и обновлению:

– обновляемость системы, возможность регулярного обновления программного обеспечения без нарушения работы системы;

– техническая поддержка, обеспечение пользователей каналами связи для обращения в службу поддержки.

8. Требования к защите информации:

– антивирусная защита, встроенные механизмы для защиты от вредоносного программного обеспечения;

– соответствие требованиям ФСТЭК и ФСБ России, при необходимости система должна пройти сертификацию на соответствие требованиям по защите информации.

9. Соответствие нормативно-правовым актам:

– соблюдение медицинских стандартов, программное обеспечение должно соответствовать требованиям Федерального закона № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», а также приказам и распоряжениям Министерства здравоохранения РФ [20];

– соблюдение требований по телемедицине, в случае реализации функций телемедицины необходимо соответствие приказу Минздрава России от 30.11.2017 № 965 н «Об утверждении порядка организации и оказания медицинской помощи с применением телемедицинских технологий» [21].

10. Требования к программной и аппаратной платформе:

– совместимость с различными устройствами, приложение должно корректно ра-

ботать на различных типах устройств (ПК, планшеты, смартфоны);

– минимальные системные требования, определение и документирование минимальных и рекомендуемых системных требований для пользователей.

11. Требования к локализации:

– поддержка многоязычности, возможность добавления дополнительных языков интерфейса при необходимости;

– локализация форматов данных, отображение дат, чисел и валют в соответствии с региональными настройками пользователя.

12. Требования к обучению пользователей:

– обучающие материалы, предоставление пользователям инструкций, видеоуроков и часто задаваемых вопросов (FAQ) для освоения работы с системой;

– система подсказок, реализация интерактивных подсказок внутри приложения для облегчения освоения функционала.

13. Требования к управлению рисками:

– анализ и управление рисками, проведение анализа рисков и реализация мер по их минимизации в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14971-2009 «Медицинские изделия. Применение менеджмента риска к медицинским изделиям» [22].

14. Требования к лицензированию и правам использования:

– соблюдение лицензионных соглашений, использование всех компонентов и библиотек должно соответствовать их лицензиям;

– пользовательское соглашение, разработка и предоставление пользователям лицензионного соглашения и политики конфиденциальности.

15. Требования к энергоэффективности:

– оптимизация потребления ресурсов, приложение должно быть оптимизировано для минимального потребления энергии, особенно на мобильных устройствах.

16. Требования к устойчивости к внешним воздействиям:

– защита от несанкционированного доступа, реализация механизмов защиты от атак типа SQL-инъекций, XSS и других;

– обнаружение и предотвращение вторжений, внедрение систем обнаружения ано-

малий и попыток несанкционированного доступа.

17. Требования к модульности и повторному использованию:

– модульная архитектура, программное обеспечение должно быть построено по принципу модульности, что облегчит его сопровождение и расширение функциональности;

– повторное использование компонентов, использование стандартизированных компонентов и библиотек для ускорения разработки и повышения надежности.

18. Требования обеспечения обратной совместимости:

– обеспечение сохранности данных при обновлении системы, обеспечение целостности пользовательских данных при обновлении и миграции системы;

– обеспечение поддержки предыдущих версий системы, возможность взаимодействия с данными, созданными в предыдущих версиях приложения.

19. Требования к протоколированию событий:

– подробное ведение логов работы системы для дальнейшего анализа и устранения возможных ошибок;

– выполнение механизмов по управлению логами, осуществление механизмов перезаписи и сжатия логов для экономии дискового пространства.

20. Требования к отчетности и статистике:

– генерация статистических отчетов, возможность формирования отчетов для анализа эффективности лечения и принятия управленческих решений;

– кастомизация отчетов, пользователи должны иметь возможность настраивать параметры отчетов под свои нужды.

21. Требования к интеграции с внешними сервисами:

– API для интеграции, предоставление программного интерфейса (API) для интеграции с другими сервисами и приложениями;

– поддержка Webhooks, возможность отправки уведомлений о событиях в системе на внешние сервисы.

22. Требования к времени отклика системы:

– минимизация задержек, время отклика системы не должно превышать установленные нормативы для обеспечения комфортной работы пользователей. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 «Системная и программная инженерия. Модели качества систем и программного обеспечения» [23].

23. Требования к версии и совместимости:

– управление версиями, введение системы управления версиями программного обеспечения и документирование изменений.

24. Требования к безопасности сети:

– использование безопасных протоколов передачи данных, обеспечение защиты данных при передаче по сети посредством использования HTTPS и SSL/TLS;

– защита от DdoS-атак, внедрение мер по предотвращению и смягчению последствий распределенных атак типа «отказ в обслуживании».

25. Требования к управлению доступом:

– ролевое разграничение доступа, реализация системы прав доступа в соответствии с ролью пользователя (врач, пациент, администратор и т. д.);

– многофакторная аутентификация, возможность использования дополнительной проверки подлинности (SMS-код, приложение-аутентификатор).

26. Требования к резервному копированию:

– автоматическое резервное копирование, настройка регулярного автоматического резервирования данных с возможностью восстановления;

– хранение резервных копий, безопасное хранение резервных копий с учетом географической распределенности для повышения надежности.

27. Требования к аудиту безопасности:

– регулярные проверки безопасности, проведение периодических аудитов безопасности и устранение выявленных уязвимостей;

– сертификация безопасности, при необходимости получение сертификатов соответствия от аккредитованных органов.

28. Требования к соответствию международным стандартам:

– соответствие стандартам HL7 и DICOM, обеспечение совместимости с международными системами здравоохранения;

– поддержка ICD и SNOMED CT, использование международных классификаторов для кодирования диагнозов и процедур.

29. Требования к управлению качеством:

– внедрение системы менеджмента качества в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [24];

– непрерывное улучшение, сбор отзывов пользователей и внедрение изменений для повышения качества продукта.

30. Требования к документированию кода:

– комментирование и документирование кода для обеспечения легкости сопровождения и развития программного обеспечения;

– использование стандартов кодирования, соблюдение общепринятых стилей и практик программирования для выбранного языка.

Учитывая вышеописанные требования и соответствие установленным стандартам и ГОСТам, разработка программного обеспечения для сопровождения неврологических пациентов позволит обеспечить доступность и повысит качество оказываемых медицинских услуг, безопасность, конфиденциальность данных, а также удовлетворенность пользователей. Это улучшит эффективность лечения и реабилитации неврологических пациентов в период амбулаторного лечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были рассмотрены существующие методы и алгоритмы сопровождения неврологических пациентов в период амбулаторного лечения, направленные на улучшение процесса реабилитации, мониторинг состояния, повышение качества жизни и предотвращение возможных осложнений. Анализ текущих методов тестирования и постановки диагнозов показал, что применение комплексных подходов, которые сочетают клинические обследования с использованием цифровых технологий и датчиков, существенно повышает точность диагностики и качество реабилитации.

Исследование средств для автоматизации процесса мониторинга состояния пациентов в период реабилитации продемонстрировало, что существующие телемедицинские платформы, интегрированные с носимыми устройствами и мобильными приложениями, позволяют осуществлять непрерывный контроль за состоянием пациента и оперативно корректировать программу лечения. В качестве примера такого решения была рассмотрена система «НейроДом», которая обеспечивает дистанционную поддержку пациентов и взаимодействие с медицинским персоналом в режиме реального времени.

Формирование требований к программному обеспечению, в том числе функциональные и нефункциональные аспекты, а также соответствие существующим ГОСТам и нормативно-правовым актам Российской Федерации считается ключевым этапом в разработке качественного и надежного продукта. Соблюдение всех этих требо-

ваний позволяет обеспечить безопасность, конфиденциальность, легкость использования, а также внедрение в существующие медицинские системы.

Таким образом, разработка и внедрение современных информационных технологий в процесс амбулаторного лечения неврологических пациентов является одним из необходимых условий для повышения эффективности медицинской помощи. Написание и интеграция медицинского программного обеспечения, отвечающего установленным требованиям, позволяет улучшать как качество диагностики, так и скорость реабилитации, обеспечить более широкий и легкий доступ к медицинским услугам. Последующие исследования в данной области могут быть направлены на улучшение и использование существующих инструментов и разработок новых методик, которые способствуют улучшению ухода за неврологическими пациентами в период амбулаторного лечения.

Список источников

1. Информационные технологии в медицине. URL: <https://n3health.ru/informacionnye-tehnologii-v-medicine> (дата обращения: 22.09.2024).
2. Иванилова Т. Н., Прокопенко С. В., Попов А. А. и др. Проектные решения портала дистанционной нейрореабилитации «Нейродом» // Врач и информационные технологии. 2019. № 1. С. 73–80.
3. Российский рынок противоопухолевых препаратов: основные тренды и игроки. URL: <https://protiv-raka.ru/analytics/rossijskij-rynok-protivoopuholevykh-preparatov-osnovnye-trendy-i-igroki/> (дата обращения: 22.09.2024).
4. Shamay S. M., Mimi M. Y., Peiming Ch. et al. Reliability, concurrent validity, and minimal detectable change of timed up and go obstacle test in people with stroke // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2023. Vol. 104, no. 9. P. 1465–1473. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.03.001>.
5. Белова А. Н., Прокопенко С. В. Нейрореабилитация : моногр. М. : Москва, 2010. 1288 с.
6. ГОСТ Р 52636-2006. Электронная история болезни. Общие положения. М. : Стандартинформ, 2006. 37 с.
7. ГОСТ Р 52633.4-2011. Техника защиты информации. Интерфейсы взаимодействия с нейросетевыми преобразователями биометрия – код доступа. М. : Стандартинформ, 2019. 40 с.

References

1. Informatsionnye tekhnologii v meditsine. URL: <https://n3health.ru/informacionnye-tehnologii-v-medicine> (accessed: 22.09.2024). (In Russ.).
2. Ivanilova T. N., Prokopenko S. V., Popov A. A. et al. Project design portal teleservicing neurorehabilitation “Neurodom”. *Medical doctor and information technologies*. 2019;(1):73–80. (In Russ.).
3. Rossiiskii rynek protivopukholevykh preparatov: osnovnye trendy i igroki. URL: <https://protiv-raka.ru/analytics/rossijskij-rynok-protivoopuholevykh-preparatov-osnovnye-trendy-i-igroki/> (accessed: 22.09.2024). (In Russ.).
4. Shamay S. M., Mimi M. Y., Peiming Ch. et al. Reliability, concurrent validity, and minimal detectable change of timed up and go obstacle test in people with stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2023;104(9):1465–1473. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.03.001>.
5. Belova A. N., Prokopenko S. V. *Neiroreabilitatsiya: Monograph*. Moscow: Moskva; 2010. 1288 p. (In Russ.).
6. GOST (State Standard) R 52636-2006. Electronic medical history. General provisions. Moscow: Standardinform; 2006. 37 p. (In Russ.).
7. GOST (State Standard) R 52633.4-2011. Information protection technology. Interfaces of interaction with neural network converters biometrics – access code. Moscow: Standardinform; 2019. 40 p. (In Russ.).

8. ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2018. 8 с.
9. ГОСТ Р 51897-2002. Менеджмент риска. Термины и определения. М. : Госстандарт России, 2002. 8 с.
10. Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных : постановление Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119. Доступ из СПС «Гарант».
11. ГОСТ 28147-89. Системы обработки информации. Защита криптографическая. М. : Издательство стандартов, 1989. 25 с.
12. ГОСТ Р 57580.1-2017. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер. М. : Стандартинформ, 2020. 60 с.
13. ГОСТ Р ИСО 9241-210-2014. Эргономика взаимодействия человек – система. Человеко-ориентированное проектирование интерактивных систем. М. : Стандартинформ, 2018. 31 с.
14. ГОСТ Р 52872-2012. Интернет-ресурсы. Требования доступности для инвалидов по зрению. М. : Стандартинформ, 2013. 24 с.
15. HL7 2023 Annual report. URL: <https://www.hl7.org> (дата обращения: 22.09.2024).
16. ГОСТ Р ИСО 10007-2007. Руководящие указания по управлению конфигурацией. М. : Стандартинформ, 2008. 7 с.
17. ГОСТ 19.101-77. Виды программ и программных документов. М. : Стандартинформ, 2010. 2 с.
18. ГОСТ Р ИСО 9241-11-2011. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). М. : Стандартинформ, 2018. 21 с.
19. ГОСТ Р ИСО 56921-2016. Системная программная инженерия. Тестирование программного обеспечения. Процессы тестирования. М. : Стандартинформ, 2016. 59 с.
20. Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации : федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ // СЗ РФ. 2011. № 48. Ст. 6724. Доступ из СПС «Гарант».
21. Об утверждении порядка организации и оказания медицинской помощи с применением телемедицинских технологий : приказ Минздрава РФ от 30.11.2017 № 965н. Доступ из СПС «Гарант».
22. ГОСТ Р ИСО 14971-2009. Изделия медицинские. Применение менеджмента риска к медицинским изделиям. М. : Стандартинформ, 2011. 61 с.
23. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuARE). Модели качества систем и программных продуктов. М. : Стандартинформ, 2015. 29 с.
8. GOST (State Standard) R 55062-2012. Information technologies. Industrial automation systems and their integration. Interoperability. Basic provisions. Moscow: Standardinform; 2018. 8 p. (In Russ.).
9. GOST (State Standard) R 51897-2002. Risk management. Terms and definitions. Moscow: Gosstandart of Russia; 2002. 8 p. (In Russ.).
10. On approval of requirements for the protection of personal data during their processing in information systems of personal data: Resolution of the Government of the Russian Federation of 01.11.2012 No. 1119. Accessed through Law assistance system “Garant”. (In Russ.).
11. GOST (State Standard) 28147-89. Information processing systems. Cryptographic protection. Moscow: Standards Publishing House; 1989. 25 p. (In Russ.).
12. GOST (State Standard) R 57580.1-2017. Protection of information of financial organizations. Basic composition of organizational and technical measures. Moscow: Standardinform; 2020. 60 p. (In Russ.).
13. GOST (State Standard) R ISO 9241-210-2014. Ergonomics of human-system interaction. Human-centered design of interactive systems. Moscow: Standardinform; 2018. 31 p. (In Russ.).
14. GOST (State Standard) R 52872-2012. Internet resources. Accessibility requirements for the visually impaired. Moscow: Standardinform; 2013. 24 p. (In Russ.).
15. HL7 2023 Annual report. URL: <https://www.hl7.org> (accessed: 22.09.2024).
16. GOST (State Standard) R ISO 10007-2007. Guidelines for configuration management. Moscow: Standardinform; 2008. 7 p. (In Russ.).
17. GOST (State Standard) 19.101-77. Types of programs and program documents. Moscow: Standardinform; 2010. 2 p. (In Russ.).
18. GOST (State Standard) R ISO 9241-11-2011. Ergonomic requirements for office work using video display terminals (VDT). Moscow: Standardinform; 2018. 21 p. (In Russ.).
19. GOST (State Standard) R ISO 56921-2016. System software engineering. Software testing. Testing processes. Moscow: Standardinform; 2016. 59 p. (In Russ.).
20. On the fundamentals of health protection of citizens in the Russian Federation: federal law of 21.11.2011 No. 323-FZ. Collection of the articles of the Russian Federation. 2011. No. 48. Art. 6724. Accessed through Law assistance system “Garant”. (In Russ.).
21. On approval of the order of organization and provision of medical care with the use of telemedicine technologies: order of the Ministry of Health of the Russian Federation of 30.11.2017 No. 965n. Accessed through Law assistance system “Garant”. (In Russ.).
22. GOST (State Standard) R ISO 14971-2009. Medical devices. Application of risk management to medical devices. Moscow: Standardinform; 2011. 61 p. (In Russ.).

24. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М. : Стандартинформ, 2020. 23 с.
23. GOST (State Standard) R ISO/MEK 25010-2015. System and software engineering. Requirements and quality assessment of systems and software (SQuaRE). Quality models for systems and software products. Moscow: Standardinform; 2015. 29 p. (In Russ.).
24. GOST (State Standard) R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements. Moscow: Standardinform; 2020. 23 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Э. Г. Тунян – инженер.
В. Б. Тютюнник – студент.
С. Р. Сазиков – инженер.
Т. В. Гавриленко – заместитель директора.

About the authors

E. G. Tunyan – Engineer.
V. B. Tyutyunnik – Student.
S. R. Sazikov – Engineer.
T. V. Gavrilenko – Deputy Director.

Научная статья

УДК 621.396.96

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-8>

Подповерхностное радиолокационное зондирование пластиковых объектов

Евгений Леонидович Шошин*Сургутский государственный университет, Сургут, Россия**shoshin_el@surgu.ru*

Аннотация. Получены соотношения по расчету уровня сигнала, рассеянного пластиковым объектом при подповерхностном радиолокационном зондировании. Приведены радиолокационные изображения пластиковых дисков, заглубленных в песок. Выполнен анализ связи радиолокационного контраста изображения пластикового диска с энергетическим потенциалом системы. Раскрыта процедура радиолокационного измерения ориентации трубы, заглубленной в подповерхностную среду. Описана конструкция радиолокатора подповерхностного зондирования с резонансной компрессией сигналов.

Ключевые слова: энергетический потенциал, радиолокационный контраст, пластиковый диск, резонансная компрессия, подповерхностная среда

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда научно-технологического развития Югры в рамках научного проекта № 2023-05-01.

Для цитирования: Шошин Е. Л. Подповерхностное радиолокационное зондирование пластиковых объектов // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 83–91. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-8>.

Original article

Subsurface radar sensing of plastic objects

Evgeny L. Shoshin*Surgut State University, Surgut, Russia**shoshin_el@surgu.ru*

Abstract. The ratios for calculating the signal level scattered by a plastic object during subsurface radar sensing are obtained. Radar images of plastic discs buried in the sand are shown. Researchers performed the analysis of the connection between the radar contrast of the plastic disk image and the system's energy potential. The article presents a procedure for measuring the orientation of a subsurface pipe using radar. This article describes a subsurface sounding radar design using resonant signal compression.

Keywords: energy potential, radar contrast, plastic disk, resonance compression, subsurface environment

Funding: the article is supported by the Foundation for Scientific and Technological Development of Yugra within the project No. 2023-05-01.

For citation: Shoshin E. L. Subsurface radar sensing of plastic objects. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):83–91. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-8>.

ВВЕДЕНИЕ

Георадарные исследования, проводимые на территории РФ, направлены на изучение состояния дорожного покрытия, инженерных сетей подземной коммуникации, строительных блоков и конструкций и др. [1–3]. Заглубленные в грунт металлические предме-

ты и включения в составе бетонных конструкций обладают высокой электропроводностью, и при подповерхностном радиолокационном зондировании они уверенно обнаруживаются оператором георадарной съемки. Пластиковые объекты, заглубленные в грунт, имеют малую эффективную поверхность рассеяния

(ЭПР), что затрудняет их обнаружение методом подповерхностного радиолокационного зондирования [4].

Целью исследования является анализ характеристик рассеяния пластиковых объектов, связи энергетического потенциала георадара и радиолокационного контраста изображений пластиковых дисков, процедуры радиолокационного измерения ориентации заглубленных труб в подповерхностной среде и разработка радиолокатора подповерхностного зондирования с резонансной компрессией поляризационно-модулированных радиоимпульсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пластиковые объекты вследствие своей почти нулевой электропроводности могут быть отнесены к категории диэлектриков. ЭПР пластикового объекта будет зависеть от его формы, диэлектрической проницаемости (ϵ) и длины волны облучающего сигнала (λ).

При размерах пластиковых объектов, сравнимых с длиной волны облучающего сигнала, расчет ЭПР (σ) выполняют, используя численные методы анализа. На рис. 1 приведены рассчитанные в FEKO (Finite Element Method во Microwave Engineering – метод конечных элементов в микроволновой технике) угловые зависимости ЭПР пластиковых дисков ($\epsilon = 5$, $\text{tg}\delta = 0,002$) диаметром 15 см (1) и 30 см (2) при $\lambda = 17,6$ см.

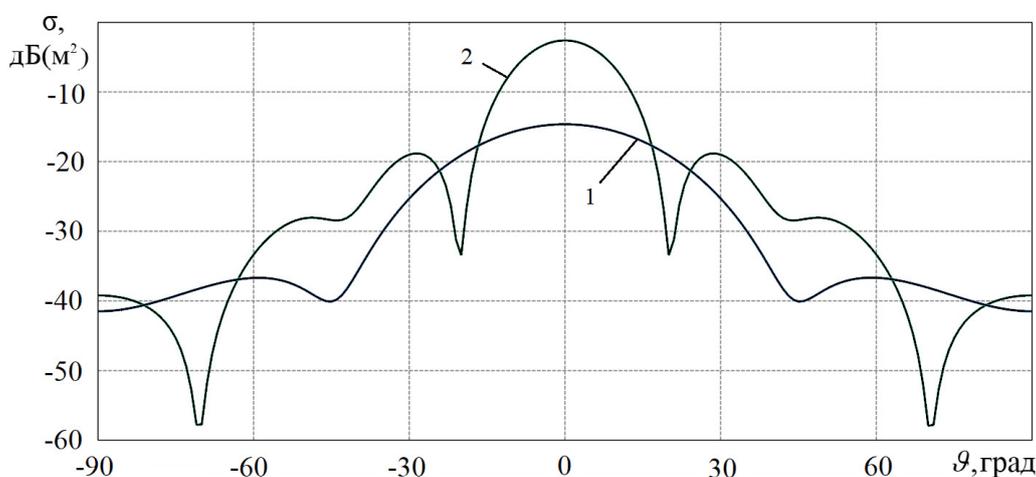


Рис. 1. Угловая зависимость ЭПР пластиковых дисков
 Примечание: составлено автором.

При подповерхностном радиолокационном зондировании на формирование изображения заглубленного объекта влияют направленные свойства передающей и приемной антенн, приводящие к формированию годографов в форме гиперболы. Реализация алгоритма синтеза апертуры позволяет локализовать изображение заглубленного пластикового объекта благодаря трансформации энергии гиперболических участков в энергию вершины годографа (рис. 2).

Подповерхностное радиолокационное зондирование плоского пластикового объекта приводит к отражению с коэффициентом Френеля (1), вызванному отличием диэлектрических проницаемостей пластикового объекта (ϵ_1) и подповерхностной среды (ϵ):

$$k = \frac{\sqrt{\epsilon} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon} + \sqrt{\epsilon_1}}. \quad (1)$$

Мощность сигнала, рассеянного пластиковым объектом, будет равна (2):

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \frac{V_1}{4\pi R_1^2} k_p^2 \sigma \frac{V_2}{4\pi R_2^2} \frac{G_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, $G_{\text{пер}}$ и $G_{\text{пр}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны, $\eta_{\text{пер}}$ и $\eta_{\text{пр}}$ – коэффициенты полезного действия антенн, R_1 и R_2 – расстояние от передающей антенны до объекта и от объекта до приемной антенны, V_1 и V_2 – поляризационные и энергетические потери (3),

$$k_p = k \frac{\sqrt{\epsilon_1} + 1}{\sqrt{\epsilon_1} - 1} = \frac{(\sqrt{\epsilon} - \sqrt{\epsilon_1}) \cdot (\sqrt{\epsilon_1} + 1)}{(\sqrt{\epsilon} + \sqrt{\epsilon_1}) \cdot (\sqrt{\epsilon_1} - 1)}, \quad (3)$$

k_p – коэффициент отражения с учетом условий измерения ЭПР.

При облучении пластикового объекта, мощность рассеянного сигнала будет зависеть от диэлектрического скачка на границе пластик-подповерхностная среда. На рис. 3 приведена угловая зависимость $k_p^2 \sigma$, соответствующая диэлектрическому скачку на границе пластикового диска диаметром 30 см ($\epsilon_1 = 5$) и песка ($\epsilon = 4,7$).

Радиолокационный контраст изображений

Радиолокационные изображения подповерхностных сред и объектов демонстрируют контраст, зависящий от ряда параметров: ЭПР, длины волны облучающего сигнала, глубины залегания, погонного ослабления, коэффициентов усиления антенн и мощности излученного сигнала (4). На рис. 4 приведены радиолокационные изображения пластикового диска диаметром 15 см, полученные при георадарном профилировании с поверхности песка на частоте 1700 МГц для различных значений энергетического потенциала:

$$p, \text{ дБ} = P_{\text{пер}}, \text{ дБм} - P_{\text{пр}}, \text{ дБм} + (G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}}), \text{ дБ} + (\eta_{\text{пер}} + \eta_{\text{пр}}), \text{ дБ}. \quad (4)$$

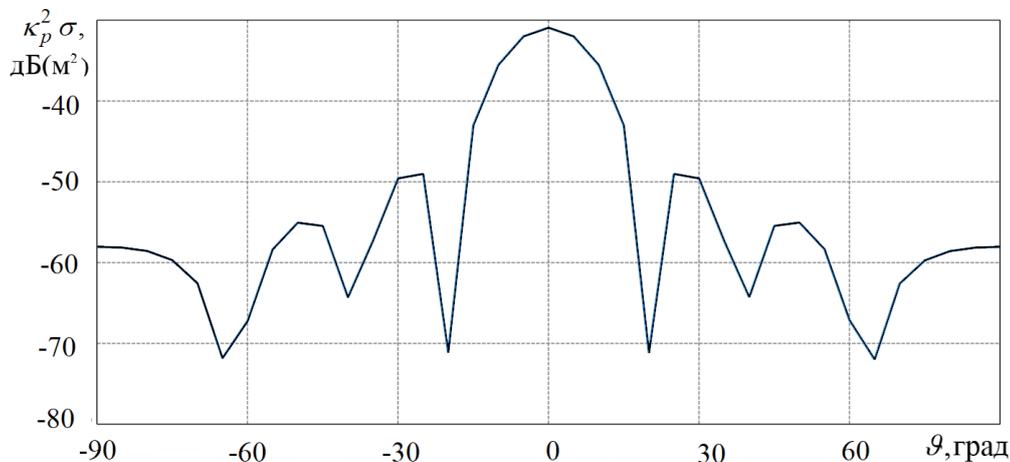


Рис. 3. Угловая зависимость $k_p^2 \sigma$ пластикового диска
Примечание: составлено автором.

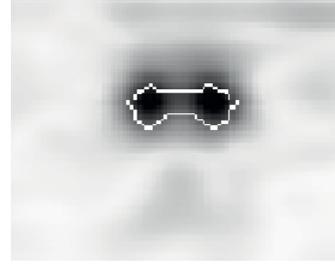


Рис. 2. Радиолокационное изображение пластикового диска диаметром 30 см
Примечание: составлено автором.

Радиолокационный контраст может быть оценен через отношение (Q) усредненного уровня сигнала от пластикового объекта I_1 , заключенного в область интереса на изображении, к усредненному значению сигнала от подповерхностной среды I_2 . Энергетический потенциал p георадара ОКО 2 с учетом усиления антенн может быть рассчитан по формуле (5) и (6):

$$p, \text{ дБ} = 134 + M, \text{ дБ}, \quad (5)$$

где

$$M, \text{ дБ} = (G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}}), \text{ дБ} + (\eta_{\text{пер}} + \eta_{\text{пр}}), \text{ дБ}. \quad (6)$$

В табл. 1 приведены результаты измерения радиолокационного контраста изображения пластикового диска, заглубленного в песок на глубину 15 см, при различном энергетическом потенциале георадара.

Связь радиолокационного контраста Q_L изображения пластикового диска на глубине залегания L и погонным затуханием подпо-



Рис. 4. Радиолокационные изображения пластикового диска при разном энергетическом потенциале
 а) p , дБ = 136; б) p , дБ = 146

Примечание: составлено автором.

Таблица 1

Связь радиолокационного контраста с энергетическим потенциалом

M , дБ	2	4	6	8	10	12
p , дБ	136	138	140	142	144	146
Q	1,34	1,82	2,23	2,73	2,95	3,11

Примечание: составлено автором.

верхностной среды Γ с энергетическим потенциалом имеет вид (7):

$$Q_L, \text{ дБ} = f(p(\text{дБ}) + Z(\text{дБ})), \quad (7)$$

где $f(p(\text{дБ}) + Z(\text{дБ})) = Q$ из табл. 2 при (8).

$$Z = M(\text{дБ}) - 2\Gamma(\text{дБ/м}) L(\text{м}). \quad (8)$$

Радиолокационное измерение ориентации труб в подповерхностной среде

При подповерхностном радиолокационном зондировании заглубленных труб важно уметь определять направление пересечения объекта и его типоразмер (диаметр). Для достижения этого рассмотрим процедуру профилирования участка местности георадаром, работающим в режиме радиолокационного зондирования поляризационно-модулированными сигнала-

ми при помощи излучателей Вивальди. В качестве таких излучателей могут использоваться антенны антиподального типа с диапазоном рабочих частот 500–700 МГц [5].

В зависимости от угла γ (рис. 5) излучатели 1 и 2 будут пересекать заглубленную трубу с углами $45^\circ - \gamma$ и $45^\circ + \gamma$, а с излучателей 3 и 4 будут сниматься рассеянные сигналы ортогональных линейных поляризаций с последующим формированием радарограмм.

Протяженность радиолокационных изображений, полученных под различными углами пересечения трубы, будет разной (9):

$$L_1 = \frac{d}{\cos(45^\circ - \gamma)} \text{ и } L_2 = \frac{d}{\cos(45^\circ + \gamma)}, \quad (9)$$

где d – диаметр трубы.

На рис. 6 приведены примеры георадарного профилирования заглубленной в песок трубы под разными углами, полученные путем моделирования в gprMax (Ground-Penetrating Radar Max – Радар подповерхностного зондирования – Максимум) [6].

Угол γ находится из отношения L_1 и L_2 (10) и (11):

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\cos(45^\circ - \gamma)}{\cos(45^\circ + \gamma)}, \quad (10)$$

$$\gamma = \arctg \frac{L_1}{L_2} - \frac{\pi}{4}. \quad (11)$$

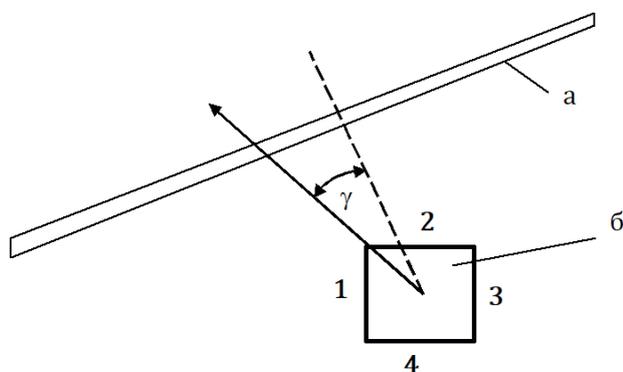


Рис. 5. Схема профилирования заглубленной в грунт трубы: а – труба; б – антенная система

Примечание: составлено автором.

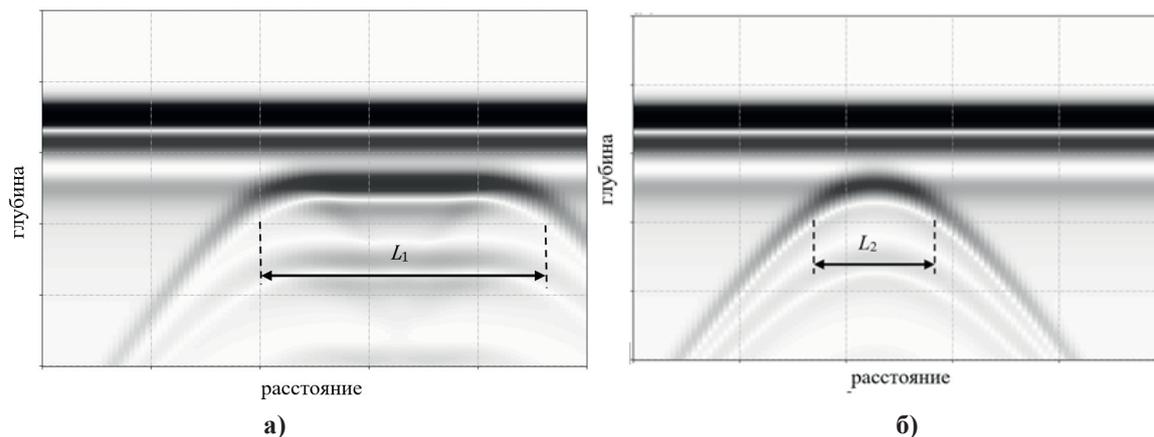


Рис. 6. Примеры георадарного профилирования заглубленной в грунт трубы:
а) 1-й профиль; б) 2-й профиль

Примечание: составлено автором.

При $\gamma = 0$ радиолокационные изображения будут одинаковой протяженности на обоих профилях.

Рассмотренная процедура измерения ориентации не накладывает ограничений на физические свойства труб, которые могут быть изготовлены из металла, керамики, пластика и т.д. Измерение поперечной ЭПР трубы дополнительно требует проведения внешней калибровки и позволяет определить типоразмер (диаметр) [7].

Радиолокатор подповерхностного зондирования с коаксиальной резонансной компрессией поляризационно-модулированных радиоимпульсов

С целью увеличения энергетического потенциала рассмотрим реализацию георадара с коаксиальной резонансной компрессией поляризационно-модулированных радиоимпульсов.

На рис. 7 приведена схема системы компрессии, в которой переключение режима накопления в режим вывода СВЧ-энергии происходит за счет быстрой перестройки укорачивающей емкости, образованной разрывом центрального проводника коаксиального волновода при развитии в зазоре СВЧ-разряда и приводящей к инверсии фазы выходной волны [8].

В табл. 2 приведены параметры импульсов излучения коаксиальными резонансными компрессорами.

Проведенные исследования резонансных компрессоров коаксиального типа показывают возможность реализации радиолокаторов подповерхностного зондирования, способные формировать импульсы наносекундной длительности с пиковой мощностью 100 кВт...1,6 МВт в дециметровом диапазоне частот. На рис. 8 приведена структурная схе-

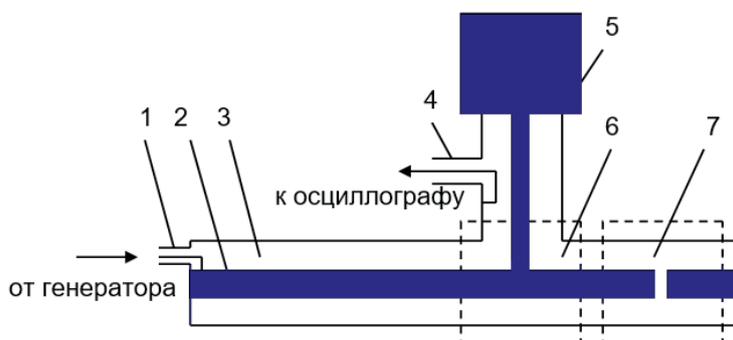


Рис. 7. Схема коаксиальной системы резонансной компрессии: 1 – петля возбуждения; 2 – внутренний проводник; 3 – внешний экран; 4 – петля индикации; 5 – согласованная нагрузка; 6 – Т-образное сочленение; 7 – емкостной зазор

Примечание: составлено по источнику [8].

Таблица 2

Параметры импульсов излучения на выходе коаксиальных компрессоров

Несущая частота, МГц	Длительность импульса, нс	Пиковая мощность, кВт	Частота повторения, Гц	Коэффициент усиления мощности М, дБ
36,5	75	160	10	12
150	20	1600	500	22
900	2.5	100	1000	20

Примечание: составлено по источнику [9].

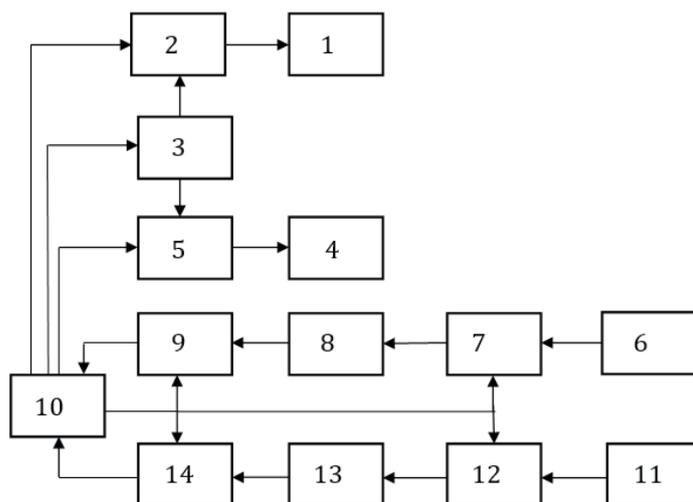


Рис. 8. Структурная схема радиолокатора подповерхностного зондирования: 1, 4 – передающие антенны; 2, 5 – коаксиальные резонансные компрессоры; 3 – генератор СВЧ импульсов; 6, 11 – приемные антенны; 7, 12 – электронные ключи; 8, 13 – высокочастотные усилители; 9, 14 – стробоскопические приемники; 10 – устройство синхронизации и управления (УСУ)

Примечание: составлено автором.

ма радиолокатора подповерхностного зондирования с резонансной компрессией излученных сигналов.

При работе подповерхностного радиолокатора УСУ формирует сигналы запуска генератора СВЧ-импульсов, стробоскопических преобразователей и электронных ключей в моменты времени $t = nT$ ($n = 1, 2, 3...$), где T – период следования синхроимпульсов. Резонансные компрессоры в моменты времени $t = 2nT$ и $t = (2n - 1)T$ ($n = 1, 2, 3...$) попеременно формируют мощные высокочастотные радиоимпульсы. Антенная система, образованная из излучателей Вивальди (рис. 5), будет формировать поляризационно-модулированные сигналы в продольном и поперечном направлениях облучения подповерхностной среды. При приеме электронные ключи и высокочастотные усилители пропускают радиосигналы, сформированные приемными

антеннами и пришедшие с определенной временной задержкой, которая задает рабочий диапазон глубин радиолокатора. Стробоскопические приемники преобразуют принятые сигналы в выходные радиоимпульсы, форма и временной масштаб которых позволяют выполнить аналого-цифровое преобразование. Цифровая обработка сигналов, выполняемая радиолокатором для первого и второго приемного каналов, включает в себя построение радиолокационных изображений, что позволяет реализовать процедуру измерения ориентации заглубленных труб в подповерхностной среде, рассмотренную выше.

Проведем расчет глубины зондирования пластиковых труб радиолокатором подповерхностного зондирования с коаксиальной резонансной компрессией излученных сигналов (12). Энергетический потенциал радиолокатора, необходимый для подповерхностного

зондирования пластикового объекта с ЭПР σ на глубину x , равен [3]:

$$p(x) = 10 \lg \left[\frac{64\pi^3 (H + x / \sqrt{\epsilon})^4}{G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda k_p^2 \sigma} \right] + 2\Gamma x - 20 \log(1 - k_1^2), \quad (12)$$

где H – высота подвеса радиолокатора относительно земли; Γ – погонное затухание в среде; k_1 – коэффициент отражения сигнала от границы воздух–грунт, рассчитываемый по формуле (13).

$$k_1 = \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1}. \quad (13)$$

На рис. 9 приведены результаты расчета энергетического потенциала, необходимого для радиолокационного подповерхностного зондирования пластиковой трубы диаметром 30 см с борта воздушного носителя (1) и поверхности земли (2) при $\lambda = 17,6$ см; $H = 400$ м; $\Gamma = 23$ дБ/м; $G_{\text{пер}} = G_{\text{пр}} = 6$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Соотношение (3) позволяет определить уменьшение мощности сигнала, рассеянного пластиковым объектом при подповерхностном радиолокационном зондировании, в сравнении с атмосферным облучением. Для пластикового диска диаметром 30 см, заглубленного в песок (рис.1), $20 \log k_p = 27,9$ дБ, что соответствует результатам моделирования в ФЕКО (рис. 3).

Кроме уменьшения мощности в зависимости от знака диэлектрического скачка будут

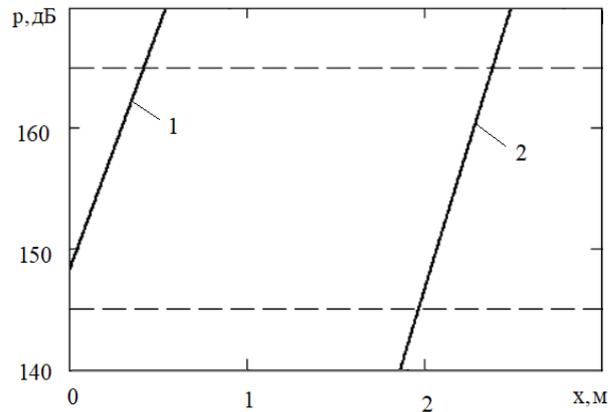


Рис. 9. Зависимость энергетического потенциала от глубины залегания пластиковой трубы
Примечание: составлено автором.

проявляться определенные фазовые свойства рассеянного сигнала. Когда $\epsilon_1 < \epsilon$ коэффициент k отрицателен, а отраженный сигнал при этом формируется в противофазе к зондирующему сигналу (рис. 10а). При $\epsilon_1 > \epsilon$ коэффициент $k > 0$ и форма отраженного сигнала будет повторять форму, которую он имел до отражения (рис. 10б).

Соотношения (7) и (8) позволяют найти радиолокационный контраст изображения пластикового диска, который будет получен путем георадарного профилирования с тем или иным значением энергетического потенциала системы. Для диска, заглубленного в песок на глубину 0,3 м, погонного затухания 10 дБ и $M = 10$ дБ можно получить радиолокационный контраст $Q_L = 1,82$ дБ.

Результаты измерений свидетельствуют, что увеличение энергетического потенциала георадара приводит к увеличению

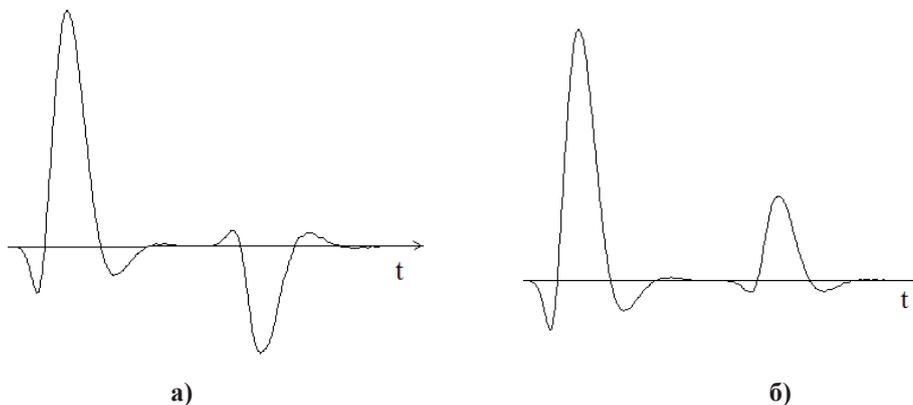


Рис. 10. Форма зондирующего и отраженного сигналов а) $\epsilon_1 < \epsilon$; б) $\epsilon_1 > \epsilon$

Примечание: составлено автором.

радиолокационного контраста изображений пластикового диска (табл. 1).

Результаты моделирования свидетельствуют, что протяженность радиолокационных изображений заглубленных труб в подповерхностной среде зависит от угла пересечения георадаром при профилировании (рис. 6).

Результаты расчета свидетельствуют (рис. 9), что резонансная компрессия зондирующих сигналов позволяет увеличить энергетический потенциал георадара до 165 дБ, что позволяет обнаружить пластиковую трубу с борта воздушного носителя и приводит к увеличению глубины радиолокационного зондирования с поверхности земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружение пластиковых объектов методом подповерхностного радиолокационного зондирования зависит от диэлектрического скачка на границе объект – укрывающая среда. В отсутствии диэлектрического скачка об-

наружение пластикового объекта становится невозможным.

Радиолокационный контраст изображений пластиковых объектов напрямую связан с энергетическим потенциалом георадара, глубиной залегания и погонным затуханием в подповерхностной среде.

Протяженность радиолокационных изображений заглубленных труб в подповерхностной среде зависит от угла пересечения георадаром при профилировании. Подповерхностное радиолокационное зондирование с помощью излучателей Вивальди позволяет облучать заглубленную трубу поляризационно-модулированными сигналами и измерять ориентацию трубы в подповерхностной среде.

Радиолокатор подповерхностного зондирования с резонансной коаксиальной компрессией сигналов обладает энергетическим потенциалом в 155...165 дБ и способен обнаруживать пластиковые объекты с поверхности земли и с борта воздушного носителя.

Список источников

1. Александров П. Н. Теоретические основы георадарного метода : моногр. М. : Физматлит, 2017. 112 с.
2. Jol H. M., editor. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. 1st ed. Amsterdam : Elsevier Science, 2009. 544 p.
3. Финкельштейн М. И., Карпукхин В. И., Кутев В. А. и др. Подповерхностная радиолокация. М. : Радио и связь, 1994. 216 с.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации : моногр. / отв. ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 413 с.
5. Шошин Е. Л. Исследование характеристик антенны Вивальди // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 3. С. 152–158.
6. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. 2016. No. 209. P. 163–170.
7. Шошин Е. Л. Измерение эффективной поверхности рассеяния локальных объектов радиолокатором подповерхностного зондирования // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.8>.
8. Артеменко С. Н., Новиков С. А., Юшков Ю. Г. Коаксиальные резонаторы в компрессорах СВЧ импульсов // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314, № 4. С. 127–131.
9. Чумерин П. Ю., Юшков Ю. Г. Подповерхностный радиолокатор с резонансной компрессией излучен-

References

1. Aleksandrov P. N. Teoreticheskie osnovy georadarnogo metoda. Monograph. Moscow: Fizmatlit; 2017. 112 p. (In Russ.).
2. Jol H. M., editor. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science; 2009. 544 p.
3. Finkelshtein M. I., Karpukhin V. I., Kutev V. A. et al. Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya. Moscow: Radio i svyaz; 1994. 216 p. (In Russ.).
4. Grinev A. Yu., editor. Voprosy podpoverkhnostnoi radiolokatsii. Monograph. Moscow: Radiotekhnika; 2005. 413 p. (In Russ.).
5. Shoshin E. L. Investigating the characteristics of the Vivaldi antenna. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2022;(3):152–158. (In Russ.).
6. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*. 2016;(209):163–170.
7. Shoshin E. L. Izmerenie effektivnoi poverkhnosti rasseyaniya lokalnykh obieektov radiolokatorom podpoverkhnostnogo zondirovaniya. *Zhurnal radioelektroniki*. 2022;(11). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.8>. (In Russ.).
8. Artemenko S. N., Novikov S. A., Yushkov Yu. G. Koaksialnye rezonatory v kompressorakh SVCh impulsov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009;314(4):127–131. (In Russ.).

ных сигналов // Радиолокация, навигация, связь: материалы Междунар. науч.-технич. конф., 14–16 апреля 2015 г., г. Воронеж. Воронеж : НПФ «Саквоее», 2015. Т. 2. С. 546–552.

9. Chumerin P. Yu., Yushkov Yu. G. Podpoverkhnostnyi radiolokator s rezonansnoi kompressiei izluchennykh signalov. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz”*, April 14–16, 2015, Voronezh. Voronezh: NPF “Sakvoee”; 2015. Vol. 2. p. 546–552. (In Russ.).

Информация об авторе

Е. Л. Шошин – кандидат технических наук, доцент.

About the author

E. L. Shoshin – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья

УДК 519.87:687

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-9>



**О математических моделях размещения оборудования при проектировании
и реконструкции предприятий**

Наталья Сергеевна Веремчук

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

n-veremchuk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2709-9755>

Аннотация. Приводится обзор математических моделей размещения технологического оборудования, применяемых при решении задач проектирования и модернизации производственных цехов. Рассматриваются случаи размещения взаимосвязанного оборудования. Построена математическая модель размещения производственных линий и технологического оборудования на них. Линии соединены вертикальным виадуком, через который проводятся коммуникации. На линиях зафиксированы запрещенные зоны, где нельзя располагать другие элементы. Приведены результаты численных экспериментов с применением построенной модели нелинейного программирования и пакета CPLEX. Рассмотрены две серии тестовых примеров, когда расположение виадука фиксировалось и когда находилось его оптимальное размещение. При поиске расположения виадука получилось лучшее значение целевой функции, чем при фиксированном виадуке, но время счета увеличивалось. Модель может быть использована при проектировании и оценке размещения технологических линий с оборудованием в промышленных отраслях.

Ключевые слова: технологические линии, оборудование, запрещенные зоны, виадук

Для цитирования: Веремчук Н. С. О математических моделях размещения оборудования при проектировании и реконструкции предприятий // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 92–99. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-9>.

Original article

On mathematical models of equipment placement in design and reconstruction of enterprises

Natalya S. Veremchuk

The Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

n-veremchuk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2709-9755>

Abstract. The article provides an overview of mathematical models for the placement of process equipment. These models are used to solve problems of designing and upgrading production shops. Cases of placement of interconnected equipment are considered. A mathematical model for the placement of production lines and process equipment on them is constructed. The lines are connected by a vertical viaduct through which communications are carried out. The model designates prohibited zones on the lines where no other elements can be placed. The results of numerical experiments using the constructed nonlinear programming model and the CPLEX package are presented. The study considers two series of test examples: one with a fixed viaduct location and another determining its optimal placement. A better value of the objective function was obtained

when searching for the location of the viaduct, but the calculation time increased. The model can be used in the design and assessment of the process lines placement with equipment in industrial sectors.

Keywords: processing lines, equipment, prohibited zones, viaduct

For citation: Veremchuk N. S. On mathematical models of equipment placement in design and reconstruction of enterprises. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):92–99. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-9>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы при разработке проектных решений предприятий широко применяются математическое моделирование и методы оптимизации [1, 2]. Большое значение при этом отводится решению задач оптимального размещения технологических линий, оборудования [3, 4]. Острая необходимость в решении таких задач возникает на этапах проектирования и реконструкции производственных участков. Неоптимальное размещение может привести к серьезным затратам не только финансовым, но и ресурсным. При выполнении проектирования сначала, как правило, определяется расположение технологических линий и далее осуществляется оптимальное размещение оборудования на них. В некоторых случаях положение линий находится с учетом уже фиксированного расположения оборудования. Все это определяется спецификой предприятия и его производственной деятельностью. При реконструкции предприятий положение производственных линий фиксировано и требуется заменить некоторые единицы оборудования с целью переналадки производства, например, на выпуск новой продукции. В таких случаях часть оборудования остается на месте. Его можно рассматривать как специальные области (запрещенные зоны), где невозможно новое расположение объектов [5, 6].

Технологическое оборудование может быть связано между собой и с внешними объектами различными коммуникациями (связями). Причем могут варьироваться и способы прокладки коммуникаций, например, через специальные проходы между линиями (виадуками). При этом часто необходимо минимизировать суммарную стоимость коммуникаций. Кроме того, активное внимание уделяется вопросам минимизации занимае-

мой оборудованием площади. Такие задачи широко применяются в условиях ограниченности занимаемых площадей производственных цехов [4, 7]. С целью сокращения суммарных затрат, связанных с размещением оборудования, следует уделять внимание проектированию и оптимальному расположению технологических линий производства в процессах проектирования, реконструкции предприятий.

В данной работе приводится обзор математических моделей размещения технологического оборудования при проектировании и реконструкции производственных цехов. Построена модель нелинейного программирования для задачи размещения линий с технологическим оборудованием. Соседние линии соединены вертикальным виадуком, через который проводятся коммуникации. На линиях имеются фиксированные прямоугольные запрещенные зоны, размещение в которых не допускается. Приведены результаты численных экспериментов с применением построенной модели нелинейного программирования и пакета CPLEX. Рассмотрены две серии тестовых примеров: первая – при фиксированном расположении виадука; вторая – когда оптимальное расположение виадука находилось в результате решения задачи. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и реконструкции производственных цехов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Математическая модель размещения единиц швейного оборудования

В работе [8] построена математическая модель размещения модулей швейного оборудования. Технологическое оборудование комплектуется в специализированные модули для обработки деталей.

При производстве одного вида изделия применяются разные виды модулей. Это диктуется технологической картой производства продукции. Модуль – это прямоугольник длины l_i и ширины h_i (рис. 1).

С учетом направления швейного потока в цехе размещение модулей осуществляется вдоль осевых линий. Требуется разместить модули на линиях так, чтобы минимизировать площадь под оборудованием (рис. 1).

Пусть m – число линий, а n – количество модулей. Переменная x_{ik} принимает значение 1, если модуль с номером i находится на линии с номером k , и 0 – иначе.

$$x_{ik} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, m. \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Дополнительные ограничения на размещение модулей можно записать так:

$$\sum_{i=1}^n l_i x_{ik} + \Lambda \left(\sum_{i=1}^n x_{ik} - 1 \right) \leq L, \quad k = 1, \dots, m. \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m \max \{h_1 x_{k1}, \dots, h_n x_{kn}\} + (m-1)\Delta + 2d \leq H, \quad (4)$$

где L и H – длина и ширина производственного участка, Λ – минимально допустимые расстояния между модулями, Δ – минимальное расстояние между оборудованием на соседних линиях, d – минимальное допустимое расстояние.

Максимальная суммарная длина модулей на линиях определяется выражением:

$$f(x) = \max \left[\sum_{i=1}^n l_i x_{i1} + \Lambda \left(\sum_{i=1}^n x_{i1} - 1 \right), \dots, \sum_{i=1}^n l_i x_{im} + \Lambda \left(\sum_{i=1}^n x_{im} - 1 \right) \right]. \quad (5)$$

Ширина окаймляющего прямоугольника $g(x^*)$, содержащего все оборудование, для некоторого набора булевых переменных $x^* = (x_{ik}^*)$, $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, m$, определяется выражением:

$$g(x^*) = \max \{h_1 x_{11}^*, \dots, h_n x_{n1}^*\} + \dots + \max \{h_1 x_{1m}^*, \dots, h_n x_{nm}^*\} + \Delta(m-1).$$

Соотношения между сторонами окаймляющего прямоугольника можно записать в виде:

$$\alpha_1 \leq \frac{f(x)}{g(x)} \leq \alpha_2, \quad (6)$$

где α_1 и α_2 – параметры.

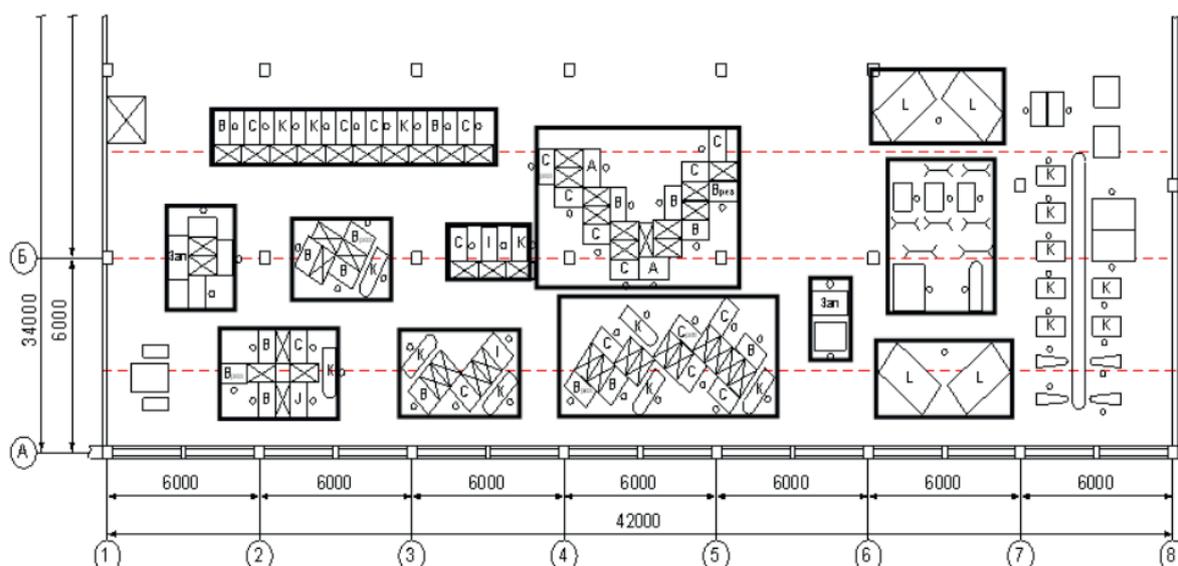


Рис. 1. Пример расположения технологических линий
 Примечание: скриншот автора.

В результате решения требуется минимизировать площадь окаймляющего прямоугольника:

$$S(x) = f(x)g(x) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Для решения задачи (1)–(7) предложены алгоритмы последовательно-одиночного размещения [8].

2. Модель многокритериальной оптимизации

В процессе конструкторско-технологической подготовки производства часто требуется решать многокритериальные оптимизационные задачи, например для предприятий промышленности [9]. При этом возникает необходимость рассматривать решение задач размещения технологического оборудования.

Пусть $J = \{1, \dots, n\}$ – множество номеров размещаемых объектов с длиной и шириной

$l_j, h_j, l_j, h_j \in Z^+, j \in J; M = \{1, \dots, m\}$ – множество номеров осевых линий, переменная

$z_{jk} = 1$, если объект j расположен на линии k , $z_{jk} = 0$, иначе $j \in J, k \in M$.

Модель целочисленного программирования имеет вид [10]:

$$Q_1(z) = \max_{k \in M} \left\{ \sum_{j \in J} l_j z_{jk} \right\} \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$Q_2(z) = \sum_{k \in M} \max_{j \in J} \{h_j z_{jk}\} \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\sum_{k \in M} z_{jk} = 1, \quad j \in J, \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} z_{jk} \geq 1, \quad k \in M, \quad (11)$$

$$z_{jk} \in \{0, 1\}, \quad j \in J, k \in M. \quad (12)$$

Рассматриваются два критерия – минимизация максимальной суммарной длины объектов на линиях (8) и минимизация суммарной ширины максимальных по ширине объектов на каждой линии (9). Условия расположения

объектов на линиях заданы в ограничениях (10) и (11).

В работе [10] для поиска оптимального решения задачи (8)–(12) применялся метод уступок и решалась серия однокритериальных задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ Модель размещения взаимосвязанных объектов

Рассмотрим случай размещения взаимосвязанных объектов на линиях. Пусть положение линий неизвестно и его требуется найти. Для удобства рассмотрим случай двух линий.

Заданы два параллельных отрезка длиной LS с фиксированными на них прямоугольниками – запрещенными зонами. Расположение новых элементов в запрещенных зонах недопустимо. Отрезки будем далее называть линиями. С целью возможности обслуживания оборудования линии должны быть на таком расстоянии друг от друга, чтобы между ними выполнялись прямые проезды.

Задано множество новых прямоугольных объектов (оборудование), центры которых связаны коммуникациями между собой и с зонами. Коммуникации между объектами и зонами на разных линиях должны проходить через вертикальную составляющую (виадук).

Задача состоит в нахождении оптимального размещения линий и новых объектов на них вне запрещенных зон так, чтобы суммарная стоимость коммуникаций объектов между собой и с зонами, а также площадь, занимаемая линиями с оборудованием, были минимальны.

Пусть X_i и F_j – это объекты и зоны с длиной и высотой l_i, h_i и p_j, h_j , и центрами (x_i, y_i) и (b_{1p}, b_{2p}) , где $i \in I = \{1, \dots, n\}$ и Обозначим через $w_{ij} \geq 0, u_{ik} \geq 0$ стоимость связей между X_i и F_j, X_i и X_k для $i, j \in J, i < k$, соответственно. Пусть линии параллельны оси Ox и левая граница каждой из них находится в точке $(0, Ly_t)$, где $t = 1, 2, Ly_1 \leq Ly_2, \delta$ – расстояние между линиями. Положение линий определяется в ходе решения задачи, поэтому значения Ly_t неизвестны.

Представим множество J в виде объединения $J = JL_1 \cup JL_2$, где Ly_t – множество номеров зон на линии с номером $t, t = 1, 2$.

Вертикальный виадук, соединяющий линии, обозначим через V , а абсциссу точки его расположения – через x_0 . Отметим, что высота виадука V будет равна $Ly_2 - Ly_1$.

Задача заключается в поиске расположения линий и объектов X_1, \dots, X_n на них вне запрещенных зон F_1, \dots, F_m так, чтобы они не пересекались друг с другом и суммарная стоимость связей объектов между собой и с зонами, а также площадь окаймляющего прямоугольника $S = LS \cdot Ly_2$ были минимальны.

С учетом вышесказанного условия минимизации площади S будут соответствовать условиям минимизации величины Ly_2 .

Введем булевы переменные: $z_{it} = 1$, если X_i размещается на линии с номером t , $i \in I$, $t = 1, 2$, и $z_{it} = 0$ иначе.

Математическая модель для нефиксированных линий с виадуком и запрещенными зонами записывается так:

$$G = \sum_{t=1}^2 \sum_{i \in I} \sum_{j \in JL_t} w_{ij} (z_{it} |x_i - b_{1j}| + (1 - z_{it})(|x_i - x_0| + |b_{1j} - x_0| + Ly_2 - Ly_1)) + \quad (13)$$

$$+ \sum_{t=1}^2 \sum_{i \in I} \sum_{k \in I, i < k} u_{ik} (z_{it} z_{kt} |x_i - x_k| + z_{it} (1 - z_{kt})(|x_i - x_0| + |x_k - x_0| + Ly_2 - Ly_1)) \rightarrow \min,$$

$$|x_i - b_{1j}| \geq z_{it} \frac{l_i + p_j}{2}, \quad i \in I, \quad j \in JL_t, \quad t = 1, 2, \quad (14)$$

$$|x_i - x_k| \geq (z_{it} + z_{kt} - 1) \frac{l_i + l_k}{2}, \quad (15)$$

$$i, k \in I, \quad i < k, \quad t = 1, 2, \quad \frac{l_i}{2} \leq x_i \leq LS - \frac{l_i}{2}, \quad i \in I, \quad (16)$$

$$y_i = \sum_{t=1}^2 z_{it} Ly_t, \quad i \in I, \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^2 z_{it} = 1, \quad i \in I, \quad (18)$$

$$z_{it} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad t = 1, 2, \quad (19)$$

$$Ly_2 - Ly_1 \geq h_{\max}, \quad (20)$$

$$h_{\max} = \max \left\{ \frac{hx_i}{2}, \frac{hf_j}{2} \right\} + \delta, \quad (21)$$

$$i \in I, \quad j \in JL_t, \quad t = 1, 2.$$

Построенная модель (13)–(21) может быть решена, например, с помощью решателя BARON.

Для случая фиксированных линий (Ly_1, Ly_2, x_0 известны) модель (13)–(19) рассматривалась в работах [11, 12].

Результаты экспериментов с моделью размещения взаимосвязанных объектов

Отметим, что модель (13)–(21) нелинейна. Для нахождения локального оптимума задачи проведены две серии тестовых экспериментов с применением модели (13)–(21) и пакета CPLEX. Первая серия связана с поиском расположения производственных линий и объектов на них с фиксированным виадуком между линиями. Во второй серии находилось не только расположение линий и объектов на них, но также и оптимальное размещение виадука. Результаты экспериментов для каждой серии тестовых задач представлены в табл. 1 и 2, где t – это время счета в секундах в пакете CPLEX.

По результатам экспериментов можно отметить, что при поиске расположения виадука получено лучшее значение целевой функции, чем при фиксированном виадуке, но время счета увеличивалось.

3. Модели, применяемые при модернизации цехов

При фиксированном расположении линий математическая модель (13)–(19) размещения технологического оборудования применяется при реконструкции и модернизации производственных предприятий на этапе проектирования. Для ее решения доказаны свойства, позволяющие декомпозировать задачу и рассматривать ее как дискретную, разработаны алгоритмы точного и приближенного решений [11, 12].

Таблица 1

Решение задач при фиксированном виадуке

№	n	m	h_{max}	x_0	G	t
1	3	4	4	9	960	0,17
2	3	4	7	9	1137	0,10
3	5	5	4	22	3211	0,14
4	5	5	15	22	4333	0,15
5	10	4	4	21	7455	114
6	10	4	10	21	8583	116
7	12	5	7	7	8726	246
8	12	5	10	12	9695	419
9	15	10	8	10	21794	34
10	15	10	15	20	27254	70
11	17	12	18	21	33005,5	149
12	17	12	25	30	42806,5	65
13	20	15	12	14	33437	125
14	20	15	15	21	39661	132
15	25	20	8	10	70455	112
16	25	20	10	14	75039	173

Примечание: составлено авторами.

Таблица 2

Решение задач при нефиксированном виадуке

№	n	m	h_{max}	x_0	G	t
1	3	4	4	6	802	0,19
2	3	4	7	6	979	0,12
3	5	5	4	11	2093	0,17
4	5	5	15	11	3215	0,20
5	10	4	4	9	5166	162
6	10	4	10	9	6294	188
7	12	5	7	9	8630	612
8	12	5	9	12	9675	1219
9	15	10	13	10	21149	149
10	15	10	13	20	27159	152
11	17	12	14	21	32188,5	362
12	17	12	14	30	38362,5	230
13	20	15	14	14	33270	773
14	20	15	14	21	39563	572
15	25	20	16	10	65073	786
16	25	20	16	14	71881	933

Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математические модели размещения технологического оборудования широко применяются при решении задач проектирования и модернизации производственных цехов. На этапах проектирования, как правило, положение линий с оборудованием определяется, на этапах модернизации – фиксировано. Часто при реконструкции цехов часть оборудо-

дования остается на месте, этот случай в приведенных моделях учитывается в качестве наличия запрещенных зон.

Построена модель нелинейного программирования для размещения линий и оборудования на них с учетом запрещенных зон. Приведены результаты численных экспериментов с применением построенной модели и пакета CPLEX. Рассмотрены две серии тестовых

примеров. При поиске расположения виадука получилось лучшее значение целевой функции, чем при фиксированном виадуке, но время счета увеличивалось.

Список источников

1. Yue L., Guan Z., He C. et al. Slotting optimization of automated storage and retrieval system (AS/RS) for efficient delivery of parts in an assembly shop using genetic algorithm: A case Study // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 215, no. 1. P. 012002.
2. Osinuga I. A., Bolarinwa A. A., Kazakovtsev L. A. A modified particle swarm optimization algorithm for location problem // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537, no. 4. P. 042060.
3. Dziki K., Krenczyk D. Mixed-model assembly line balancing problem with tasks assignment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 591, no. 1. P. 012013.
4. Sosedko V. V., Yanishevskaya A. G. Methods and means of determining the optimal location of industrial enterprises // *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1210, no. 1. P. 012136.
5. Prakash M. A., Raju K., Raju V. R. Facility location problems in the presence of two elliptical forbidden regions // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, no. 2. P. 4000–4007.
6. Prakash M. A., Raju K., Raju V. R. Facility location in the presence of mixed forbidden regions // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13, no. 1, P. 91–97.
7. Akash P. L., Abyson S., Babu G. A firefly algorithm approach for multirow facility layout problem // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 396, no. 1. P. 012072.
8. Легких С. А., Забудский Г. Г., Нагорная З. Е. Автоматизация проектирования планов производственных участков и цехов швейных предприятий // *Естественные и технические науки*. 2005. № 4. С. 261–266.
9. Chen R., Lu J., Zhang H. et al. Research on scheduling problem of discrete manufacturing workshop for major equipment in complicated environment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 688, no. 5. P. 055048.
10. Zabudskii G. G., Amzin I. V. Algorithms of compact location for technological equipment on parallel lines // *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki*. 2013. Vol. 16, no. 3. P. 86–94.
11. Zabudsky G. G., Veremchuk N. S. Numerical research of placement problem on lines with forbidden zones and routing communications // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1791, no. 1. P. 012089.

Область применения поставленной задачи – сфера машиностроения, проектирование технологических цехов, модернизация и переналадка имеющегося производственного оборудования.

References

1. Yue L., Guan Z., He C. et al. Slotting optimization of automated storage and retrieval system (AS/RS) for efficient delivery of parts in an assembly shop using genetic algorithm: A case Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;215(1):012002.
2. Osinuga I. A., Bolarinwa A. A., Kazakovtsev L. A. A modified particle swarm optimization algorithm for location problem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;537(4):042060.
3. Dziki K., Krenczyk D. Mixed-model assembly line balancing problem with tasks assignment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;591(1):012013.
4. Sosedko V. V., Yanishevskaya A. G. Methods and means of determining the optimal location of industrial enterprises. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1210(1):012136.
5. Prakash M. A., Raju K., Raju V. R. Facility location problems in the presence of two elliptical forbidden regions. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(2):4000–4007.
6. Prakash M. A., Raju K., Raju V. R. Facility location in the presence of mixed forbidden regions. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018;13(1):91–97.
7. Akash P. L., Abyson S., Babu G. A firefly algorithm approach for multirow facility layout problem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;396(1):012072.
8. Legkikh S. A., Zabudskii G. G., Nagornaia Z. E. Avtomatizatsiya proektirovaniya planov proizvodstvennykh uchastkov i tsekhov shveinykh predpriyatii. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2005;(4):261–266. (In Russ.).
9. Chen R., Lu J., Zhang H. et al. Research on scheduling problem of discrete manufacturing workshop for major equipment in complicated environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;688(5):055048.
10. Zabudskii G. G., Amzin I. V. Algorithms of compact location for technological equipment on parallel lines. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki*. 2013;16(3):86–94.
11. Zabudsky G. G., Veremchuk N. S. Numerical research of placement problem on lines with forbidden zones and routing communications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1791(1):012089.
12. Zabudsky G. G., Veremchuk N. S. Optimization of the location of interconnected facilities on parallel

12. Zabudsky G. G., Veremchuk N. S. Optimization of the location of interconnected facilities on parallel lines with forbidden zones // Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2021. Vol. 15, no. 4. P. 716–727.

lines with forbidden zones. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 2021;15(4):716–727.

Информация об авторе

Н. С. Веремчук – кандидат физико-математических наук, доцент.

About the author

N. S. Veremchuk – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья
УДК 536.24:519.87
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-10>



Математическая модель нагрева теплоносителя в топочной и конвективной камере

Наталья Сергеевна Золотарева^{1✉}, **Михаил Яковлевич Брагинский**²,
Дмитрий Викторович Тараканов³, **Инесса Леонидовна Назарова**⁴

^{1,2,3,4}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹zolotareva_ns@surgu.ru ✉

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

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

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

Аннотация. В статье рассматривалась задача создания компоненты математической процесса нагрева теплоносителя модели водогрейного котла КВГМ. Для решения поставленной задачи использовался аналитический подход для построения модели, что свело к минимуму использование эмпирических коэффициентов в расчетной схеме. Составлена оригинальная аналитическая модель нагрева теплоносителя в топочной и конвективной камере (учитывается радиационное излучение тепла по закону Стефана – Больцмана). Созданную математическую модель предполагается использовать в качестве необходимой компоненты компьютерного тренажера.

Ключевые слова: математическая модель, теплообмен, переходные процессы, компьютерный тренажер котельной

Для цитирования: Золотарева Н. С., Брагинский М. Я., Тараканов Д. В., Назарова И. Л. Математическая модель нагрева теплоносителя в топочной и конвективной камере // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 100–109. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-10>.

Original article

Mathematical model of transfer medium heating in furnace and convection chamber

Natalya S. Zolotareva^{1✉}, **Mikhail Ya. Braginsky**², **Dmitry V. Tarakanov**³, **Inessa L. Nazarova**⁴

^{1,2,3,4}Surgut State University, Surgut, Russia

¹zolotareva_ns@surgu.ru ✉

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

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

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

Abstract. The article considers the creation of a mathematical process component for transfer medium heating in a model hot water boiler KVGМ. To solve this problem, an analytical approach is used to build the model, which minimizes the use of empirical coefficients in the calculation scheme. Researchers created an original analytical model of the transfer medium heating in the furnace and convection chamber, accounting for heat radiation according to the Stefan-Boltzmann law. The created mathematical model is expected to be used as a necessary component of a computer simulator.

Keywords: mathematical model, heat transfer, transient state, boiler room computer simulator

For citation: Zolotareva N. S., Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Nazarova I. L. Mathematical model of transfer medium heating in furnace and convection chamber. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):100–109. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-10>.

ВВЕДЕНИЕ

Математическая модель процессов теплообмена в котлах большой мощности является основой для программного обеспечения компьютерной техники с целью решения следующих задач:

1. Автоматизированное (в той или иной степени) управление технологическим процессом.

2. Создание компьютерных тренажеров для обучения обслуживающего персонала.

При этом основной целью математической модели является описание работы водогрейного котла в режимах, отличных от номинальных, то есть режимов максимально допустимых параметров. Для которых имеются паспортные данные, основанные на экспериментальных данных, а также описание переходных процессов, когда производится смена одного стационарного режима работы на другой стационарный режим. Описание нестационарных режимов имеет большое практическое значение при автоматизированном управлении котлами, а также при создании тренажеров для обучения персонала в режиме реального масштабного времени.

Имеется большое количество теоретических и экспериментальных работ по исследованию и моделированию процессов теплообмена в водогрейных котлах [1–8], однако результатов этих работ недостаточно для непосредственного составления программного обеспечения с целью решения вышеперечисленных задач по следующим причинам.

1. В основном в этих работах рассматриваются стационарные режимы работы котла. Работ, в которых бы рассматривались нестационарные режимы, не так много, и в них не даются замкнутые модели нестационарных режимов работы котла.

2. Значительная часть работ описывает отдельные части общего процесса работ котла, а те работы, которые претендуют на комплексное описание всего процесса теплообмена, неудобны при создании соответствующего программного обеспечения и имеют недостаток: они скомпонованы из различных частей, имеющих разную методологическую осно-

ву и разное соотношение в описании теплофизических и механических эффектов первого и второго порядка малости. Поэтому еще одна цель представляемой математической модели состоит в создании единой методологической базы для описания процессов теплообмена в водогрейных котлах.

3. Каждая часть имеющихся расчетных комплексов содержит большой набор эмпирических коэффициентов, полученных при определенных условиях и ограничениях. Включение этих частей в единый расчетный комплекс без надлежащего согласования ограничений, накладываемых на использование эмпирических коэффициентов может привести к снижению достоверности расчетного комплекса в целом.

Кроме того, обилие эмпирических коэффициентов, вложенных в программное обеспечение, создает проблему среди пользователей, вызванную необходимостью восстановления их численных значений для конкретных расчетных режимов. Это существенно усложняет процедуру использования программного обеспечения и повышает риск введения ошибочных значений параметров в расчетные схемы, требует неоправданно высокой квалификации у пользователей программным продуктом. Поэтому при соответствии математической модели работы котла преследовалась еще и цель сведения к минимуму эмпирических коэффициентов в расчетной схеме и использовании в основном либо паспортных данных котла, либо стандартных теплофизических характеристик, имеющихся в справочниках и полученных с достаточной достоверностью.

Представленная математическая модель является завершенной в той степени, в которой она претендует на решение поставленных задач, однако эта модель допускает усложнение и совершенствование с учетом добавочных факторов, которые носят характер эффектов второго порядка малости. То есть представляемая модель является завершаемой математической моделью в первом приближении.

Учет эффектов второго порядка малости привел бы к необходимости более детальной

привязки математической модели к реальным конструкциям котлов одного и того же типа. Это неоправданно усложнило бы саму математическую модель, с одной стороны, при отсутствии реальной адекватной экспериментальной информации связанной с различными режимами работы конкретного котла и особенно переходных процессов не вызвало бы повышения достоверности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В математической модели рассматривается приведенная эквивалентная схема расположения теплообменных трубок, состоящая из некоторого количества эквивалентных слоев труб. Причем каждый эквивалентный слой трубы не обязательно соответствует одному реальному слою труб, а может соответствовать двум и более реальным слоям труб. В эквивалентной схеме рассматриваются два режима течения воды: сверху вниз и снизу вверх, как показано на рис. 1 и 2.

Под эквивалентным приведенным слоем труб понимается горизонтальный слой труб, через который проходит вся нагреваемая вода, а общая поверхность труб во всех эквивалентных слоях соответствует реальной поверхности всех теплообменных труб в конвективной камере.

Пусть n – число труб в эквивалентном слое, m_g – массовый расход воды, ρ_0 – плот-

ность воды, S_1 – реальная площадь поверхности теплообменных труб в конвективной камере, V – реальная скорость воды в трубах пакета, $a + \Delta a$ – внешний радиус труб, l – длина теплообменной трубы.

Тогда на основе определения эквивалентного приведенного слоя труб можно записать соотношения:

$$m_g = \pi \cdot \rho_0 \cdot a^2 \cdot n \cdot V, \quad (1)$$

$$S_1 = 2\pi \cdot n \cdot N \cdot l \cdot (a + \Delta a) \quad (2)$$

Этих двух соотношений достаточно для определения параметров n и N .

Для котла КВГМ 100 в основном режиме:

$$\frac{m_g}{\rho_0} = 1235 \frac{\text{М}^3}{\text{час}}, \quad S = 2385 \text{ м}^2, \quad a = 0,011,$$

$$a + \Delta a = 0,014 \text{ м}, \quad l = 3 \text{ м}, \quad V = 2,65 \frac{\text{М}}{\text{с}},$$

где V – скорость в первом пакете.

Подставляя эти данные в (1) и (2) и округляя их до целых чисел, получаем $n = 340$, $N = 26$.

Описание тепловых экранов в топочной камере также является упрощенным [1]. В действительности боковые экраны разбиты на секции: в одних секциях вода движется снизу вверх, а в других – сверху вниз. Высота боковых экранов, фронтального и промежуточного, неодинакова из-за наличия проемов для

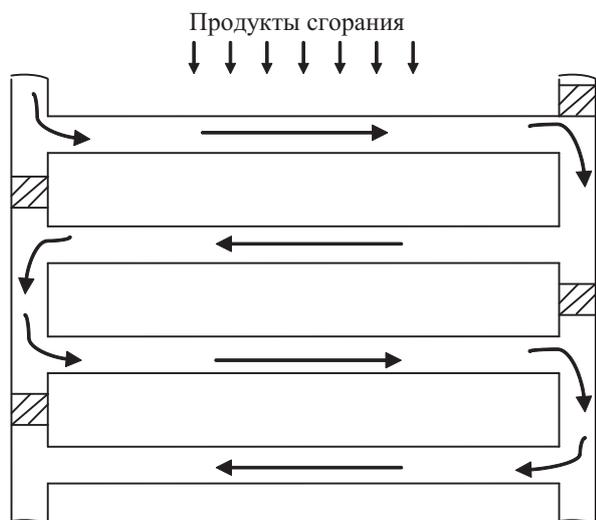


Рис. 1. Режим течения воды сверху вниз
 Примечание: составлено авторами.

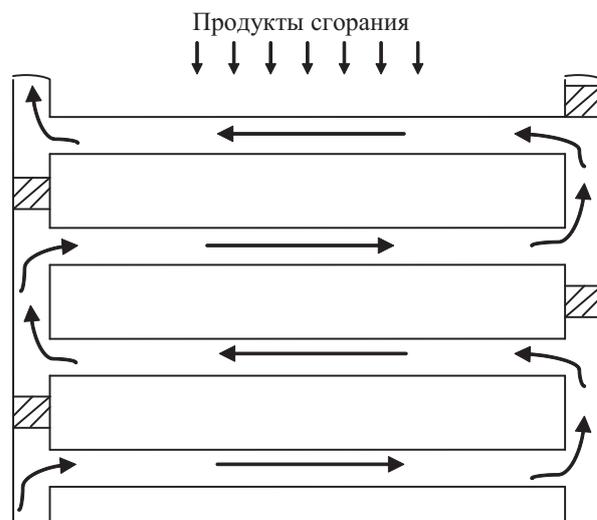


Рис. 2. Режим течения воды снизу вверх
 Примечание: составлено авторами.

размещения горелок и проема соединяющую топочную конвективную камеры. Кроме того, включение всех труб в экране не является параллельным. Так, в основном режиме вода, поступая сначала во фронтальной экран, затем делится на две части и поступает в промежуточный экран. В пиковом режиме схема включения экранов другая. Детальное описание оформления в математической модели и конструктивного расположения теплообменных труб в топочной камере неоправданно усложняет саму модель, не приводя к значительным уточнениям интегральных параметров, характеризующих теплообмен в топочной камере. Поэтому реальная конструктивная схема радиационных экранов заменяется на эквивалентный приведенный радиационный экран, имеющий такую же воспринимающую радиационную поверхность S_p что и реальные экраны, и имеющий высоту, равную высоте боковых экранов. При этом предполагается, что вода поступает сразу во все трубы эквивалентного экрана и течет снизу вверх. Поэтому вводится эффективная средняя скорость V_3 в трубах, обеспечивающая такой же массовый расход воды, какой имеется в реальном экране. Эффективная скорость воды при этом получается примерно в два раза меньше реальной.

Предполагая, что тепловой поток, воспринимаемый эффективным экраном, равен тепловому потоку, воспринимаемому реальным экраном, и распределяется по высоте соответственно реальному распределению теплового потока на боковых экранах, найденному из эксперимента: пусть k – число труб в эквивалентном экране, S_p – воспринимающая радиационная поверхность, m_g – массовый расход воды в номинальном режиме, ρ_0 – плотность воды, $a + \Delta a$ – внешний радиус труб, l – длина теплообменной трубы.

Тогда на основе определения эквивалентного экрана можно записать два соотношения:

$$S_p = \pi \cdot k \cdot l \cdot (a + \Delta a), \quad (3)$$

$$m_g = \pi \cdot \rho_0 \cdot a^2 \cdot k \cdot V_3. \quad (4)$$

Из этих двух соотношений находится число труб k в эквивалентном экране и эффективная скорость жидкости V_3 .

Для котла КВГМ 100: $S_p = 325 \text{ м}^2$, $m_g = 343 \text{ кг/с}$, $a + \Delta a = 0,031 \text{ м}$, $l = 9,4 \text{ м}$.

Используя эти данные из (3), округляя до целых значений, находится величина $k = 334$. Из (4) эффективная средняя скорость в трубах топочной камеры $V_3 = 0,33 \text{ м/с}$.

По найденному значению k и известному паспортному значению номинального теплового потока, воспринимаемому экраном q_Σ , находится тепловой поток воспринимаемой одной трубой q_0 (5):

$$q_0 = \frac{q_\Sigma}{k}. \quad (5)$$

Так как

$$q_\Sigma = 10,47 \cdot 10^3 \frac{\text{ккал}}{\text{с}} = 43,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}, \text{ то}$$

$$q_0 = 0,031 \cdot 10^3 \frac{\text{ккал}}{\text{с}} = 131 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

Пусть ω – отношение текущего расхода топлива в котле к номинальному, тогда предполагая, что тепловой поток, падающий на тепловой экран, равен тепловому потоку, падающему на экран в номинальном режиме, умноженному на величину ω . В этом случае:

$$q = \omega \cdot q_0,$$

где q – тепловой поток, падающий на одну теплообменную трубу при текущем расходе топлива.

Переходные процессы в теплообменной трубе (освещенный сектор)

В этом случае нестационарные процессы теплообмена имеют характер переходных процессов от одного стационарного состояния без появления неустойчивости и незатухающих колебаний, если входные параметры меняются, асимптотически приближаясь к конечным, постоянным значениям при $t \rightarrow \infty$.

В рассматриваемой работе есть два входных параметра: температура воды на входе $T_0(t)$ и относительный расход топлива $\omega(t)$ ((6) и (7)):

Введем следующие обозначения:

μ_1 – теплопроводность железа;

K – температуропроводность железа;
 σ_0 – постоянная Больцмана;
 Re – число Рейнольдса;
 α_0 – коэффициент черноты поверхности труб;
 a – внутренний радиус теплообменных труб;
 l – длина трубы;
 t – время;
 x, ξ – безразмерные цилиндрические координаты;
 T – температура;
 n – число труб в слое конвективной камеры;
 ω – отношение расхода горючего к номинальному расходу;
 W – температура на оси труб;
 $\phi(\eta)$ – функция распределения теплового потока по высоте топочной камеры;
 η – безразмерная координата;
 $f(\eta, t)$ – температура на оси труб;
 ε_1 – безразмерный параметр;
 T_0 – температура воды на входе в теплообменные трубы;
 k – число труб в эквивалентном экране топочной камеры.

$$\begin{aligned} \Delta\omega(t) &= \omega(t) - \omega(0), \\ \Delta T(t) &= T_0(t) - T_0(0), \\ \tau_0 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon}{K_3} \cdot \frac{a^2}{K^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$K_4 = \frac{1}{3} + \frac{\sigma \cdot \mu_1}{a \cdot K_3} (1 - \varepsilon) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right). \quad (7)$$

Тогда из уравнений (8), (9) с учетом (10)

$$\begin{aligned} &W + \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \frac{\mu_1}{a \cdot K_3} \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right)\right] \times \\ &\times \left[\tau \cdot \frac{\partial W}{\partial t} + \alpha \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta}\right] + \frac{2}{21} \cdot \left[\frac{1}{3} + \sigma \cdot \frac{\mu_1}{a \cdot K_3} (1 - \varepsilon) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right)\right] \times \\ &\times \left[\tau^2 \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + 2\alpha \cdot \tau \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta \partial t} + \alpha^2 \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - 3\alpha \cdot \frac{\partial W}{\partial t}\right] + \frac{\varepsilon}{2} \cdot \frac{a^2}{K^2 \cdot K_3} \times \\ &\times \left[\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{1}{3} \left(\tau \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \alpha \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta \partial t}\right) + \frac{2}{63} \times \right. \\ &\times \left. \frac{2}{63} \left(\tau^2 \cdot \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} + 2\alpha \cdot \tau \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta^2 \partial t} + \alpha^2 \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta^2 \partial t} - 3\alpha \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta \partial t}\right)\right] = \\ &= \omega \cdot \frac{K_1}{K_3} \cdot \phi(\eta) + K_2 \cdot \frac{K_1}{K_3}, 0 < \eta < l. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &W + \alpha \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta} \cdot \frac{1}{7} \left[\frac{5}{3} + \frac{3}{2} \cdot \sigma \cdot \frac{\mu_1}{a \cdot K_3} \cdot (1 - \varepsilon) + \frac{3}{2} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right)\right] + \\ &+ \alpha^2 \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} \cdot \frac{2}{21} \times \left[\frac{1}{3} + \sigma \cdot \frac{\mu_1}{a \cdot K_3} (1 - \varepsilon) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right)\right] = (9) \\ &= \omega \cdot \frac{K_1}{K_3} \cdot \phi(\eta) + \frac{K_2}{K_3}, \end{aligned}$$

$$f(\eta, t) = W(\eta, t) - W_0(\eta) \quad (10)$$

следует:

$$\begin{aligned} &f + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{2} \cdot K_4\right) \cdot \left(\tau \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + \alpha \cdot \frac{\partial f}{\partial \eta}\right) + \frac{2}{21} \cdot K_4 \times \\ &\times \left(\tau^2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} + 2\alpha \cdot \tau \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial t} + \alpha^2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} - 3\alpha \cdot \frac{\partial f}{\partial t}\right) + \\ &+ \tau_0 \left[\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{3} \left(\tau \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} + \alpha \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial t}\right) + \right. \\ &+ \left. \frac{2}{63} \left(\tau^2 \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial t^3} + 2\alpha \cdot \tau \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial \eta \partial t^2} + \alpha^2 \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial \eta^2 \partial t} - 3\alpha \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial t}\right)\right] = \\ &= \frac{K_1}{K_3} \cdot \Delta\omega(t) \cdot \phi(\eta), 0 < \eta < l. \end{aligned} \quad (11)$$

Краевые условия этого уравнения из (12), (13) принимают вид:

$$\begin{aligned} &W(0, t) = T_0 - \varepsilon_1 \cdot \frac{\tau}{\alpha} \cdot \frac{\partial T_0}{\partial t} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1^2}{\alpha^2} \cdot \left[\tau^2 \cdot \frac{\partial^2 T_0}{\partial t^2} - 3 \cdot \tau \cdot \frac{\partial T_0}{\partial t}\right], \\ &\frac{\partial W(0, t)}{\partial \eta} = -\frac{\tau}{\alpha} \cdot \frac{\partial T_0}{\partial t} + \varepsilon_1 \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left[\tau^2 \cdot \frac{\partial^2 T_0}{\partial t^2} - 3 \cdot \tau \cdot \frac{\partial T_0}{\partial t}\right] \quad (12) \\ &W(0) = 0, \\ &\frac{\partial W(0)}{\partial \eta} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &f(0, t) = \Delta T_0(t) - \varepsilon_1 \cdot \frac{\tau}{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\Delta T_0) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1^2}{\alpha^2} \cdot \\ &\cdot \left[\tau^2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta T_0) - 3 \cdot \tau \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\Delta T_0)\right] \\ &\frac{\partial}{\partial \eta} (f(0, t)) = -\frac{\tau}{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\Delta T_0(t)) - \frac{\varepsilon}{\alpha^2} \cdot \\ &\cdot \left[\tau^2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta T_0) - 3 \cdot \tau \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\Delta T_0)\right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Сделаем преобразование Лапласа от соотношений (11), (14), выбрав конкретный вид функции $\Delta\omega(t), \Delta T_0(t)$.

$$\Delta\omega(t) = \begin{cases} \Delta\omega_0, & t > 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta T_0(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)^2 \cdot \Delta T_0(\infty). \quad (16)$$

При этом получается (17)–(18):

$$L\{\Delta\omega(t)\} = \frac{\Delta\omega(t)}{s}, \quad (17)$$

$$L\{\Delta T_0\} = \Delta T_0(\infty) \left[\frac{1}{s} - \frac{2 \cdot \tau_1}{1 + s \cdot \tau_1} + \frac{\tau_1}{2 + s \cdot \tau_1} \right],$$

$$L\left\{\frac{\partial}{\partial t}(\Delta T_0)\right\} = \Delta T_0(\infty) \left[1 - \frac{2s \cdot \tau_1}{1 + s \cdot \tau_1} + \frac{s \cdot \tau_1}{2 + s \cdot \tau_1} \right], \quad (18)$$

$$L\left\{\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\Delta T_0)\right\} = \Delta T_0(\infty) \left[s - \frac{2s^2 \cdot \tau_1}{1 + s \cdot \tau_1} + \frac{s^2 \cdot \tau_1}{2 + s \cdot \tau_1} \right].$$

Преобразование Лапласа от уравнения (11) приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению по переменной η :

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 F}{\partial \eta^2} + \beta_1 \cdot \alpha \cdot \frac{\partial F}{\partial \eta} + \beta_2 \cdot F = \beta_3 \cdot \frac{\Delta\omega_0}{s} \cdot \phi(\eta),$$

$$\beta_1(s) = \frac{\frac{1}{6} + \frac{3}{14} \cdot K_4 + \frac{4}{21} \cdot s \cdot \tau \cdot K_4}{\tau_0 \cdot s + \frac{2}{21} \cdot K_4},$$

$$\beta_2(s) = \left[\tau_0 \cdot s + \frac{2}{21} \cdot K_4 \right]^{-1} \times \quad (19)$$

$$\times \left[1 + s \cdot \tau \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau} + \frac{1}{2} \cdot K_4 + \frac{1}{6} \right) + \right.$$

$$\left. + s^2 \cdot \tau^2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\tau} + \frac{2}{21} \cdot K_4 \right) + \frac{2}{63} \cdot s^3 \cdot \tau^2 \cdot \tau_0 \right],$$

$$\beta_3(s) = \frac{K_1}{K_3 \left(\tau_0 \cdot s + \frac{2}{21} \cdot K_4 \right)}.$$

Преобразование Лапласа краевых условий (14) приводит к соотношениям (20)–(21):

$$F(0, s) = \frac{\Delta T_0(\infty)}{s} + \Omega_1(s) \cdot \Delta T_0(\infty),$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} F(0, s) = \Omega_2(s) \cdot \Delta T_0(\infty). \quad (20)$$

$$\Omega_1(s) = \left[\frac{1}{s} - \frac{2 \cdot \tau_1}{1 + s \cdot \tau_1} + \frac{\tau_1}{2 + s \cdot \tau_1} \right].$$

$$\cdot \left[1 - \varepsilon_1 \frac{\tau}{\alpha} s + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1^2}{\alpha^2} (\tau^2 s^2 - 3\tau \cdot s) \right] - \frac{1}{s}, \quad (21)$$

$$\Omega_2(s) = \left[1 - \frac{2s \cdot \tau_1}{1 + s \cdot \tau_1} + \frac{s \cdot \tau_1}{2 + s \cdot \tau_1} \right].$$

$$\cdot \left[-\frac{\tau}{\alpha} + \frac{\varepsilon_1}{\alpha^2} (\tau^2 s - 3\tau) \right].$$

Частное решение уравнения (19) имеет вид (22)–(23):

$$F_1(s, \eta) = \frac{\beta_3 \Delta\omega_0}{s} \cdot \left[\frac{a_1}{\beta_2} + \beta_4 e^{-a_3 \cdot \eta} + \beta_5 \cdot \eta \cdot e^{-a_3 \cdot \eta} \right] \quad (22)$$

$$\beta_4(s) = \frac{a_2 \cdot (2a_3 \cdot \alpha^2 - \beta_1 \cdot \alpha)}{(\alpha^2 \cdot a_3^2 - a_3 \cdot \beta_1 \cdot \alpha + \beta_2)^2},$$

$$\beta_5(s) = \frac{a_2}{\alpha^2 \cdot a_3^2 - a_3 \cdot \beta_1 \cdot \alpha + \beta_2}. \quad (23)$$

Общее решение однородного уравнения, полученного из (19), имеет вид:

$$F_0(\eta, s) = E_1(s) \cdot e^{n_1(s) \frac{\eta}{\alpha}} + E_2(s) \cdot e^{n_2(s) \frac{\eta}{\alpha}},$$

$$n_1(s) = -\frac{\beta_1}{2} + \sqrt{\frac{\beta_1^2}{4} - \beta_2},$$

$$n_2(s) = -\frac{\beta_1}{2} - \sqrt{\frac{\beta_1^2}{4} - \beta_2}.$$

Тогда общее решение уравнения (19) получается в виде:

$$F(\eta, s) = E_1(s) \cdot e^{n_1(s) \frac{\eta}{\alpha}} + E_2(s) \cdot e^{n_2(s) \frac{\eta}{\alpha}} +$$

$$+ \frac{\beta_3 \Delta\omega_0}{s} \cdot \left[\frac{a_1}{\beta_2} + (\beta_4 + \eta \cdot \beta_5) \cdot e^{-a_3 \cdot \eta} \right]. \quad (24)$$

Постоянные E_1 и E_2 находятся из краевых условий (20), при этом получается система (25):

$$E_1 + E_2 = \frac{\Delta T_0(\infty)}{s} + \Omega_1(s) \cdot \Delta T_0(\infty) - \frac{\beta_3 \Delta \omega_0}{s} \cdot \left[\frac{a_1}{\beta_2} + \beta_4 \right], \quad (25)$$

$$n_1 E_1 + n_2 E_2 = \alpha \cdot \left[\Omega_2(s) \cdot \Delta T_0(\infty) - \frac{\beta_3 \Delta \omega_0}{s} \cdot [\beta_5 - a_3 \cdot \beta_4] \right].$$

Разрешая эту систему, получим:

$$E_1(s) = \frac{1}{n_2 - n_1} \cdot \left\{ \frac{n_2 \cdot \Delta T_0(\infty)}{s} + \Delta T_0(\infty) \cdot [n_2 \cdot \Omega_1(s) - \alpha \cdot \Omega_2(s)] + \frac{\beta_3 \Delta \omega_0}{s} \cdot \left(\alpha \cdot \beta_5 - \alpha \cdot a_3 \cdot \beta_4 - n_2 \cdot \frac{a_1}{\beta_2} - n_3 \cdot \beta_4 \right) \right\},$$

$$E_2(s) = \frac{1}{n_1 - n_2} \cdot \left\{ \frac{n_1 \cdot \Delta T_0(\infty)}{s} + \Delta T_0(\infty) \cdot [n_1 \cdot \Omega_1(s) - \alpha \cdot \Omega_2(s)] + \frac{\beta_3 \Delta \omega_0}{s} \cdot \left(\alpha \cdot \beta_5 - \alpha \cdot a_3 \cdot \beta_4 - n_1 \cdot \frac{a_1}{\beta_2} - n_1 \cdot \beta_4 \right) \right\}.$$

Оригинал от изображения (24) в аналитическом виде получить трудно, фактически его надо находить численно. Однако, используя только изображение (24), можно получить некоторые важные результаты, характеризующие качественное поведение решения краевой задачи (9), (13) и корректность самих уравнений этой задачи.

Под этим имеется в виду прежде всего существование следующего фактически приемлемого результата.

Если при $t < 0$ процесс был стационарным с параметрами $\omega(0)$, $T_0(0)$, а при $t > 0$ параметры $\omega(t)$, $T_0(t)$ начали изменяться, имея в пределе при $t \rightarrow \infty$ постоянные предельные значения $\omega(\infty)$, $T_0(\infty)$, то решение краевой задачи (9), (13) при $t \rightarrow \infty$ тоже должно асимптотически устанавливаться к стационарному решению с параметрами $\omega(\infty)$, $T_0(\infty)$.

То есть решение краевой задачи должно быть устойчивым и в нем должны существовать незатухающие колебания. В этом случае

можно сказать, что решение краевой задачи (9), (13) описывает переходные процессы между двумя стационарными состояниями.

Поведение оригинала $f(\eta, t)$ при $t \rightarrow \infty$ можно оценить на основе известного предельного соотношения (26) [28]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s L\{x(t)\}. \quad (26)$$

Таким образом, выполняется равенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t, \eta) = \lim_{s \rightarrow 0} s F(s, \eta). \quad (27)$$

Для нахождения предела в правой части (27) запишем следующие предельные соотношения, которые проверяются непосредственно с использованием формул:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \beta_1(s) = d_1, \quad \lim_{s \rightarrow 0} \beta_2(s) = d_2,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} n_1(s) = k_1, \quad \lim_{s \rightarrow 0} n_2(s) = k_2,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \beta_3(s) = \frac{K_1}{K_3} d_2,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \beta_4(s) = \frac{K_3}{d_2} h_1,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \beta_5(s) = \frac{K_3}{d_2} h_2,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \Omega_1(s) = 0, \quad \lim_{s \rightarrow 0} s \Omega_2(s) = 0,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s E_1(s) = \frac{k_2}{k_2 - k_1} \cdot \Delta T_0(\infty) + \Delta \omega_0 \cdot K_1 \cdot h_3,$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s E_2(s) = \frac{k_1}{k_1 - k_2} \cdot \Delta T_0(\infty) + \Delta \omega_0 \cdot K_1 \cdot h_4.$$

Пользуясь этими предельными соотношениями и (24), можно записать:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(\eta, t) = \lim_{s \rightarrow 0} s F(\eta, s) = \Delta T_0(\infty) \cdot \psi_1(\eta) + \Delta \omega_0 \cdot K_1 \left[h_3 \cdot e^{k_1 \frac{\eta}{\alpha}} + h_4 \cdot e^{k_2 \frac{\eta}{\alpha}} \right], \quad (28)$$

$$\psi_1(\eta) = \frac{k_1}{k_1 - k_2} \cdot e^{k_2 \frac{\eta}{\alpha}} - \frac{k_2}{k_1 - k_2} \cdot e^{k_1 \frac{\eta}{\alpha}}.$$

На основании (10) выполняется (29):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(\eta, t) = W_0(\eta) + \lim_{t \rightarrow \infty} f(\eta, t), \quad (29)$$

где $W(\eta, t)$ – решение краевой задачи, а $W_0(\eta)$ – решение стационарной задачи (30), (13) при $t < 0$. Используя зависимость (31) для решения $W_0(\eta)$ и соотношение (28), получим (32):

$$W(0, t) = T_0(t),$$

$$\tau \cdot \frac{\partial W(0, t)}{\partial t} + \alpha \cdot \frac{\partial W(0, t)}{\partial \xi} = 0, \quad (30)$$

$$W = T_0 \cdot \psi(\eta) + \frac{K_2}{K_3} \cdot [1 - \psi_1(\eta)] +$$

$$+ K_1 \cdot \omega \cdot h_3 \cdot e^{k_1 \frac{\eta}{\alpha}} + h_4 \cdot e^{k_2 \frac{\eta}{\alpha}} +$$

$$+ \frac{a_1}{K_3} + (h_1 + \eta \cdot h_2) \cdot e^{-a_3 \eta}. \quad (31)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(\eta, t) = [T_0(0) + \Delta T_0(\infty)] \cdot \psi_1(\eta) +$$

$$+ \frac{K_2}{K_3} \cdot [1 - \psi_1(\eta)] + \quad (32)$$

$$+ K_1 [\omega_0(0) + \Delta \omega_0(\infty)] \times$$

$$\times \left[h_3 \cdot e^{k_1 \frac{\eta}{\alpha}} + h_4 \cdot e^{k_2 \frac{\eta}{\alpha}} + \frac{a_1}{K_3} + (h_1 + \eta \cdot h_2) \cdot e^{-a_3 \eta} \right] \equiv$$

$$\equiv T_0(\infty) \cdot \psi_1(\eta) + \frac{K_2}{K_3} \cdot [1 - \psi_1(\eta)] + K_1 \omega_0(0) \times$$

$$\times \left[h_3 \cdot e^{k_1 \frac{\eta}{\alpha}} + h_4 \cdot e^{k_2 \frac{\eta}{\alpha}} + \frac{a_1}{K_3} + (h_1 + \eta \cdot h_2) \cdot e^{-a_3 \eta} \right].$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, решение $W(\eta, t)$ нестационарной краевой задачи (9), (13), (15), (16) действительно характеризует переходной процесс, отделяющий два стационарных состояния, определяемых параметрами $\omega(0)$, $T_0(0)$, $\omega(\infty)$, $T_0(\infty)$.

Следует заметить, что этот результат не является тривиальным. Так, если в математической модели убрать слагаемые, характеризующие обратное излучение труб по закону Стефана – Больцмана, то получаемые при

этом уравнения не будут описывать переходные процессы, так как в решении появятся составляющие, линейно растущие во времени.

Полученная модель обладает рядом достоинств по сравнению с существующими решениями:

1. В основном в научных работах рассматриваются только стационарные режимы работы котла. В представленной работе рассматриваются переходные режимы работы. Решение сформулировано в виде замкнутой модели процесса нагрева котла.

2. Значительная часть работ описывает отдельные части общего процесса работ котла, а те работы, которые претендуют на комплексное описание всего процесса теплообмена, неудобны и при создании соответствующего программного обеспечения имеют тот недостаток, что скомпонованы из различных частей, имеющих разную методологическую основу и разное соотношение в описании теплофизических процессов. Полученная математическая модель построена на единой методологической базе для описания процессов теплообмена в водогрейных котлах.

3. Каждая часть имеющихся расчетных методов содержит большой набор эмпирических коэффициентов, полученных при определенных условиях и ограничениях. Включение этих эмпирических коэффициентов в единый расчетный комплекс без надлежащего согласования ограничений, накладываемых на использование данных параметров, может привести к снижению достоверности расчетного комплекса в целом.

Кроме того, обилие эмпирических коэффициентов, вложенных в программное обеспечение, создает проблему среди пользователей, вызванную необходимостью восстановления их численных значений для конкретных расчетных режимов. Это существенно усложняет процедуру использования программного обеспечения и повышает риск введения ошибочных значений параметров в расчетные схемы, требует неоправданно высокой квалификации у пользователей программным продуктом.

4. Полученная математическая модель работы котла обладает минимумом эмпирических

коэффициентов в расчетной схеме и использовании в основном либо паспортных данных котла, либо стандартных теплофизических характеристик, имеющих в справочниках.

Представленная математическая модель является завершенной в той степени, в которой она претендует на решение поставленных задач, однако эта модель допускает усложнение и совершенствование с учетом добавочных факторов, которые носят характер эффектов второго порядка малости. То есть представляемая модель является завершаемой математической моделью в первом приближении.

5. Учет эффектов второго порядка малости привел бы к необходимости более детальной привязки математической модели к реальным конструкциям котлов одного и того же типа. Это неоправданно усложнило бы саму математиче-

скую модель при отсутствии реальной адекватной экспериментальной информации, связанной с различными режимами работы конкретного котла и особенно переходных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе рассматривалась задача создания математической модели КВГМ 100. Составлена оригинальная аналитическая модель нагрева теплоносителя в топочной и конвективной камере. Полученные результаты моделирования могут быть использованы при создании компьютерных тренажеров для обучения обслуживающего персонала котельной КВГМ 100, а также в аналогичных энергетических системах (учитывается радиационное излучение тепла по закону Стефана – Больцмана).

Список источников

1. Цапко Г. П., Цапко С. Г., Тараканов Д. В. Современные компьютерные тренажеры: математические методы моделирования и эмуляции параллельных взаимодействующих процессов : моногр. Томск : ТПУ, 2012. 192 с.
2. Володин Ю. Г., Ханнанов Р. Р. Математическое моделирование рабочего процесса в газоздушном тракте котлового агрегата ТГМ-84 // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2. С. 133–139.
3. Синицын Н. Н., Сидоров И. В., Игумнов Е. М. Расчетное исследование теплообмена в топках котлов КВГМ-30 и КВГМ-100 // Перспективное развитие науки, техники и технологий : материалы Междунар. науч.-практ. конф. 17 октября 2012 г., г. Курск. В 2 т. Курск : ЗАО «Университетская книга», 2012. Т. 2. С. 101–103.
4. Кайбалиев Р. С. Анализ водогрейного котла КВГМ-50 как объекта управления // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее : сб. статей XXV Междунар. науч.-практ. конф. 10 декабря 2019 г., г. Пенза. В 2 ч. Пенза : Изд-во: «Наука и Просвещение», 2019. Т. 1, ч. 1. С. 71–73.
5. Кайбалиев Р. С. Синтез системы автоматического регулирования водогрейного котла КВГМ-50 с добавочными информационными каналами // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее : сб. статей XXV Междунар. науч.-практ. конф. 10 декабря 2019 г., г. Пенза. В 2 ч. Пенза : Изд-во: «Наука и Просвещение», 2019. Т. 1, ч. 1. С. 74–77.
6. Бутко Н. А., Кубисенов С. М., Мершиев А. Ю. Учебный тренажер имитации технологического процесса котла водогрейного КВГМ-50-150 //

References

1. Tsapko G. P., Tsapko S. G., Tarakanov D. V. Sovremennye kompyuternye trenazhery: matematicheskie metody modelirovaniya i emulyatsii parallelnykh vzaimodeistvuyushchikh protsessov. Monograph. Tomsk: TPU; 2012. 192 p. (In Russ.).
2. Volodin Yu. G., Hannanov R. R. Mathematical modeling of the worker process in gas canal for the boiler aggregate TGM-84. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2016;(2):133–139. (In Russ.).
3. Sinityn N. N., Sidorov I. V., Igumnov E. M. Raschetnoe issledovanie teploobmena v topkakh kotlov KVGM-30 i KVGM-100. In: *Proceedings of 2nd International Research-to-practice conference “Perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologiy”*, October 17, 2012, Kursk. Ed. Gorokhov A. A. Kursk: ZAO “Universitetskaya kniga”; 2012. p. 101–103. (In Russ.).
4. Kaybaliev R. S. Analysis of KBGM-50 hot water boiler as control object. In: *Proceedings of the 15th International Research-to-Practice Conference “Nauka i obrazovanie, sokhranyaya proshloe, sozdaem budushchee”*, December 10, 2019, Penza. In 2 chapters. Penza: “Nauka i Prosveshchenie”; 2019. Vol. 1, pt. 1. p. 71–73. (In Russ.).
5. Kaybaliev R. S. Synthesis of automatic control system of hot water boiler KBGM-50 with additional information channels. In: *Proceedings of the 15th International Research-to-Practice Conference “Nauka i obrazovanie, sokhranyaya proshloe, sozdaem budushchee”*, Penza, December 10, 2019. In 2 chapters. Penza: “Nauka i Prosveshchenie”; 2019. p. 74–77. (In Russ.).

- Нефть и газ – 2024 : материалы конф., 22–26 апреля 2024 г. Москва. М. : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, 2024. С. 31–40.
7. Юсупова Д. С. Анализ процесса подогрева воды котла КВГМ-50 // Молодой исследователь: вызовы и перспективы : сб. статей по материалам ССХVI междунар. науч.-практ. конф., 14 июня 2021 г., г. Москва. М. : ООО «Интернаука», 2021. Т. 21. С. 392–394.
8. Садыков Р. А., Антропов Д. Н., Даминов А. З. и др. Автоматизированный микропроцессорный комплекс для моделирования процессов в котельной установке // Вестник машиностроения. 2015. № 12. С. 30–33.
6. Butko N. A., Kubisenov S. M., Mershev A. Yu. Uchebny trenazher imitatsii tekhnologicheskogo protsessa kotla vodogreynogo KVGM-50-150. In: *Proceedings of conference: Neft I gaz*”, April 22–26, 2024, Moscow. Moscow: Gubkin University; 2024. p. 31–40. (In Russ.).
7. Yusupova D. S. Analiz protsessa podogreva vody kotla KVGM-50. In: *Proceedings of the 216th International Research-to-Practice Conference “Molodoy issledovatel: vyzovy I perspektivy”*”, June 14, 2021, Moscow. Moscow: ООО Internauka; 2021. Vol. 21. p. 392–394. (In Russ.).
8. Sadykov R. A., Antropov D. N., Daminov A. Z. et al. Automated microprocessor complex for modeling of processes in boiler plant. *Vestnik mashinostroeniya*. 2015;(12):30–33. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. С. Золотарева – аспирант.

М. Я. Брагинский – кандидат технических наук, доцент.

Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент.

И. Л. Назарова – аспирант.

About the authors

N. S. Zolotareva – Postgraduate.

M. Ya. Braginsky – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

I. L. Nazarova – Postgraduate.

Научная статья
УДК 519.245 + 517.26
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-11>



Метод выбора управляющего решения при диапазонных входных сигналах для детерминированно-стохастической модели

Юлия Валериевна Цымай

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

m-walua@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9795-7137>

Аннотация. В статье рассмотрена область применения алгоритмов управления многокомпонентной динамической системой с неопределенными параметрами, меняющимися в зависимости от нестабильного диапазонного потока входных данных. Предложенная методика направлена на упрощение процесса анализа и отбора диапазонов данных с различным уровнем актуальности, используемых для формирования управляющего воздействия. Представлена математическая модель, описывающая соотношения между запасами данных и потоками, что позволяет выявить ключевые параметры системы и сосредоточиться на их дальнейшей детализации. Допущение о переходе данных между классами основывается на автоматической актуализации данных, что отражает реальные условия эксплуатации системы. Изначально классы данных не имеют строгой иерархии, однако их объем изменяется в зависимости от временных интервалов, причем наиболее значительные изменения происходят ближе к концу исследуемого периода. Эти изменения обусловлены внутренними перемещениями данных между классами и внешними потоками данных. Ожидаемый поток данных рассчитывается на основе начального запаса и вероятности перехода, что согласуется с предположением о пропорциональности потоков запасам. Общее число новых данных равно числу выбывающих данных.

В результате сравнения стандартных технологий алгоритмизации и кодирования с предлагаемым методом и последующей оценки выявлено повышение производительности системы, а также предсказуемость критических состояний, которые могут возникнуть в любой момент при наличии неопределенных параметров. Реализована программная модель считывания и интерпретации входных сигналов, идентификации и корректировки артефактов, обработки входных данных, тестирования многокомпонентной динамической системы с диапазонными входными данными.

Ключевые слова: детерминированная система, стохастическая система, диапазонные сигналы, генетический алгоритм, сегментация данных

Для цитирования: Цымай Ю. В. Метод выбора управляющего решения при диапазонных входных сигналах для детерминированно-стохастической модели // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 110–117. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-11>.

Method for selecting management decision with range input signals for deterministic and stochastic model

Yuliya V. Tsymay

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia
State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia
m-walua@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9795-7137>*

Abstract. The article considers the scope of application of control algorithms for a multicomponent dynamic system with uncertain parameters varying depending on a non-stable range flow of input data. The proposed methodology is aimed at simplifying the process of analyzing and selecting data ranges with different levels of relevance used to form a control action. A mathematical model describing the connection between data stocks and flows is presented. This allows identifying the key parameters of the system and focus on their further detailing. The assumption of data transition between classes is based on automatic data update, which reflects the real conditions of the system operation. Initially, data classes do not have a strict hierarchy, but their volume changes depending on time intervals, with the most significant changes occurring near the end of the period under study. These changes are due to internal data movements between classes and external data flows. The expected data flow is calculated based on the initial stock and transition probability, which is consistent with the assumption that flows are proportional to stock. The total number of new data is equal to the number of discarded data.

As a result of comparison of standard algorithmic and coding technologies with the proposed method and subsequent evaluation, the system performance improvement as well as predictability of critical states that can occur at any moment in the presence of uncertain parameters are revealed. A software model for reading and interpreting input signals, identifying and correcting artefacts, processing input data, and testing a multi-component dynamic system with range input data has been implemented.

Keywords: deterministic system, stochastic system, range input signals, genetic algorithm, data segmentation

For citation: Tsymay Yu. V. Method for selecting management decision with range input signals for deterministic and stochastic model. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):110–117. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-11>.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей проектирования технических систем является повышение производительности. Если система построена на базе управляемого контроллера, то эту характеристику описывают через закон К. Мура, согласно которому каждые два года при определенной модификации управляющего устройства его производительность возрастает. Это привело к увеличению потенциала распараллеливания. Появилась необходимость использовать параллелизм за пределами уровня инструкций программируемого управляющего устройства. Несмотря на это, многие программы по-прежнему создаются последо-

вательно, что затрудняет их эффективную работу при большом потоке данных. Большие данные и интернет вещей добавляют к проблеме эффективной параллелизации последовательной программы проблему эффективной обработки больших объемов данных. При проведении исследований очень важно быстро отличать существенные данные от неважных и, таким образом, сокращать объем обрабатываемых баз данных. При этом, по возможности, не должно быть потеряно никакой важной информации. Поскольку эти большие объемы данных генерируются многократно и непрерывно, необходимо увеличивать тактовую частоту, что предполагает

не всегда возможную модернизацию микроконтроллера и периферийного блока. Задача здесь состоит в том, чтобы найти энергоэффективное решение, которое является гибким и масштабируемым для удовлетворения растущих объемов данных [1, 2].

Ведущие производители технологических решений и поставщики облачных услуг, такие как Intel или Amazon, осознали эту проблему и среди прочего сделали ставку на технологию ПЛИС (программируемая интегральная логическая схема), поскольку она представляет собой производительную и энергоэффективную альтернативу многоядерным процессорам. Но для некоторых задач ПЛИС не является эффективной, т. к. многое зависит от типа обрабатываемых данных и аппаратной части управляемой технической системы [3, 4].

Реконфигурация требует времени, которое может быть недоступно для технических систем, работающих в режиме реального времени. Поэтому необходимо найти способ минимизировать или скрыть время реконфигурации и минимизировать количество необходимых реконфигураций. Кроме того, как и в случае с большинством новых технологий, до сих пор нет четкого представления о подходящей области применения и характеристиках, которые необходимо привнести в различные области, чтобы извлечь выгоду из этой технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В начале 2000 г. была представлена концепция динамически реконфигурируемой системы. Она могла переключаться между 4 конфигурациями в течение одного тактового цикла, а дополнительные конфигурации могли быть загружены во время работы. Однако реконфигурируемые архитектуры имели некоторые ограничения, такие как длительное время перенастройки, жестко заданная форма конфигураций и нулевая поддержка режимов энергосбережения. Из-за этих ограничений разрабатываются архитектуры, методы разработки и инструменты, которые можно динамически перенастраивать, а также области применения динамической реконфигурации [5].

Но модернизация для программируемых систем ведет к повышению экономических затрат, глобальной перенастройке аппаратной части. Наиболее рациональным будет корректировка управляющей программы таким образом, чтобы ее можно было использовать для технических систем с избыточной периферией. Для реализации этой идеи применимы различные математические методы, которые позволят скорректировать управляющий алгоритм [6].

Метод Монте-Карло основан на выполнении большого числа случайных выборок для получения приближенных решений. Он широко используется в задачах, где невозможно получить точное аналитическое решение или оно сложно для вычисления. Этот метод работает следующим образом: определяется пространство поиска решений, генерируются случайные точки внутри этого пространства, вычисляются значения функции в каждой точке, результаты усредняются для получения окончательного результата. При большом потоке данных метод Монте-Карло может оказаться неэффективным из-за своей медленной сходимости. Постоянно меняющиеся входные параметры также усложняют получение стабильных результатов, так как каждое изменение требует нового набора случайных чисел и повторных вычислений [7].

Интервальный метод предназначен для нахождения гарантированных оценок решений в рамках заданных интервалов. Вместо точечного значения функция оценивается на всем интервале. Необходимо задание интервала для входных данных. Далее происходит оценка функции на всем интервале. Метод устойчив к погрешностям округления, но возникает эффект обертывания, приводящий к неограниченному росту ширины интервалов. Эффект обертывания становится серьезной проблемой при большом количестве данных и частых изменениях параметров, так как ширина интервалов может расти экспоненциально, делая результаты практически бесполезными. Это делает интервальные методы малоэффективными при исследовании детерминированных и стохастических систем [8, 9].

Метод Тейлора основан на разложении функции в ряд Тейлора для получения аппроксимации решения. Выполняется разложение функции в окрестности начальной точки. Используются несколько первых членов ряда Тейлора, оцениваются остаточные члены. Метод обладает высокой аналитической точностью, возможно использование функций высокого порядка. Но он не подходит для задач с большим потоком данных и постоянными изменениями параметров из-за высокой вычислительной сложности. Постоянные изменения параметров приводят к необходимости пересчета рядов Тейлора, что увеличивает нагрузку на ресурсы и замедляет процесс [10, 11].

Предлагаемая методика упрощает процесс анализа и отбора диапазонов данных с установленным приоритетом или уровнем актуальности, на основе которых формируется управляющее воздействие. Сегменты данных до исполнения алгоритма отбора не имеют определенного приоритета или иерархии по старшинству. Принимается допущение, что их объем меняется в любой момент времени, но сами изменения фиксируются в конце исследуемого временного промежутка. Это позволит описывать поведение системы интервальной шкалой времени. Цена деления такой шкалы будет соответствовать целому постоянному временному интервалу (T), в пределах которого фиксируются изменения в динамической системе.

Размеры сегментов данных меняются по двум событиям. Первое событие связано с наличием потоков, направленных в систему. Второе событие инициируется внутренним перемещением между сегментами. Из базового сегмента некоторое количество данных $n_{ij}(T)$ перемещается в соседний сегмент в следующий момент времени. Некоторое количество данных $n_{jk+1}(T)$ исключается из базового сегмента как неактуальное. Тогда набор данных в текущем сегменте в следующий момент состоит из оставшихся, прошедших критериальный отбор, значений и вновь появившихся актуальных данных $n_{0j}(T + 1)$.

В результате можно описать состояние потока входных данных в результате критериального отбора в текущий и следующий момент времени (1):

$$\begin{aligned} n_j(T + 1) &= n_j(T) + n_{0j}(T + 1) + \\ &+ \sum_{i=1}^k n_{ij}(T) - n_{jk+1}(T) - \sum_{i=1}^k n_j(T) = \quad (1) \\ &= \sum_{i=1}^k n_{ij}(T) + n_{0j}(T + 1) \quad (j = 1, 2, \dots, k). \end{aligned}$$

Число оставшихся в базовом сегменте данных будет определяться по формуле (2):

$$n_{ij}(T) = n_j(T) - \sum_{i=1}^k n_{ij}(T) - n_{jk+1}(T). \quad (2)$$

Потоки перехода между сегментами отобранных данных управляются совокупностью факторов:

- количество переходов связано с вакантным диапазоном $n_{ik+1}(T)$;
- автоматический переход в связи с повышением актуальности.

Последнее будет выбрано основным допущением модели в связи с большей вероятностью осуществления в реальной системе. Тогда соотношение между потоками и уже классифицированными данными определяется как $n_{ij}(T)/n_i(T)$ ($i = 1, 2, \dots, k + 1$) и является константой (если в модели не учитывать статистические колебания).

Спрогнозируем размеры диапазонов данных. Если учитывать коэффициент пропорциональности, то модель детерминированная, но когда ее свойства не будут адекватны реальной системе и модель будет генерировать неточные данные для долгосрочного моделирования, то есть появятся значительные изменения при разных $n_i(T)$ (уход одного значения из базы данных не предсказуем), то есть в модели появляются элементы стохастичности.

Поэтому необходимые методы теории вероятности, которая позволит количественно оценить неопределенности. Допустим, что перемещения в сегментах данных не связаны между собой причинно-функциональной

зависимостью. Отдельные данные в исходном сегменте характеризуется вероятностью p_{ij} -перехода в следующий сегмент в течение одного момента времени по установленной временной шкале. Вероятность ухода одного из значений ω_i будет определяться статистической выборкой [12]. Тогда такое развитие событий описывается формулой (3):

$$\sum_{i=1}^k p_{ij} + \omega_i = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (3)$$

Отдельные данные могут оставаться в уже занятом сегменте, а при изменении критериев отбора переместиться в следующий сегмент или покинуть базу данных в связи с неактуальностью.

Новый набор данных будет описываться по формуле (4) общим количественным входным потоком и способом распределения по сегментам. Если входной поток является фиксированной величиной, то число новых данных соответствует числу выбывших:

$$R(T + 1) = \sum_{i=1}^k n_{jk+1}(T). \quad (4)$$

Распределение новых данных описывается формулой (5) и соответствует допущениям, принятым выше:

$$\sum_{i=1}^k r_i = 1. \quad (5)$$

Модель поведения данных в сегментированном хранилище при изменении их актуальности позволила:

- учесть детерминированные и стохастические характеристики технической системы;
- применить генетический алгоритм, используемый для формирования и корректировки управляющего сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для тестирования предлагаемого алгоритма использовалась модель системы управления движущимся объектом (рис. 1 а). В качестве пути рассматривалось прохождение произвольной траектории в лабиринте (рис. 1 б).

Объект управления получал управляющий сигнал от устройства управления о начале движения. Его координаты фиксировались посредством датчиков, наличие препятствий определялось через срабатывание датчиков. В данном эксперименте можно выделить следующие параметры: входные сигналы x_j , описывающие момент срабатывания датчиков; выходные сигналы y_j , описывающие результат срабатывания системы; основные события в системе. Состояния системы меняются в результате появления любого входного сигнала и полностью совпадают со значениями y_j , поэтому здесь они не описываются. Определены основные события в системе:

1. Начало процесса движения.
2. Получение контрольного сигнала с датчика о препятствии.
3. Контрольный сигнал.
4. Изменение положения объекта управления (поворот или поступательное движение с реверсом).

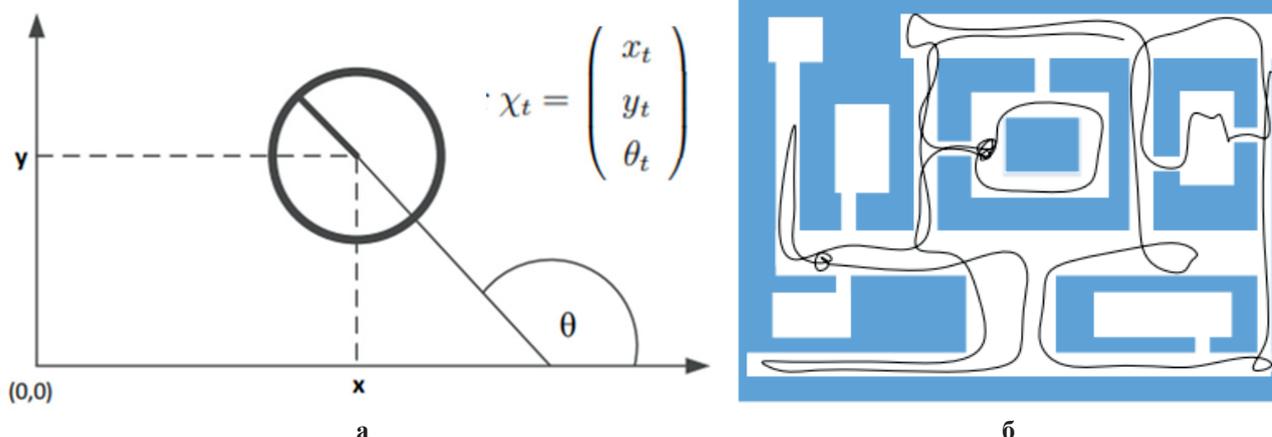


Рис. 1. Модель управления движущимся объектом с учетом траектории:

а – модель системы управления движущимся объектом; б – произвольной траектории в лабиринте

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

5. Движение по новой траектории.

Каждое событие инициируется набором входных сигналов x_i . Наличие того или иного сигнала соответствует логической единице. Фрагмент псевдокода вероятностной модели скоростного движения объекта управления показан на рис. 2. Результаты реакции на препятствие без корректирующего алгоритма показаны на рис. 3. Реализация процесса цифровой фильтрации данных на основе генетического алгоритма и результаты тестирования показаны на рис. 4.

Алгоритм строится на базе знания о весе каждой точки входного сигнала и процессе распределения по методу генетического отбора через программируемую функцию взвешивания. Результаты тестирования измененного входного сигнала показывают определение препятствий с большей точностью, что позволило выстроить относительно равномерную траекторию движения объекта управления.

```

1 motion_velocity_model( $\chi_{t-1}$ ,  $u_t$ )
2 {
3      $\hat{v} = v_t + \text{sample}(\alpha_1|v_t| + \alpha_2|\omega_t|)$ 
4      $\hat{\omega} = \omega_t + \text{sample}(\alpha_3|v_t| + \alpha_4|\omega_t|)$ 
5      $\hat{\gamma} = \text{sample}(\alpha_5|v_t| + \alpha_6|\omega_t|)$ 
6      $x_t = x_{t-1} - \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \cdot \sin \theta_{t-1} + \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \cdot \sin(\theta_{t-1} + \hat{\omega}\Delta t)$ 
7      $y_t = y_{t-1} - \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \cdot \cos \theta_{t-1} + \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \cdot \cos(\theta_{t-1} + \hat{\omega}\Delta t)$ 
8      $\theta_t = \theta_{t-1} + \hat{\omega}\Delta t + \hat{\gamma}\Delta t$ 

```

Рис. 2. Фрагмент псевдокода вероятностной модели скоростного движения объекта управления

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках исследования раскрыты основные аспекты, используемые при исследовании динамических систем с неопределенными параметрами, приведены сферы их применения; описан алгоритм формирования диапазонов данных в зависимости от их актуальности для динамической системы. Выполнен анализ методов, которые используются при моделировании процессов функционирования сложных технических систем, изучены возможные способы их применения; проведен детальный анализ методов, которые используются при моделировании процессов с неопределенными параметрами, меняющимися в процессе функционирования или при запуске нового цикла; изучены и описаны наиболее важные факторы, влияющие на процессы корректировки управляющего сигнала. Рассмотрены средства моделирования динамических систем.

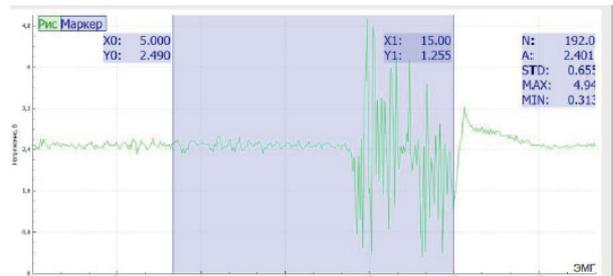


Рис. 3. Результаты реакции на препятствие без корректирующего алгоритма

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

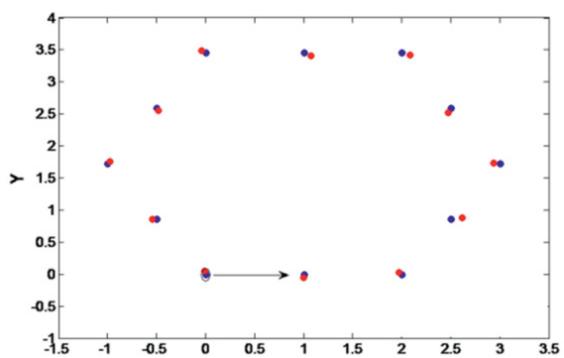
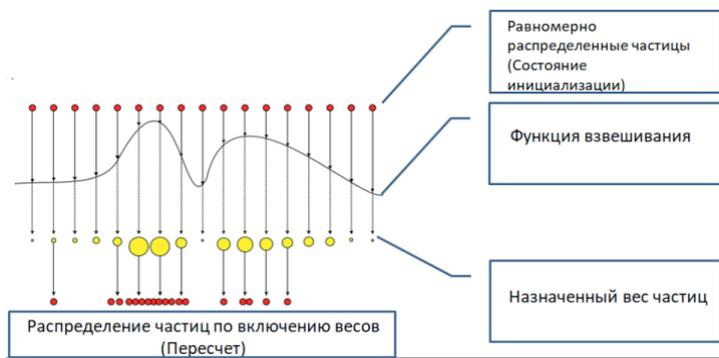


Рис. 4. Реализация процесса цифровой фильтрации данных: а – алгоритм фильтрации, б – апробация после фильтрации

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

В дальнейшем необходимо описать критерии оценки динамических систем с неопределенными параметрами, выбрать наиболее существенные параметры для моделирования и оценки; выполнить анализ внешних помех и степень их влияния на динамическую систему с неопределенными параметрами; выполнить численный анализ изменения внутренних состояний технической системы под воздействием внешних факторов; выполнить анализ степени влияния динамических параметров на статические характери-

стики, произвести корректировку констант; выполнить моделирование поведения системы в предельных диапазонах, определить критические точки работы технической системы; выполнить анализ неопределенных параметров, вызывающих случайное поведение технической системы. Это позволит более точно выполнить программную реализацию алгоритмов исследования состояний имитационной модели многокомпонентной динамической системы с неопределенными параметрами.

Список источников

1. Nyrkov A. P., Kardakova M. V., Kolesnichenko S. V. et al. Modeling the Operating Range of the Fire Safety System Response Parameters on Board. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, January 27–30, 2020, St. Petersburg and Moscow, Russia. 2020. p. 434–437. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038955>.
2. Борисов А. В. Алгоритм робастной фильтрации марковских скачкообразных процессов по высокочастотным считающим наблюдениям // *Автоматика и телемеханика*. 2020. № 4. С. 3–20.
3. Афанасьева О. В., Колесниченко С. В., Новожилов И. М. Теоретические аспекты анализа структурных сдвигов при исследовании процессов динамики сложных технических и социально-экономических систем // *Инновации*. 2018. № 10. С. 108–112.
4. Железнов Э. Г., Комиссаров П. В., Цымай Ю. В. Исследование эргатических систем управления // *Современные наукоемкие технологии*. 2021. № 4. С. 37–41.
5. Васильев Ф. П., Иваницкий А. Ю. Линейное программирование. М.: МЦНМО, 2020. С. 412.
6. Колесниченко С. В. Исследование подходов по оценке качества сложных технических систем на различных стадиях разработки // *Записки Горного института*. 2014. Т. 208. С. 244–248.
7. Железнов Э. Г., Пахарев М. Д., Колесниченко С. В. и др. Модель оценки процессов функционирования сложного транспортного предприятия : патент 2021617682 Рос. Федерация № 2021616649 ; заявл. 28.04.2021 ; опубл. 18.05.2021. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45823909_50270059.PDF (дата обращения: 15.11.2024).
8. Srivastava N., Hinton, G., Krizhevsky A. et al. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting // *Journal of Machine Learning Research*. 2014. Vol. 15. P. 1929–1958.
9. Абрамов О. В. Дестабилизирующие факторы и случайные процессы изменения параметров тех-

References

1. Nyrkov A. P., Kardakova M. V., Kolesnichenko S. V. et al. Modeling the Operating Range of the Fire Safety System Response Parameters on Board. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, January 27–30, 2020, St. Petersburg and Moscow, Russia. 2020. p. 434–437. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038955>.
2. Borisov A. V. Robust filtering algorithm for Markov jump processes with high-frequency counting observations. *Automation and Remote Control*. 2020;(4):3–20. (In Russ.).
3. Afanaseva O. V., Kolesnichenko S. V., Novozhilov I. M. Information and statistical analysis processes the functioning of a complex technical and socio-economic systems. *Innovations*. 2018;(10):108–112. (In Russ.).
4. Zheleznov E. G., Komissarov P. V., Tsymai Yu. V. Research of ergatic control systems. *Modern High Technologies*. 2021;(4):37–41. (In Russ.).
5. Vasilev F. P., Ivanitskiy A. Yu. Lineynoe programmirovaniye. Moscow: MTsNMO; 2020. P. 412. (In Russ.).
6. Kolesnichenko S. V. Issledovanie podkhodov po otsenke kachestva slozhnykh tekhnicheskikh sistem na razlichnykh stadiyakh razrabotki. *Zapiski Gornogo instituta*. 2014;(208):244–248. (In Russ.).
7. Zheleznov E. G., Pakharev M. D., Kolesnichenko S. V. et al. Model for assessing the functioning processes of a complex transport enterprise. RU Patent 2021617682 No. 2021616649, filed April 28, 2021, issued May 18, 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45823909> (accessed: 15.11.2024). (In Russ.).
8. Srivastava N., Hinton, G., Krizhevsky A. et al. Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*. 2014;15:1929–1958.
9. Abramov O. V. Destabilizing factors and random processes of changing parameters of engineering devices and systems. *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):13–20. (In Russ.).

- нических устройств и систем // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 13–20.
10. Курганов В. М., Дорофеев А. Н., Грязнов М. В. Функционал путевого листа в transportation management system // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 2. С. 216–223. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-216-223>.
 11. Иваненко В. И. Применение технологий big data в принятии управленческих решений и повышении эффективности бизнеса // Стратегии развития социальных общностей, институтов и территорий : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. в 2-х т., 17–18 апреля 2023 г., г. Екатеринбург. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2023. Т. 1. С. 31–36.
 12. Budkov Yu. A., Sergeev A. V., Zavarzin S. V. et al. Two-component electrolyte solutions with dipolar cations on a charged electrode: Theory and computer simulations // Journal of Physical Chemistry C. 2020. Vol. 124, no. 30. P. 16308–16314.
 10. Kurganov V. M., Dorofeev A. N., Griaznov M. V. Waybill functionality in transportation management system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(2):216–223. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-216-223>. (In Russ.).
 11. Ivanenko V. I. Primenenie tekhnologii big data v priyatii upravlencheskikh reshenii i povyshenii effektivnosti biznesa. In: Proceedings of the 9th scientific and paractical conference “Strategii razvitiya sotsialnykh obshchnostei, institutov i territorii”, April 17–18, 2023. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin; 2023. Vol. 1. P. 31–36. (In Russ.).
 12. Budkov Yu. A., Sergeev A. V., Zavarzin S. V. et al. Two-component electrolyte solutions with dipolar cations on a charged electrode: Theory and computer simulations. *Journal of Physical Chemistry C*. 2020;124(30):16308–16314.

Информация об авторе

Ю. В. Цымай – аспирант, ассистент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, старший преподаватель.

About the author

Yu. V. Tsymay – Postgraduate, Assistant Professor of the Mathematical Modeling and Applied Informatics Department, Senior Lecturer.

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 27.12.2024.