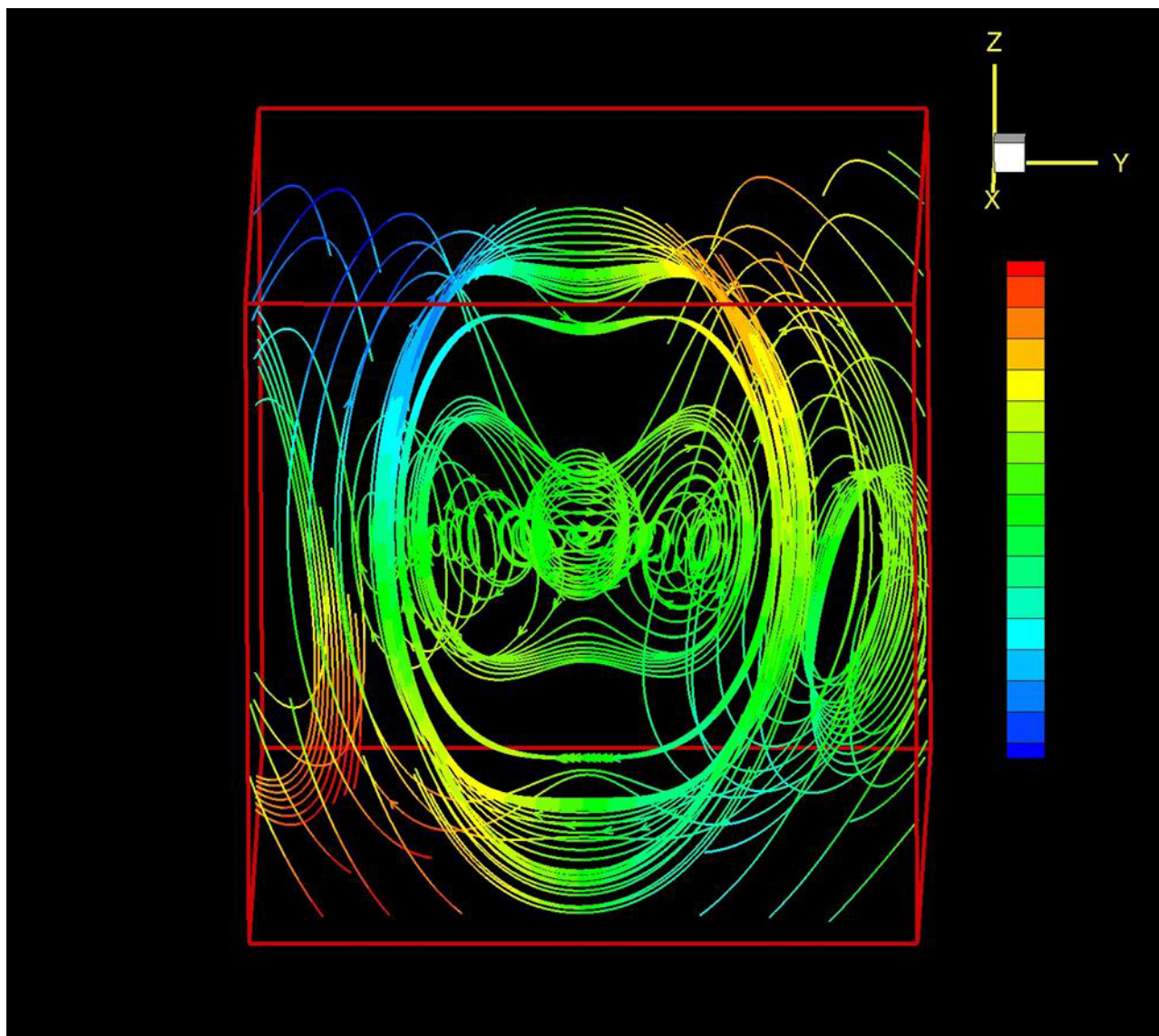




ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

PROCEEDINGS IN CYBERNETICS

12+



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

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 25, № 2

**Сургут
2026**

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
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

Петрова М. А.

Редактор

Зелексон Л. А.

Верстка

Юниной О. А.

Переводчики

Бенская М. О., Рудова А. Н.

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, email: 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. Braginskii, 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. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)
Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Dreys Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)
Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)
Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)
Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)
Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)
Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)
Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Petrova M. A.

Editor

Zelexon L. A.

Layout

Yunina O. A.

Translators

Benskaya M. O., Rudova A. N.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere
© Galkin V. A., Gorelikov A. V.

Since March 29, 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 EI No. FS77-83015 of March 31, 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, email: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Алымова Е. В.

Исследование эффективности импульсных нейронных сетей типа
«жидкостная машина состояний» при прогнозировании хаотических временных рядов
методами программного моделирования 6

Веремчук Н. С.

Исследование функционирования локальных вычислительных сетей на основе
имитационного моделирования 25

Гросу А., Гросу А. И.

Инструмент оценки курса в Moodle на основе структуры и стандартных логов 33

Жаданов И. Н., Швачко А. А.

Влияние формы корпуса и расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения 42

Зорькин Д. Ю.

Эволюция алгоритмов управления сложными системами 52

Поддубный И. В., Лысенкова С. А.

Возможности применения гибридных цифровых двойников для решения задачи
предиктивного энергоэффективного управления в многоквартирном доме 60

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Брагинский М. Я., Тараканов Д. В.

Разработка прототипа тренажера оператора АСУТП 67

Головнин О. К., Чекина Е. В., Шестакова М. В., Тюлюнова Е. А.

Системная модель дорожно-транспортной инфраструктуры 74

Дубанов А. А.

Распределение защитников по целям с использованием «жадного» алгоритма на основе модели
сканирующей системы на плоскости 82

Кондратьев С. Е., Казюра Н. В., Мещеряков В. Н.

Нейросетевое оценивание состояния и оптимизационный синтез распределенного управления
роем мобильных роботов в условиях неопределенности 92

CONTENTS

ENGINEERING

Alymova E. V.

Investigation of efficiency of Liquid State Machine spiking neural networks
in chaotic time series forecasting using software simulation methods 6

Veremchuk N. S.

Investigation of functioning of local computer networks based on simulation modeling 25

Grosu A., Grosu A. I.

Tool for Moodle course assessment based on structure and standard logs 33

Zhadanov I. N., Shvachko A. A.

Effect of heterostructure configuration and shape design on cooling performance 42

Zorkin D. Yu.

Evolution of algorithms for managing complex systems 52

Poddubnyj I. V., Lysenkova S. A.

Possibilities of using hybrid digital twins to solve problem of predictive energy efficient management
in apartment building 60

PHYSICS AND MATHEMATICS

Braginskii M. Ya., Tarakanov D. V.

Prototype development of simulator for operator of ICS 67

Golovnin O. K., Chekina E. V., Shestakova M. V., Tyulyunova E. A.

System model of transportation infrastructure 74

Dubanov A. A.

Distribution of defenders among targets using greedy algorithm based on model
of scanning system on plane 82

Kondratev S. E., Kazyura N. V., Meshcheryakov V. N.

Neural state estimation and optimization synthesis of flocking control for mobile robots swarm
under uncertainty 92

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

Научная статья

УДК 004.852.02+519.246.8:004.94

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-1>



**Исследование эффективности импульсных нейронных сетей
типа «жидкостная машина состояний» при прогнозировании
хаотических временных рядов методами программного моделирования**

Елена Владимировна Алымова

Российская таможенная академия, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Предметом исследования является применение импульсных нейронных сетей класса «жидкостная машина состояний» для задачи прогнозирования хаотических временных рядов. Целью работы является разработка методологической основы и программной базы моделирования жидкостной машины состояний на основе библиотеки BindsNET, а также проведение воспроизводимого сравнительного анализа с рекуррентной нейронной сетью с долгой краткосрочной памятью на эталонном тесте Mackey–Glass. Методология включает построение резервуара из нейронов типа «утечка–интегрирование–порог», частотное кодирование входного сигнала посредством генератора импульсов Пуассона и обучение линейного считывателя методом гребневой регрессии. В качестве базовой модели сравнения реализована однослойная рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью. Научная новизна работы состоит в воспроизводимом сравнении импульсного резервуара на нейронах типа «утечка–интегрирование–порог» с рекуррентной сетью с долгой краткосрочной памятью на эталонном тесте с открытым исходным кодом; при этом акцент делается на сопоставлении числа обучаемых параметров и практической стоимости переобучения считывателя. Основные результаты: жидкостная машина состояний достигает среднеквадратичной ошибки прогноза 0,0083 и средней абсолютной ошибки 0,0061; время обучения считывателя составляет 12,4 с, полное время конвейера (включая симуляцию резервуара) – около 58 с. Рекуррентная сеть показала среднеквадратичную ошибку 0,0071 и среднюю абсолютную ошибку 0,0052 при суммарном времени обучения 47,8 с. Разреженность активаций резервуара составила 9,3 %. Оптимальный спектральный радиус $\rho = 0,9$ установлен перебором по сетке $\rho \in \{0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,2\}$ с отбором по минимуму RMSE на валидационной выборке (табл. 4). Статистическая значимость различий по критерию Уэлча ($p < 0,05$) носит предварительный характер ввиду ограниченного числа запусков ($n = 5$). Вывод: жидкостная машина состояний уступает рекуррентной сети по точности не более чем на 17 % (по RMSE), обучая при этом в 34 раза меньше параметров (501 против 17 217). Полное время вычислительного конвейера жидкостной машины состояний (~58 с) незначительно превышает суммарное время обучения рекуррентной сети (47,8 с); однако в сценариях многократного переобучения считывателя на новых данных без повторной симуляции резервуара время адаптации сокращается до 12,4 с против 47,8 с, что делает жидкостную машину состояний практически применимой альтернативой при числе обучаемых параметров считывателя до 10^3 и требовании переадаптации модели за время, не превышающее 15 с на выборке из 2 000 точек.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети, жидкостная машина состояний, резервуарные вычисления, прогнозирование временных рядов, нейрон «утечка–интегрирование–порог», гребневая регрессия, хаотическая динамика, программный комплекс, сравнительный анализ

Для цитирования: Алымова Е. В. Исследование эффективности импульсных нейронных сетей типа «жидкостная машина состояний» при прогнозировании хаотических временных рядов методами программного моделирования // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 6–24. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-1>.

Original article

**Investigation of efficiency of Liquid State Machine spiking neural networks
in chaotic time series forecasting using software simulation methods***Elena V. Alymova**Russian Customs Academy, Rostov-on-Don, Russia*

Abstract. The subject of the study is the application of spiking neural networks of the Liquid State Machine (LSM) type to the problem of chaotic time series forecasting. The objective is to establish a theoretical and software foundation for modeling the LSM utilizing the BindsNET library, alongside performing a reproducible comparative analysis against a Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural network using the Mackey–Glass benchmark. The methodology includes building a reservoir of Leaky Integrate-and-Fire neurons, rate coding of the input signal via a Poisson spike generator, and training a linear readout using Ridge regression. A single-layer Long Short-Term Memory network served as the reference model. The scientific novelty of the work lies in the reproducible comparison of a spiking reservoir based on Leaky Integrate-and-Fire neurons with a Long Short-Term Memory network on a standard benchmark with open-source code. The emphasis is placed on comparing the number of trainable parameters and the practical cost of readout retraining. Main results are: the LSM achieves root mean square error (RMSE) at 0.0083 and mean absolute error (MAE) at 0.0061; readout training time is 12.4 s, full pipeline time (including reservoir simulation) is approximately 58 s. The recurrent network achieves RMSE at 0.0071 and MAE at 0.0052 with a total training time of 47.8 s. Reservoir activation sparsity is 9.3%. The optimal spectral radius $\rho = 0.9$ is selected by grid search over $\rho \in \{0.5; 0.7; 0.9; 1.0; 1.2\}$ using minimum RMSE on the validation set as the selection criterion (Table 4). Statistical significance by Welch's t -test ($p < 0.05$) should be considered preliminary given the limited number of runs ($n = 5$). The LSM underperforms the recurrent network in accuracy by no more than 17 % while training 34 times fewer parameters (501 versus 17 217). Although the full pipeline time of the LSM (~58 s) slightly exceeds the total training time of the recurrent network (47.8 s), in scenarios requiring repeated readout retraining on new data without re-simulating the reservoir, the adaptation time is reduced to 12.4 s versus 47.8 s, making the LSM a practically viable alternative when the number of trainable readout parameters does not exceed 10^3 and the model re-adaptation time must not exceed 15 s on a dataset of 2 000 points.

Keywords: spiking neural networks, Liquid State Machine (LMS), reservoir computing, time series forecasting, Leaky Integrate-and-Fire neuron, ridge regression, chaotic dynamics, software suite, comparative analysis

For citation: Alymova E. V. Investigation of efficiency of Liquid State Machine spiking neural networks in chaotic time series forecasting using software simulation methods. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):6–24. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-1>.

ВВЕДЕНИЕ

Задача прогнозирования временных рядов занимает центральное место в таких прикладных областях, как управление энергосистемами, финансовый анализ, мониторинг промышленного оборудования и обработка биомедицинских сигналов. Общей чертой этих задач является необходимость извлечения зависимостей между значениями ряда, разнесенными во времени, в том числе в условиях нестационарности и хаотической динамики.

Классическими инструментами прогнозирования долгое время служили авторегрессионные модели и методы экспоненциального сглаживания. Однако их предположения о линейности и стационарности ряда существенно ограничивают применимость к хаотическим последовательностям. С развитием глубокого обучения доминирующее положение заняли рекуррентные нейронные сети, прежде всего архитектура с долгой краткосрочной памятью, предложенная Хохрайтером и Шмидхубером [1]. Данная

модель решает проблему затухающего градиента за счет системы вентилях, управляющих потоком информации через ячейку памяти, и демонстрирует $RMSE = 0,0071$, $MAE = 0,0052$ на эталонном тесте Mackey–Glass ($\tau = 17$) на нестационарных и хаотических рядах. Следует отметить, что при небольшом числе скрытых единиц (как в настоящей работе – 64) вычислительные затраты на обучение рекуррентной сети невелики; существенная разница в ресурсоемкости обучения проявляется при использовании значительно более крупных архитектур.

Одним из активно исследуемых направлений в области прогнозирования временных рядов являются резервуарные вычисления – парадигма, в которой обучается только выходной считывающий слой, тогда как внутренние связи «резервуара» фиксируются случайным образом [2, 3]. Резервуарные архитектуры делятся на два основных класса. Эхомашина состояний, предложенная Яегером [3], использует нейроны с непрерывной активационной функцией. Жидкостная машина состояний (ЖМС), предложенная Маассом, Натшлегером и Марккрамом [2], использует импульсные нейроны, что делает ее частным случаем импульсных нейронных сетей – третьего поколения нейронных сетей [4], в котором информация кодируется дискретными событиями – импульсами.

Теоретические свойства жидкостной машины состояний хорошо изучены. В работе [2] доказана универсальная аппроксимационная мощность подобных сетей для непрерывных входных сигналов, а обзорная классификация мотиваций и областей применения жидкостных машин состояний представлена в [5]. Луковичус [6] систематизировал практические рекомендации по проектированию резервуарных архитектур. Активное развитие открытых программных библиотек, в первую очередь BindsNET [7], делает практическое исследование жидкостных машин состояний доступным без специализированного оборудования.

Влачас и соавторы [8] провели систематическое сравнение методов резервуарных

вычислений и градиентных рекуррентных архитектур на пространственно-временных хаотических эталонных тестах (уравнения Лоренца-96 и Курамото – Сивашинского). Авторы показали, что при наличии полного состояния системы резервуарный подход превосходит методы на основе обратного распространения ошибки как по точности, так и по скорости; вместе с тем в условиях данных сниженного порядка поведение резервуарного вычислителя может быть нестабильным. Прямое воспроизводимое сравнение именно импульсного резервуара – жидкостной машины состояний на нейронах типа «утечка–интегрирование–порог» – с рекуррентными сетями в условиях одношагового прогноза скалярного хаотического ряда с явным анализом соотношения числа параметров в открытом эксперименте в литературе практически отсутствует. Настоящая работа направлена на заполнение этого пробела.

Цель работы – разработать методологические основы и программную базу моделирования жидкостной машины состояний средствами библиотеки BindsNET, а также провести воспроизводимый сравнительный анализ с рекуррентной сетью с долгой краткосрочной памятью на эталонном тесте Mackey–Glass ($\tau = 17$).

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Определить параметры нейрона типа «утечка–интегрирование–порог», пригодные для реализации в библиотеке BindsNET без специального аппаратного обеспечения.
2. Описать основы моделирования программного конвейера, включающего генерацию и нормировку эталонного ряда, частотное кодирование входного сигнала, симуляцию резервуара и обучение линейного считывателя.
3. Реализовать базовую модель сравнения на основе рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью в сопоставимых условиях.
4. Провести анализ чувствительности жидкостной машины состояний к размеру резервуара N_{res} и спектральному радиусу матрицы весов ρ .

5. Количественно сопоставить модели по среднеквадратичному отклонению, средней абсолютной ошибке, времени обучения и числу обучаемых параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Хаотический временной ряд. Временной ряд $\{x(t)\}$ называется хаотическим, если порождающая его динамическая система обладает чувствительной зависимостью от начальных условий, характеризуемой положительным старшим показателем Ляпунова $\lambda > 0$: для почти любых начальных условий $x(0)$ и $x(0) + \varepsilon$ расстояние между траекториями возрастает как $\sim \|\varepsilon\| \cdot e^{\lambda t}$. При этом траектории ограничены и не стремятся к периодической орбите.

Хаотический режим динамической системы называется устойчивым, если при малых возмущениях параметра $p \rightarrow p + \delta p$ аттрактор сохраняет качественную структуру: знак старшего показателя Ляпунова $\lambda_1 > 0$ и конечность корреляционной размерности D_2 не меняются. Для уравнения Mackey–Glass при $\tau = 17$ режим является устойчивым хаотическим: $\lambda_1 \approx 0,007$ бит/шаг, $D_2 \approx 2,1$ сохраняются при вариациях $\tau \in [16, 18]$ и параметров a, b в пределах $\pm 10\%$ от номинальных значений.

Объект исследования и данные. В качестве эталонной тестовой задачи используется хаотический временной ряд Mackey–Glass с параметром задержки $\tau = 17$ – стандартный тест для методов прогнозирования нестационарных рядов [6]. При $\tau = 17$ ряд Mackey–Glass демонстрирует хаотический режим, характеризуемый положительным старшим показателем Ляпунова. Увеличение τ приводит к росту размерности аттрактора [9], что создает задачу прогнозирования с конечной ненулевой ошибкой $RMSE > 0$ для любой линейной модели.

Выбор ряда Mackey–Glass при $\tau = 17$ обусловлен четырьмя факторами.

1. При $\tau = 17$ и стандартных параметрах $a = 0,2$, $b = 0,1$, $n = 10$ уравнение Mackey–Glass имеет положительный старший показатель Ляпунова $\lambda_1 \approx 0,007$ бит/шаг и корреляционную размерность аттрактора $D_2 \approx 2,1$,

что подтверждается численным интегрированием методом [11] и согласуется с оценками из [10]. При $\tau < 17$ система переходит в периодический или квазипериодический режим ($\lambda_1 \leq 0$), что не позволяет оценить способность резервуара к разделению хаотических состояний. При $\tau \geq 30$ аттрактор становится высокоразмерным ($D_2 > 3,5$ по [9]), и задача прогнозирования усложняется настолько, что фокус эксперимента смещается с архитектуры резервуара на объем обучающей выборки. Значение $\tau = 17$ обеспечивает устойчивый хаотический режим умеренной размерности и является стандартной тестовой задачей в литературе по резервуарным вычислениям [6, 8].

2. В работе [9] показано, что при увеличении τ размерность аттрактора ряда Mackey–Glass возрастает примерно линейно – от 2 до 20 при изменении τ в широком диапазоне. При $\tau = 17$ размерность аттрактора конечна и относительно невелика, что делает задачу прогнозирования нетривиальной, но решаемой.

3. Ряд Mackey–Glass при $\tau = 17$ применяется как эталонный тест в работах по резервуарным вычислениям начиная с руководства Луковичюса [6] и в сравнительных исследованиях [8], что обеспечивает прямую сопоставимость результатов.

4. Ряд генерируется детерминированно по известному уравнению с фиксированными начальными условиями и seed, что исключает неоднозначность в воспроизведении эксперимента.

Исходное непрерывное дифференциальное уравнение Mackey–Glass с запаздыванием имеет вид:

$$\frac{dx(t)}{dt} = a \cdot \frac{x(t-\tau)}{1 + x(t-\tau)^n} - b \cdot x(t), \quad (1)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}$ – скалярное состояние; $a > 0$ – коэффициент продукции, $b > 0$ – коэффициент деградации, $n > 0$ – показатель нелинейности (в коде – параметр `n_nl`), $\tau > 0$ – время запаздывания.

Ряд генерируется программно по следующей дискретной итерационной схеме при $t \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ с фиксированным шагом $h = 1$, применяемой в литературе по резервуарным вычислениям [6]:

$$x_{t+1} = x_t + h \cdot \left[a \cdot \frac{x_{t-\tau}}{1 + x_{t-\tau}^n} - b \cdot x_t \right], \quad (2)$$

где $a = 0,2$ – коэффициент нелинейной продукции [1/шаг], $b = 0,1$ – коэффициент деградации [1/шаг], $n = 10$ – показатель нелинейности (в коде – параметр `n_nl`), $\tau = 17$ – параметр задержки [шагов], $h = 1$ – шаг дискретизации.

x_t – значение ряда на шаге t , $x_{t-\tau}$ – значение с задержкой τ шагов.

Начальные условия задаются как $x(t) \in [0,9, 1,0]$ для $t \in [0, \tau]$, `seed = 42` – начальное состояние генератора случайных чисел. Нормировка по методу минимум-максимум выполняется на тренировочной части во избежание утечки информации. Разбивка: первые 2000 точек – обучение, следующие 500 – валидация, последние 500 – тест. Структура временного ряда и разбивка выборок представлены на рис. 1.

Дискретная итерационная схема (2) представляет собой явную схему Эйлера

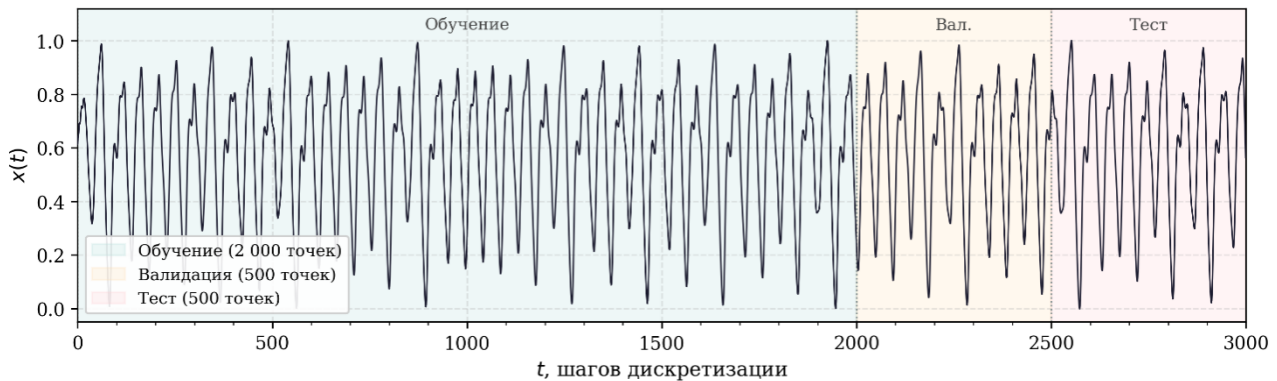


Рис. 1. Нормированный ряд Mackey–Glass ($\tau = 17$) и разбивка выборок

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

с шагом h для уравнения (1) и применяется исключительно как детерминированный генератор хаотического временного ряда, а не как точный численный решатель дифференциально-разностного уравнения (ДДУ). Специализированные решатели ДДУ (например, метод Рунге–Кутты с интерполяцией истории) обеспечивают более высокую точность аппроксимации непрерывной траектории, однако для целей настоящей работы это несущественно, так как требуется лишь воспроизводимая хаотическая последовательность с положительным показателем Ляпунова. Применение явной схемы Эйлера с шагом $h = 1$ обусловлено устоявшейся практикой в литературе по резервуарным вычислениям [6], полной воспроизводимостью без специального программного обеспечения и подтвержденным сохранением хаотического режима при $\tau = 17$.

Пуассоновское кодирование выбрано как наиболее распространенный метод для импульсных нейронных сетей [4, 7]: амплитуда сигнала кодируется средней частотой импульсов, что соответствует гипотезе о частотном кодировании в сенсорных нейронных системах. Альтернативные методы (временное кодирование, кодирование по первому импульсу) требуют более сложной реализации и менее исследованы в контексте резервуарных вычислений. Их сравнение выходит за рамки настоящей работы.

Модель нейрона типа «утечка–интегрирование–порог». Нейрон типа «утечка–интегрирование–порог» (LIF) является наиболее распространенным упрощенным описанием биологического нейрона. Обозначим постоянную времени мембраны нейрона τ_m (в отличие от параметра запаздывания τ уравнения Mackey–Glass). Непрерывная версия модели:

$$\tau_m \cdot \frac{dv}{dt} = -(v - v_0) + R \cdot I_t, \quad (3)$$

где τ_m – постоянная времени мембраны [мс], v – мембранный потенциал (нормированный, безразмерный), v_0 – потенциал покоя (нормированный, безразмерный), R – коэффициент масштабирования входного тока (в настоящей работе принято $R = 1$, что соответствует нормировке «ток в единицах порогового потенциала»), а I_t – нормированный входной ток (безразмерный). При достижении порогового значения v_{thresh} нейрон генерирует импульс и потенциал сбрасывается до v_0 .

В дискретной реализации BindsNET применяется схема точного интегрирования однородной части уравнения (3) на интервале dt (при нормировке $R = 1$ и $v_0 = 0$):

$$v_{t+1} = \beta \cdot v_t + (1 - \beta) \cdot v_0 + (1 - \beta) \cdot I_t, \quad (4)$$

где $\beta = \exp\left(-\frac{dt}{\tau_m}\right)$ – коэффициент утечки потенциала за один шаг дискретизации dt , получаемый из аналитического решения однородного уравнения $\tau_m \cdot \frac{dv}{dt} = -(v - v_0)$ на отрезке $[t, t + dt]$. Слагаемое $(1 - \beta) \cdot I_t$ соответствует точной дискретизации вынужденной части уравнения при постоянном токе I_t на интервале dt .

Условие генерации импульса:

$$\begin{aligned} s(t) &= \mathbf{1} [v(t) \geq v_{thresh}], \\ \text{при } s(t) = 1: v(t) &\leftarrow v_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Архитектура жидкостной машины состояний. Жидкостная машина состояний [2] (ЖМС) – это тройка $(\mathbf{u}, L, \mathbf{f})$, где $\mathbf{u} = \{u(t)\}_{t \geq 0}$, $u(t) \in \mathbb{R}$ – входной сигнал, $L: \{u(t)\} \rightarrow \{\mathbf{r}(t)\}$, $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^{N_{res}}$ – нелинейное отображение пространства входных потоков в пространство траекторий состояний резервуара, реализуемое рекуррентной сетью импульсных нейронов с фиксированной матрицей весов $\mathbf{W}$, $\mathbf{f}: \mathbb{R}^{N_{res}+1} \rightarrow \mathbb{R}$ – обучаемый линейный считыватель: $\hat{y}(t) = \tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{r}}(t)$.

В вычислительной модели ЖМС:

1. Входной поток $u(t)$ подается в фиксированную рекуррентную сеть импульсных нейронов (резервуар) с весовой матрицей $\mathbf{W}$, не изменяемой при обучении;

2. Резервуар реализует нелинейное отображение входного потока в высокоразмерное состояние $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^{N_{res}}$;

3. Выход вычисляется обучаемым линейным считывателем: $\hat{y}(t) = \tilde{\mathbf{w}}^{*T} \tilde{\mathbf{r}}(t)$, где $\tilde{\mathbf{r}}(t) = (\mathbf{r}(t)^T, 1)^T \in \mathbb{R}^{N_{res}+1}$ – расширенный вектор состояния.

Модель обладает двумя ключевыми свойствами: разделимостью (separation property) и аппроксимационным свойством (approximation property) [2].

Выбор архитектуры ЖМС на нейронах типа LIF обусловлен тем, что при наличии свойства разделимости и достаточном размере резервуара ЖМС является универсальным аппроксиматором функций от входных потоков с угасающей памятью (теорема Стоуна–Вейерштрасса, примененная к фильтрам с затухающей памятью [2]). Обучению подлежит только линейный считыватель (501 параметр), что критически важно при ограниченных вычислительных ресурсах и позволяет избежать переобучения. LIF-нейроны реализованы в нейроморфных процессорах Intel Loihi и IBM TrueNorth, что открывает путь к аппаратному ускорению. Библиотека BindsNET [7] предоставляет готовые реализации LIF-нейронов, что обеспечивает воспроизводимость без специализированного оборудования.

Жидкостная машина состояний состоит из трех компонентов [2, 7].

Входной слой преобразует вещественное значение входного сигнала $x(t) \in [0, 1]$ в последовательность импульсов посредством пуассоновского кодирования. Вероятность генерации импульса на каждом шаге симуляции:

$$P(s_{in(t)} = 1) = x(t) \cdot r_{max} \cdot dt, \quad (6)$$

где $x(t) \in [0, 1]$ – нормированный входной сигнал, $r_{max} = 100$ Гц – максимальная частота кодирования, а $dt = 1$ мс – шаг симуляции. Произведение $r_{max} \cdot dt = 0,1 < 1$ гарантирует

$P(\text{spike}) \leq 0,1$, что обеспечивает корректность интерпретации как вероятности Бернулли. Значение $r_{\max} = 100$ Гц выбрано из условия $r_{\max} \cdot dt = 0,1$, что при максимальном нормированном входе $x(t) = 1$ обеспечивает $P(\text{spike}) = 0,1 < 1$ и тем самым гарантирует корректность схемы Бернулли. При $r_{\max} > 1000$ Гц произведение $r_{\max} \cdot dt \geq 0,1$, что нарушает интерпретацию как вероятности; при $r_{\max} < 10$ Гц импульсный поток слишком разрежен для статистически устойчивой оценки состояния резервуара за $T_{\text{sim}} = 10$ шагов.

Резервуар – рекуррентная сеть из N_{res} нейронов типа «утечка–интегрирование–порог». Введем промежуточную матрицу $\tilde{W}$:

$$\tilde{W} = \mathbf{G} \odot \mathbf{M}, G_{ij} \sim N(0, 1) M_{ij} \sim \text{Bernoulli}(p_c), \quad (7)$$

где $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{N_{\text{res}} \times N_{\text{res}}}$ – матрица случайных весов, $\mathbf{M} \in \{0, 1\}^{N_{\text{res}} \times N_{\text{res}}}$ – бинарная маска разреженности, $p_c = 0,1$ – вероятность наличия связи, $\odot$ – поэлементное (адамарово) произведение.

Масштабирование до заданного спектрального радиуса ρ :

$$\mathbf{W} = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \tilde{\mathbf{W}}, \rho_0 = \max_i |\sigma_i(\tilde{\mathbf{W}})|, \quad (8)$$

где $\sigma_i(\tilde{\mathbf{W}})$ – i -е собственное значение матрицы $\tilde{\mathbf{W}}$, ρ_0 – ее текущий спектральный радиус (обозначение σ_i введено для отличия от показателя Ляпунова λ_i).

Считывающий слой – линейный регрессор, обучаемый методом гребневой регрессии на матрице состояний резервуара $S \in \mathbb{R}^{(T \times N_{\text{res}})}$, где $T = T_{\text{train}} = 2000$ – число временных шагов обучающей выборки.

Минимизируемый функционал:

$$\mathcal{L}(\tilde{\mathbf{w}}) = \|\tilde{\mathbf{S}} \cdot \tilde{\mathbf{w}} - \mathbf{y}\|_2^2 + \alpha \cdot \|\tilde{\mathbf{w}}\|_2^2, \quad (9)$$

где $\tilde{\mathbf{w}} = (w^T, b)^T \in \mathbb{R}^{N_{\text{res}}+1}$ – расширенный вектор весов считывателя со свободным членом (bias) $b \in \mathbb{R}$, $\tilde{\mathbf{S}} = [\mathbf{S} \mid \mathbf{1}] \in \mathbb{R}^{T \times (N_{\text{res}}+1)}$ – расширенная матрица состояний резервуара, дополненная столбцом единиц, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^T$ – целевые значения, а $\alpha = 10^{-4}$ – коэффициент регуляризации. Аналитическое решение:

$$\tilde{\mathbf{w}}^* = (\tilde{\mathbf{S}}^T \cdot \tilde{\mathbf{S}} + \alpha \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{S}}^T \cdot \mathbf{y}, \quad (10)$$

где $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{(N_{\text{res}}+1) \times (N_{\text{res}}+1)}$ – единичная матрица.

Полное число обучаемых параметров ЖМС равно $N_{\text{res}} + 1 = 501$, из которых $N_{\text{res}} = 500$ – веса считывателя w и 1 – свободный член b .

Выбор гребневой регрессии обусловлен мультиколлинеарностью столбцов матрицы $\mathbf{S}$, типичной для состояний рекуррентного резервуара.

Выбор импульсных нейронных сетей класса ЖМС для прогнозирования хаотических рядов обусловлен следующим. Хаотический ряд требует захвата нелинейных зависимостей на нескольких временных масштабах одновременно. Резервуар из импульсных нейронов реализует случайное высокоразмерное отображение входного сигнала, обеспечивая разделимость (separation property [2]): два различных входных потока с высокой вероятностью порождают различимые состояния резервуара. Обучению подлежит только линейный считыватель, что позволяет избежать переобучения при ограниченных данных и обеспечивает аналитическое решение (формула (10)).

Программная реализация. Построение жидкостной машины состояний реализовано с помощью классов Network, LIFNodes, Input и Connection библиотеки BindsNET версии 0.3.1 (опубликованный стабильный релиз на PyPI). Для каждого шага t входной сигнал подается в сеть в течение 10 мс симуляции, состояние резервуара определяется как вектор средних частот импульсов нейронов за период симуляции. Ключевым фрагментом реализации является процедура масштабирования матрицы весов резервуара до заданного спектрального радиуса ρ (листинг 1), реализующая формулу (8).

Листинг 1 приводится для обеспечения воспроизводимости: масштабирование матрицы весов до заданного спектрального радиуса (формула (8)) является ключевым шагом, от которого критически зависит динамический режим резервуара. Функция `torch.linalg.eigvals` вычисляет полный спектр плотной

матрицы; для разреженных матриц большого размера потребовался бы иной подход (например, итерационные методы). Приведение кода устраняет эту неоднозначность. Здесь переменная n_{res} соответствует N_{res} (размер резервуара), $p_{rec} - p_c = 0,1$ (вероятность

рекуррентных связей, формула (7)), $spectral_radius - \rho$ (целевой спектральный радиус, формула (8)), $mask - M_{ij} \sim \text{Bernoulli}(p_c)$, $W_tilde - \tilde{W} = G \odot M$ (формула (7)), $\rho_0 = \max_i |\sigma_i(\tilde{W})|$, $w_{rec} - W = (\rho / \rho_0) \cdot \tilde{W}$ (формула (8)).

Листинг 1

Масштабирование матрицы весов резервуара до заданного спектрального радиуса

```
mask = (torch.rand(n_res, n_res) < p_rec).float()
W_tilde = torch.randn(n_res, n_res) * mask
rho_0 = torch.linalg.eigvals(W_tilde).abs().max().item()
if rho_0 > 0:
    w_rec = W_tilde * (spectral_radius / rho_0)
```

Примечание: приведен код на Python, составлено автором.

Характер импульсной активности нейронов резервуара иллюстрирует рис. 2. Каждый вертикальный штрих соответствует одному импульсу нейрона. На рис. 2 показаны 100 нейронов из 500.

Обучение линейного считывателя и вычисление метрик выполнялось методом гребневой регрессии с нормировкой состояний резервуара (листинг 2). Время обучения считывателя измерялось с точностью до миллисекунды и включало только этап подбора весов считывателя; полное время конвейера жидкостной машины состояний (включая симуляцию резервуара, ~45 с)

составило около 58 с и обсуждается в разделе результатов.

Листинг 2 приводится потому, что порядок применения нормировки состояний резервуара MinMaxScaler (fit на обучающей матрице S_{tr} , transform на тестовой S_{te}) принципиален для исключения утечки информации. Нарушение этого порядка – распространенная ошибка, приводящая к заниженной оценке ошибки прогноза. Явное приведение кода позволяет убедиться в корректности реализации. В коде переменная S_{tr} соответствует $S_{train} \in \mathbb{R}^{T_{train} \times N_{res}}$, $S_{te} - S_{test} \in \mathbb{R}^{T_{test} \times N_{res}}$, параметр α объекта $readout - \alpha = 10^{-4}$ (формула (9)).

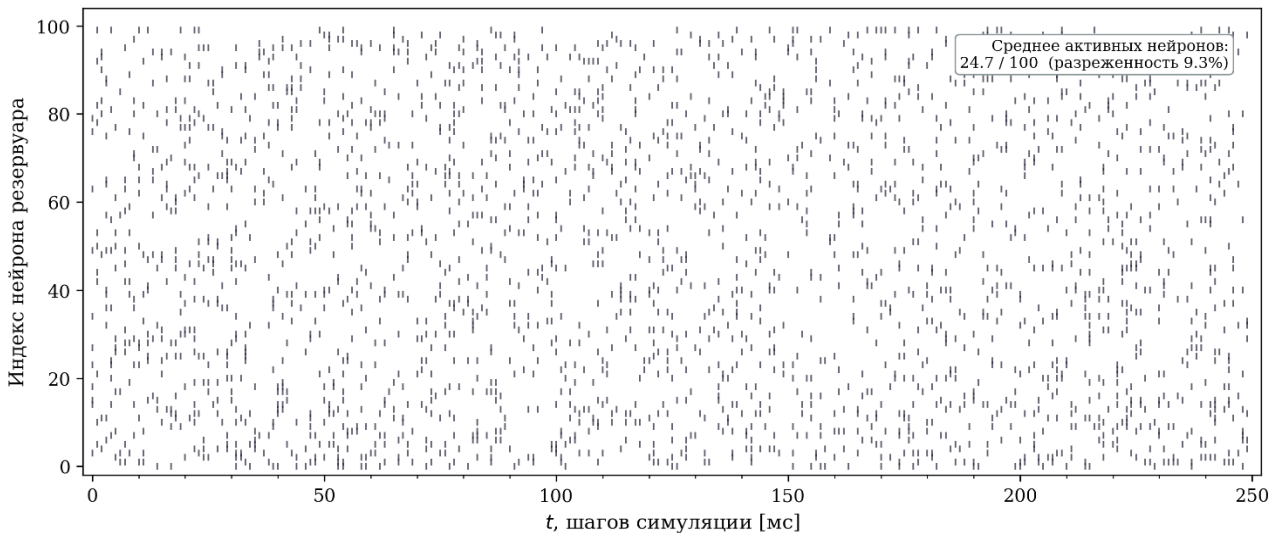


Рис. 2. Растровая диаграмма активности нейронов резервуара (100 нейронов из 500, первые 250 шагов симуляции)

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

Обучение считывателя и вычисление метрик

```
# Нормировка состояний резервуара (fit – только на обучающей выборке)
scaler = MinMaxScaler()
S_tr = scaler.fit_transform(S_tr) # нормируется по собственным min/max
S_te = scaler.transform(S_te)     # S_test нормируется по статистикам S_train

t0 = time.perf_counter()
readout = Ridge(alpha=1e-4)
readout.fit(S_tr, y_tr)           # решает задачу (10) аналитически
t_train = time.perf_counter() - t0 # время обучения считывателя, с

y_pred = readout.predict(S_te)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_te, y_pred))
mae = mean_absolute_error(y_te, y_pred)
```

Примечание: приведен код на Python, составлено автором.

В качестве базовой модели сравнения выбрана однослойная рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью, реализованная в библиотеке PyTorch 2.0 с оптимизатором Adam, ранней остановкой по валидационной потере (patience = 5 – число эпох без улучшения, после которого обучение прекращается) и максимальным числом эпох 50.

Рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM) – архитектура нейронной сети, в которой каждая ячейка поддерживает явное состояние памяти $\mathbf{c}_t \in \mathbb{R}^d$, управляемое тремя вентилями $\mathbf{f}_t, \mathbf{i}_t, \mathbf{o}_t \in (0,1)^d$, что обеспечивает постоянный градиентный поток на горизонтах порядка 10^2 – 10^3 шагов [1]. Вентили вычисляются следующим образом:

– вентиль забывания:

$$\mathbf{f}_t = \sigma(\mathbf{W}_f \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_f \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_f),$$

– входной вентиль:

$$\mathbf{i}_t = \sigma(\mathbf{W}_i \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_i \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_i),$$

– выходной вентиль:

$$\mathbf{o}_t = \sigma(\mathbf{W}_o \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_o \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_o),$$

– кандидат состояния:

$$\mathbf{g}_t = \tanh(\mathbf{W}_g \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_g \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_g),$$

– обновление памяти: $\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \mathbf{g}_t$,

– выходное состояние: $\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \odot \tanh(\mathbf{c}_t)$,

где $\mathbf{x}_t$ – входной вектор, $\mathbf{h}_{t-1}$ и $\mathbf{c}_{t-1}$ – скрытое состояние и вектор памяти на предыдущем шаге, $\mathbf{W}_f, \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_o, \mathbf{W}_g$ – матрицы весов, $\mathbf{b}_f, \mathbf{b}_i, \mathbf{b}_o, \mathbf{b}_g$ – векторы смещений, σ – сигмоидная функция, $\tanh$ – гиперболический тангенс, $\odot$ – поэлементное произведение.

Термин «долгая краткосрочная память» отражает следующее свойство: ячейка $\mathbf{c}_t$ сохраняет информацию о входах, поданных сотни шагов назад («долгая» память), тогда как классические рекуррентные сети сохраняют информацию лишь на 10–20 шагов из-за затухающего градиента («краткосрочная» память). Вентиль забывания $\mathbf{f}_t \in (0,1)^d$ обеспечивает управляемое обнуление состояния: при $\mathbf{f}_t \approx 1$ информация сохраняется, при $\mathbf{f}_t \approx 0$ – забывается.

Параметры моделей. Параметры обеих моделей приведены в табл. 1. Длительность симуляции $T_{\text{sim}} = 10$ мс выбрана как компромисс между статистической устойчивостью оценки частоты импульсов (не менее 5–10 шагов) и вычислительными затратами.

Памятью резервуара называется функция:

$MC(k) = \sup_{\mathbf{c} \in \mathbb{R}^{N_{\text{res}}}} \text{corr}^2(\mathbf{c}^T \mathbf{r}(t), x(t-k)), k = 1, 2, \dots,$

где $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^{N_{\text{res}}}$ – вектор состояния резервуара в момент t , $x(t-k)$ – вход с запаздыванием k , $\text{corr}^2(\cdot, \cdot)$ – квадрат коэффициента линейной корреляции Пирсона, усредненный по t . Суммарная емкость памяти $MC = \sum_{k \geq 1} MC(k)$.

Таблица 1

Параметры жидкостной машины состояний и рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью

Параметр	Жидкостная машина состояний	Рекуррентная сеть
Размер резервуара / число скрытых единиц	500	64
Обучаемых параметров	501 (считыватель)	17 217 (все веса)
Спектральный радиус ρ / число слоев	0,9	1
Константа утечки β	0,9	–
Оптимизатор	–	Adam, lr = $1e-3$
Вероятность рекуррентных связей	0,1	–
Длина входного окна	–	20
Длительность симуляции T_{sim}	10 мс	–
Коэффициент регуляризации α	$1e-4$	–
Patience / Максимальное число эпох	–	5 / 50

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

При $\rho \rightarrow 0$ емкость памяти стремится к нулю, при $\rho \rightarrow 1$ емкость памяти максимальна для линейного резервуара.

Резервуар обладает свойством эхосостояния (echo state property), если для любых начальных состояний $\mathbf{r}(0)$, $\mathbf{r}'(0) \in \mathbb{R}^{N_{res}}$ и любого ограниченного входного сигнала $x(t)$ выполняется $\|\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}'(t)\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Достаточным условием свойства эхосостояния является $\rho(\mathbf{W}) < 1$, где $\rho(\mathbf{W}) = \max_i |\sigma_i \mathbf{W}|$ – спектральный радиус матрицы рекуррентных весов $\mathbf{W}$.

Согласно [12] и руководству Луковичюса [6] условие $\rho < 1$ достаточно для выполнения свойства эхосостояния устойчивости резервуара. Значение 0,9 «вблизи границы устойчивости» рекомендуется в [6] как обеспечивающее баланс между памятью и устойчивостью. Оптимальность подтверждена анализом чувствительности (см. табл. 4). Вероятность рекуррентных связей $p_{rec} = 0,1$ типична для резервуаров размера ~ 500 нейронов согласно [6]. Размер резервуара $N_{res} = 500$ выбран как оптимальный по критерию $RMSE / T_{train}$ в исследованном диапазоне N_{res} компромисс (см. табл. 3): удвоение до 1000 снижает $RMSE$ на 8,4 % при росте времени в 2,3 раза. Константа утечки $\beta = 0,9$ ($\tau_m = -dt / \ln \beta \approx 9,5$ мс при $dt = 1$ мс) соответствует биологически правдоподобному диапазону $\tau_m = 5-20$ мс. Коэффициент L2-регуляризации $\alpha = 10^{-4}$ определен методом поиска по сетке параметров на валидационной выборке по критерию минимизации ошибки прогноза.

Для однослойной LSTM с d скрытыми единицами и скалярным входом (размерность входа = 1) каждый из 4 гейтов ($\mathbf{f}$, $\mathbf{i}$, $\mathbf{o}$, $\mathbf{g}$) содержит:

- матрицу входных весов $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{d \times 1}$: d параметров,
- матрицу $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{d \times d}$: d^2 параметров,
- два независимых вектора смещений $\mathbf{b}_{in}$, $\mathbf{b}_{hh} \in \mathbb{R}^d$: $2d$ параметров.

Число обучаемых параметров для LSTM-слоя: $4 \cdot (d + d^2 + 2 \cdot d) = 4 \cdot (d^2 + 3 \cdot d)$.

Выходной линейный слой ($\mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^1$) : d весов + 1 смещение = $d + 1$.

Суммарное число параметров:

$$P_{LSTM} = 4 \cdot (d^2 + 3 \cdot d) + d + 1 = 4 \cdot d^2 + 13 \cdot d + 1.$$

При $d = 64$: $P = 4 \cdot 4096 + 13 \cdot 64 + 1 = 16384 + 832 + 1 = 17217$.

Метрики оценки. Точность прогноза модели на тестовой выборке $(x_t, y_t)_{t=1}^{T_{test}}$ измеряется двумя метриками – среднеквадратичным отклонением прогноза (RMSE) и средней абсолютной ошибкой (MAE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T_{test}} \cdot \sum_{t=1}^{T_{test}} (\hat{y}_t - y_t)^2},$$

$$MAE = \frac{1}{T_{test}} \cdot \sum_{t=1}^{T_{test}} |\hat{y}_t - y_t|,$$

где $\hat{y}_t$ – прогнозируемое значение в момент t , y_t – истинное значение. Меньшие значения $RMSE$ и MAE соответствуют более высокой точности. $RMSE$ чувствительна к единичным крупным ошибкам (выбросам) сильнее, чем MAE , поскольку квадратично штрафует отклонения.

Точностью прогноза называется близость прогнозируемого значения $\hat{y}_t$ к истинному y_t на тестовой выборке. Чем меньше систематическое и случайное отклонение прогноза, тем выше точность. В настоящей работе точность количественно характеризуется двумя мерами ошибки на тестовой выборке $T_{test} = 500$ точках нормированного ряда: RMSE чувствительна к единичным крупным выбросам, MAE – к средней абсолютной величине ошибок.

Сравнение моделей выполняется по RMSE, MAE и времени обучения, вычисляемым на тестовой выборке из $T_{test} = 500$ точек нормированного ряда. Для жидкостной машины состояний отдельно фиксируется время обучения считывателя и полное время конвейера. Для оценки статистической значимости различий применяется двухвыборочный критерий Уэлча (t -критерий с неравными дисперсиями) по результатам 5 независимых запусков. Ввиду небольшого числа наблюдений ($n = 5$) мощность критерия ограничена; полученные значения p следует интерпретировать как предварительную оценку значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формализация конвейера и численные результаты. Реализованный конвейер ЖМС представляет последовательность отображений:

Шаг 1. Нормировка: $\varphi(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$, где $x_{\min}, x_{\max}$ вычисляются по $T_{train} = 2000$ точкам обучающей выборки.

Шаг 2. Пуассоновское кодирование: для каждого t и шага $k = 1, \dots, T_{sim}$ генерируется $s_{\{t,k\}} \sim \text{Bernoulli}(\varphi(x_t) \cdot r_{\max} \cdot dt)$. $T_{sim} = (10 \text{ мс}) / (1 \text{ мс}) = 10$ шагов.

Шаг 3. Симуляция резервуара: вектор состояния $\mathbf{r}(t) = \left(\frac{1}{T_{sim}}\right) \cdot \Sigma_k s_{t,k} \in [0,1]^{N_{res}}$ – вектор средних частот импульсов нейронов за T_{sim} шагов. Поскольку вероятность импульса на каждом шаге не превышает $r_{\max} \cdot dt = 0,1$, элементы $\mathbf{r}(t)$ принимают значения в $\{0, 0,1, \dots, 1,0\}$ с математическим ожиданием не более $r_{\max} \cdot dt = 0,1$. Матрица состояний $S = [\mathbf{r}(1); \dots; \mathbf{r}(T_{train})] \in \mathbb{R}^{(T_{train} \times N_{res})}$.

Шаг 4. Обучение считывателя: вектор весов $\tilde{\mathbf{w}}^*$ вычисляется аналитически по формуле (10). Число параметров: $N_{res} + 1 = 501$.

Шаг 5. Прогноз: $\hat{y}(t + 1) = \tilde{\mathbf{w}}^{*T} \cdot \tilde{\mathbf{r}}(t)$, $\tilde{\mathbf{r}}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{r}(t) \\ 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{N_{res}+1}$, где $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^{N_{res}}$ – вектор средних частот импульсов нейронов резервуара на шаге t .

Численные результаты (среднее по 5 запускам, $n = 5$):

– ЖМС: RMSE = $0,0083 \pm 0,0006$, MAE = $0,0061 \pm 0,0005$; параметров: 501.

– LSTM: RMSE = $0,0071 \pm 0,0003$, MAE = $0,0052 \pm 0,0002$; параметров: 17217.

– Относительное превышение RMSE ЖМС: $(0,0083 - 0,0071)/0,0071 \approx 16,9 \%$.

– Отношение числа параметров: $17217/501 \approx 34,4$.

Сравнение качества прогноза. В табл. 2 приведены метрики качества одношагового прогноза, усредненные по 5 независимым запускам (seed = 42–46).

Таблица 2

Метрики качества прогноза на тестовой выборке

Модель	Среднеквадратичная ошибка (mean $\pm$ std)	Средняя абсолютная ошибка (mean $\pm$ std)	Время обучения, с
Жидкостная машина состояний	$0,0083 \pm 0,0006$	$0,0061 \pm 0,0005$	12,4 (считыватель) / ~58 (конвейер)
Рекуррентная сеть	$0,0071 \pm 0,0003$	$0,0052 \pm 0,0002$	47,8 (суммарно)

Примечание: составлено автором.

Время конвейера жидкостной машины состояний включает симуляцию резервуара (~45 с) и обучение считывателя (12,4 с).

Прогнозы обеих моделей на тестовой выборке в первых 300 точках сравниваются на рис. 3.

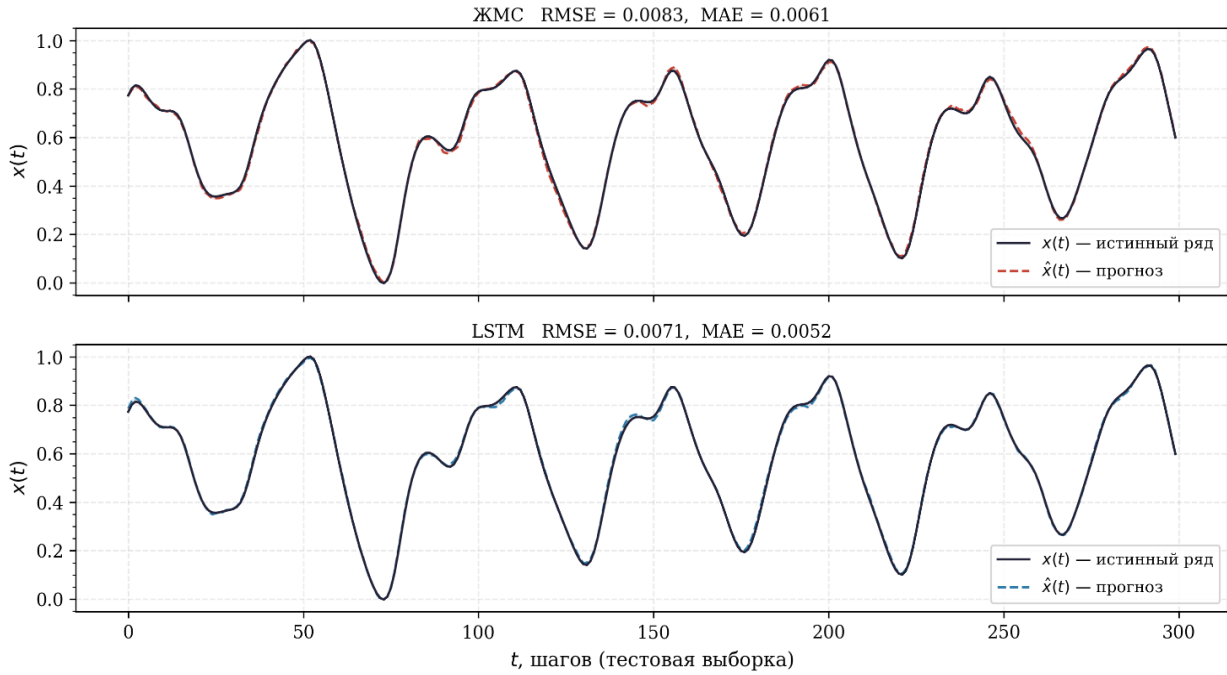


Рис. 3. Одношаговый прогноз на тестовой выборке

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

Жидкостная машина состояний уступает рекуррентной сети по среднеквадратичному отклонению на 16,9 % и по средней абсолютной ошибке на 17,3 %. Проверка статистической значимости различий по критерию Уэлча дает $p < 0,05$ для обеих метрик; с учетом ограниченного числа запусков ($n = 5$) данный результат следует рассматривать как предварительный. Дисперсия результатов для жидкостной машины состояний выше ($\text{std} \approx 0,0006$ против $\approx 0,0003$ у рекуррентной сети), что объясняется случайной инициализацией резервуара.

В части времени обучения: полное время конвейера жидкостной машины состояний (~ 58 с) несколько превышает суммарное время обучения рекуррентной сети (47,8 с). Преимущество жидкостной машины состояний по времени проявляется прежде всего в сценариях многократного переобучения считывателя на новых данных без повторной симуляции резервуара, характерных для инкрементального дообучения модели на скользящем окне данных без повторной симуляции резервуара (при числе переобучений $k \geq 4$ суммарное время адаптации ЖМС не превышает суммарного времени переобучения LSTM).

Быстрая адаптация заключается в повторном обучении только линейного считывателя $\tilde{\mathbf{w}} \in \mathbb{R}^{N_{\text{res}}+1}$ при фиксированной (замороженной) матрице $\mathbf{W}$ резервуара на новой порции данных объема T' . Операция включает два шага: вычисление матрицы состояний $\mathbf{S}' \in \mathbb{R}^{T' \times N_{\text{res}}}$ симуляцией резервуара на T' входных шагах и решение задачи гребневой регрессии $\tilde{\mathbf{w}}^* = (\tilde{\mathbf{S}}'^T \tilde{\mathbf{S}}' + \alpha \mathbf{I})^{-1} \tilde{\mathbf{S}}'^T \mathbf{y}'$ аналитически, где $\tilde{\mathbf{S}}' = [\mathbf{S}' \mid \mathbf{1}] \in \mathbb{R}^{T' \times (N_{\text{res}}+1)}$.

В настоящей работе время адаптации считывателя ЖМС составляет 12,4 с ($N_{\text{res}} + 1 = 501$ параметр), что в 3,9 раза меньше, чем время полного переобучения LSTM (47,8 с, 17 217 параметров, оптимизатор Adam, до 50 эпох).

Сравнение метрик качества прогноза ЖМС и LSTM представлено на рис. 4а. Планки погрешностей показывают среднеквадратичную ошибку по пяти независимым запускам.

Сравнение времени обучения ЖМС и LSTM представлено на рис. 4б. Время конвейера ЖМС включает симуляцию резервуара (~ 45 с) и обучение считывателя (12,4 с).

Ключевым результатом настоящей работы является сравнение по числу обучаемых параметров: жидкостная машина состояний обучает лишь 501 параметр считывателя против

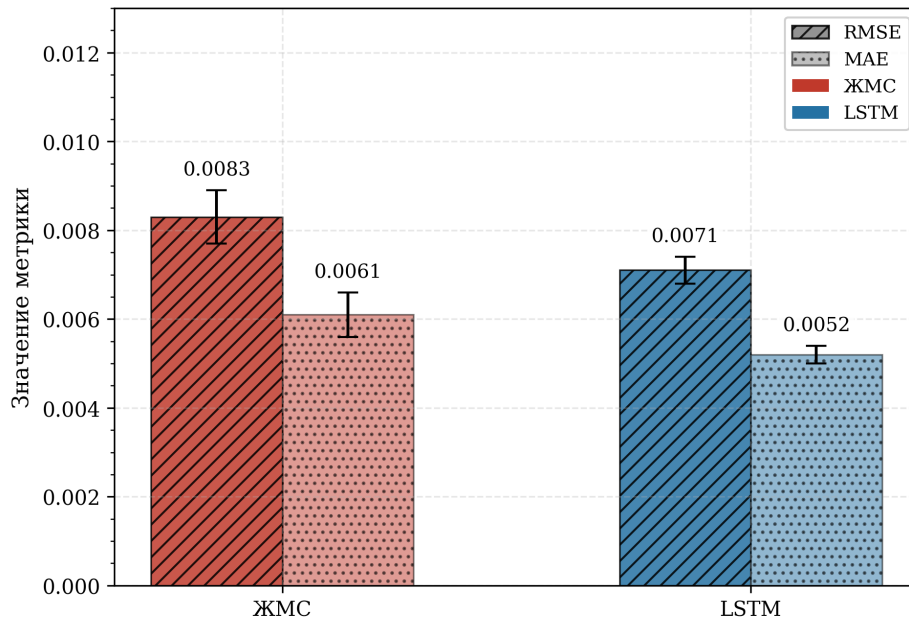


Рис. 4а. Сравнение метрик качества прогноза ЖМС и LSTM

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

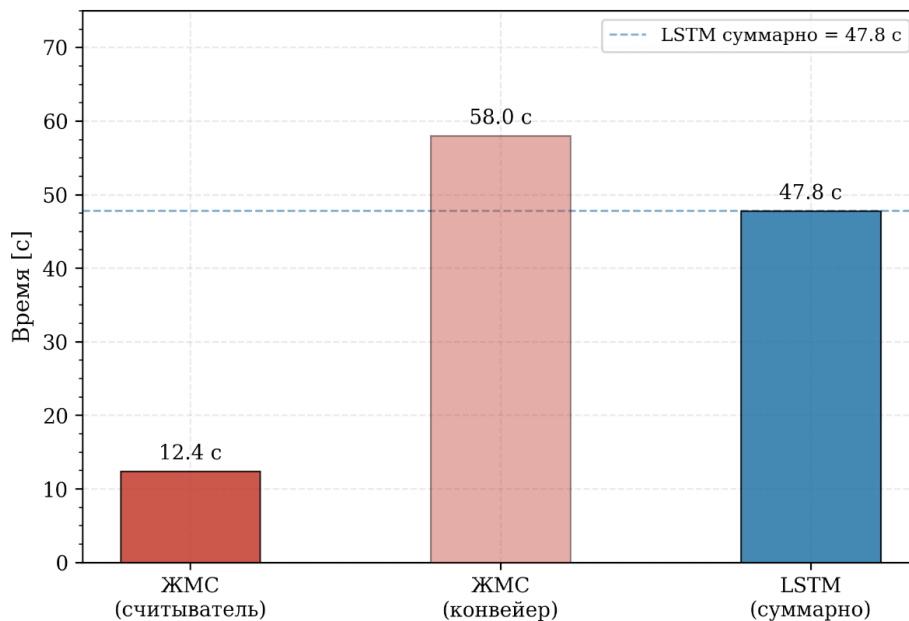


Рис. 4б. Сравнение времени обучения ЖМС и LSTM

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

17 217 параметров рекуррентной сети – в 34 раза меньше. При этом потеря в точности составляет не более 17 %, то есть потеря 16,9 % точности по RMSE достигается сокращением числа обучаемых параметров в 34 раза (501 против 17 217).

Полученное соотношение точность/скорость согласуется с результатами Влачаса и соавторов [8], которые показали конкурен-

тоспособность резервуарного подхода относительно методов обратного распространения ошибки при наличии полного состояния системы, хотя и с оговоркой о нестабильности в условиях данных сниженного порядка.

Влияние размера резервуара. Результаты анализа чувствительности к размеру резервуара при фиксированном спектральном радиусе $\rho = 0,9$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

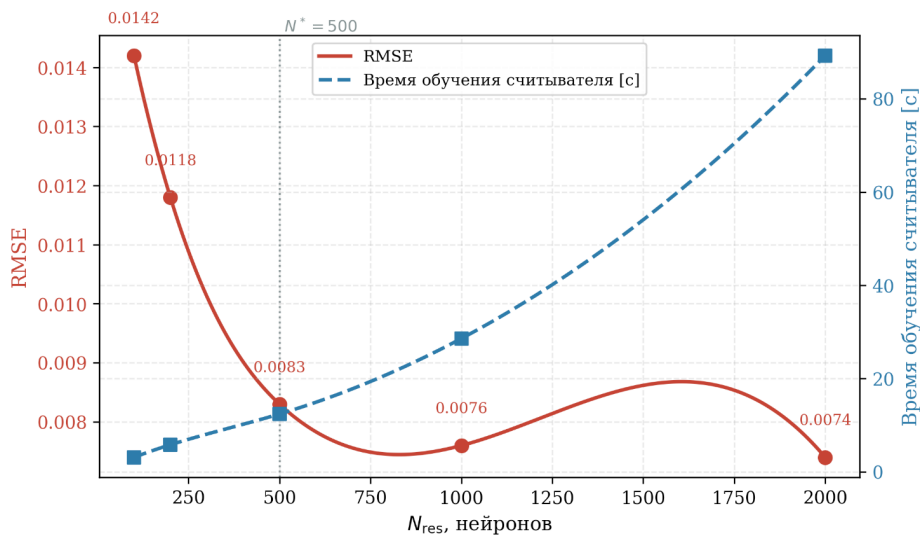
Зависимость качества прогноза от размера резервуара

N_{res}	Среднеквадратичная ошибка	Средняя абсолютная ошибка	Время обучения, с
100	0,0142	0,0107	3,1
200	0,0118	0,0089	5,8
500	0,0083	0,0061	12,4
1 000	0,0076	0,0057	28,6
2 000	0,0074	0,0055	89,3

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

Зависимость среднеквадратичного отклонения и времени обучения считывателя от размера резервуара дополнительно проиллюстрирована на рис. 5.

Данные табл. 3 показывают, что удвоение размера резервуара с 500 до 1 000 нейронов снижает среднеквадратичную ошибку лишь на 8,4 %, тогда как время обучения считывателя

Рис. 5. Зависимость точности прогноза и времени обучения от размера резервуара ($\rho = 0,9$)

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

возрастает в 2,3 раза. Дальнейшее удвоение до 2 000 нейронов дает прирост точности всего 2,6 % при семикратном увеличении времени относительно $N_{\text{res}} = 500$. Значение $N_{\text{res}} = 500$ представляет оптимальный по критерию $\text{RMSE} / T_{\text{train}}$ в исследованном диапазоне N_{res}

компромисс между точностью и вычислительными затратами для данной тестовой задачи.

Влияние спектрального радиуса. Результаты анализа чувствительности к спектральному радиусу при фиксированном $N_{\text{res}} = 500$ представлены в табл. 4. Значение

Таблица 4

Зависимость качества прогноза от спектрального радиуса

Спектральный радиус, ρ	Среднеквадратичная ошибка	Средняя абсолютная ошибка
0,5	0,0134	0,0101
0,7	0,0099	0,0074
0,9	0,0083	0,0061
1,0	0,0091	0,0068
1,2	0,0156	0,0118

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

$\rho = 0,9$ выбрано как обеспечивающее минимум RMSE на валидационной выборке (500 точек, не входящих в обучающую выборку) при последовательном переборе $\rho \in \{0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,2\}$ в условиях фиксированного $N_{\text{res}} = 500$ и $n = 5$ независимых запусков для каждого значения. Итоговые метрики, приведенные в табл. 4, вычислены на тестовой выборке после однократной фиксации найденного оптимума, чтобы избежать смещения оценки из-за многократного сравнения на тестовых данных.

График зависимости среднеквадратичного отклонения от спектрального радиуса показан на рис. 6, тепловая карта среднеквадратичного отклонения по сетке значений ρ и N_{res} – на рис. 7.

При $\rho = 1,0$ достаточное условие echo state property ($\rho < 1$) формально не выполняется, однако на практике сеть сохраняет функциональность – данное наблюдение согласуется с результатами, описанными в литературе [6, 12].

Зависимость, представленная в табл. 4, имеет выраженный минимум при $\rho \approx 0,9$.

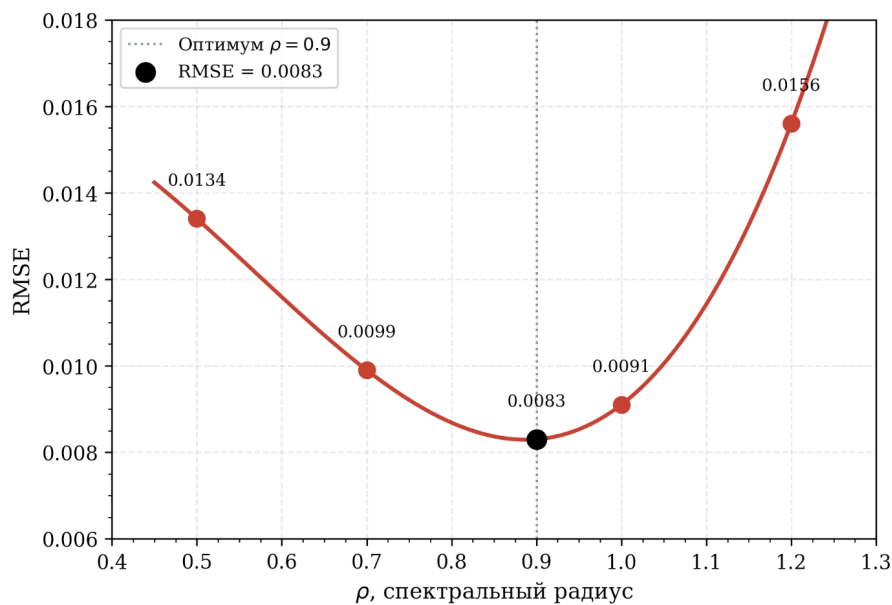


Рис. 6. Зависимость точности прогноза от спектрального радиуса матрицы весов резервуара ($N_{\text{res}} = 500$)
 Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

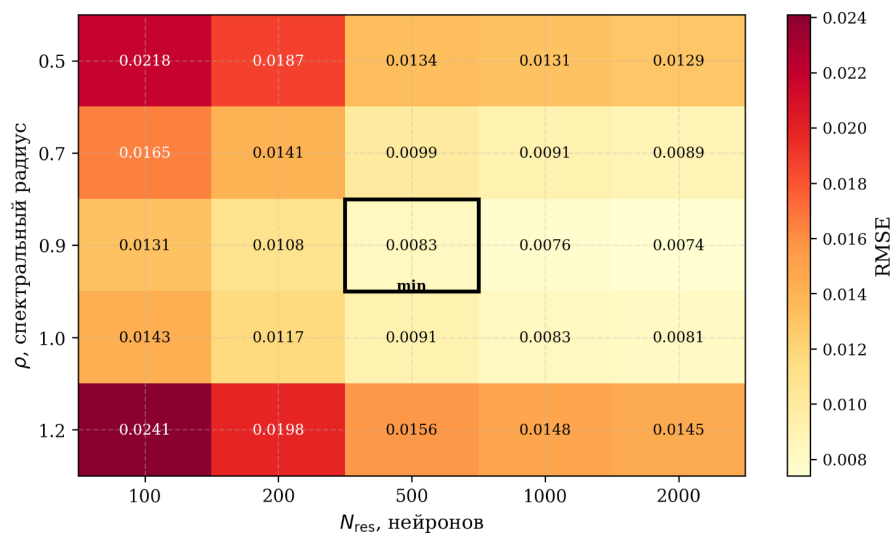


Рис. 7. Тепловая карта среднеквадратичного отклонения в зависимости от спектрального радиуса и размера резервуара

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

Согласно рекомендациям Луковичюса [6] при ρ значительно меньше единицы резервуар быстро «забывает» историю входного сигнала, при $\rho > 1$ динамика становится неустойчивой. Значение $\rho \approx 0,9$ обеспечивает баланс между памятью резервуара и его устойчивостью, что является оптимальным для данной тестовой задачи. При $\rho = 1,2$ среднеквадратичная ошибка возрастает до 0,0156, что на 88 % хуже оптимального.

Уровень активации. Среднее значение доли временных шагов, на которых нейрон резервуара генерировал импульс (sparsity rate), при оптимальных параметрах составило 9,3 % $\pm 2,1$ %: в среднем из 500 нейронов на каждом шаге симуляции импульс генерировали око-

ло 46. Для качественного сопоставления: доля элементов скрытого состояния рекуррентной сети, превышающих 0,5 по абсолютной величине, составила около 62 %. Необходимо подчеркнуть, что прямое количественное сравнение этих величин некорректно, поскольку в импульсных нейронных сетях активация бинарна, тогда как в рекуррентных сетях с долгой краткосрочной памятью скрытые состояния непрерывны. Приведенные числа носят иллюстративный характер и указывают лишь на принципиальное различие в характере представления информации между двумя архитектурами. Анализ остатков прогноза и распределение ошибок на первых 300 точках тестовой выборки представлены на рис. 8а и 8б.

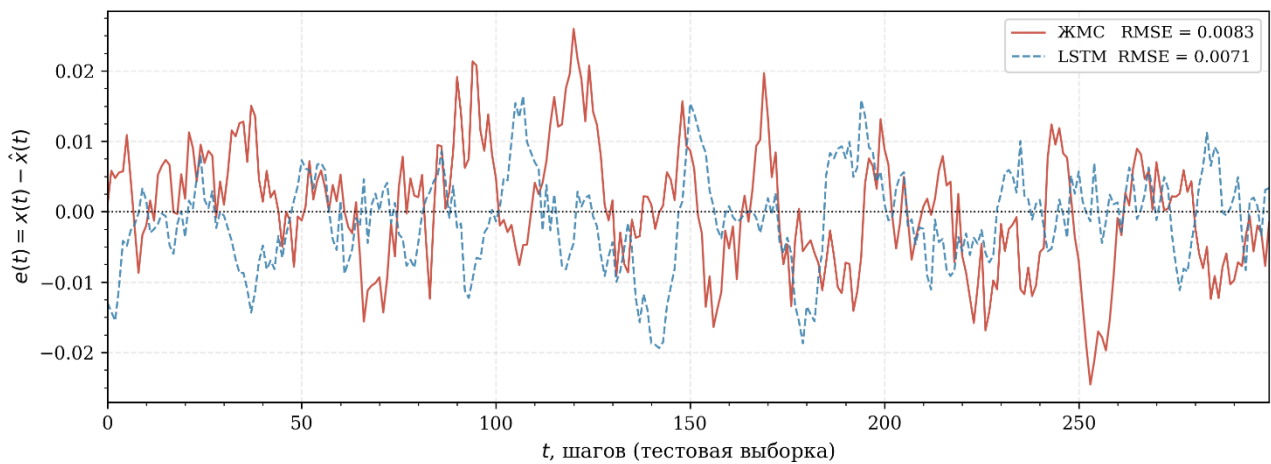


Рис. 8а. Анализ остатков прогноза

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

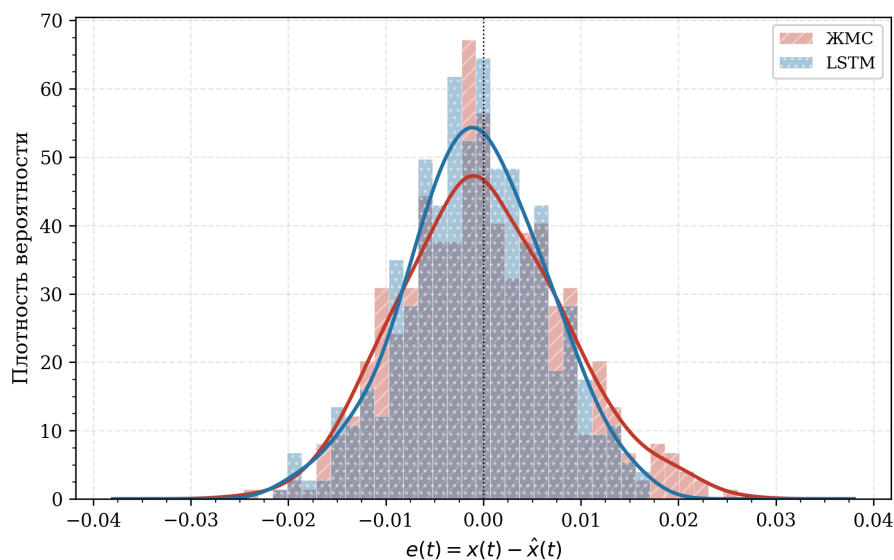


Рис. 8б. Распределение ошибок

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

Рис. 8а демонстрирует временные остатки прогноза (разность между истинными и предсказанными значениями) для обеих моделей на первых 300 точках тестовой выборки. Остатки обеих моделей не обнаруживают выраженного систематического смещения. Их среднее значение близко к нулю, что свидетельствует об отсутствии значимого систематического отклонения в обоих случаях. Вместе с тем остатки жидкостной машины состояний имеют несколько большую амплитуду, что согласуется с ее более высокой среднеквадратичной ошибкой (см. табл. 2). Заметна также слабая автокорреляция остатков у обеих моделей в зонах резких переходов ряда, что типично для одношагового прогноза хаотических рядов и отражает фундаментальную непредсказуемость изменений в окрестности экстремумов.

Рис. 8б показывает распределение ошибок прогноза в виде гистограмм плотности вероятности. Сплошные кривые показывают ядерную оценку плотности (KDE). Оба распределения симметричны относительно нуля и близки к нормальному, что дополнительно подтверждает отсутствие систематической погрешности. Распределение ошибок жидкостной машины состояний имеет несколько более широкие «хвосты» по сравнению с рекуррентной сетью, что свидетельствует о большей вероятности единичных крупных ошибок. Именно этим объясняется разрыв по среднеквадратичному отклонению, чувствительному к выбросам. Симметричность, центрированность на нуле и нормально-подобная форма обоих распределений в совокупности указывает на то, что ошибки обеих моделей носят стохастический, а не детерминированный характер, и не являются следствием систематического недо- или переобучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования разработан и верифицирован программный комплекс на языке Python 3.10 (библиотеки BindsNET 0.3.1,

PyTorch 2.0, NumPy, scikit-learn), включающий пять программных модулей.

Модуль 1 – генерация и нормировка данных. Функция `generate_mg(a, b, n_nl, tau, T_total)` реализует итерационную схему (2) и возвращает ряд $\{x_t\}_{t=1}^{T_{total}}$. Нормировка $\tilde{x}_t = \frac{x_t - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ выполняется по статистикам $x_{\min}, x_{\max}$ обучающей выборки $T_{train} = 2000$ (во избежание утечки информации). Входной параметр `n_nl` соответствует n – показателю нелинейности уравнений (1)–(2).

Модуль 2 – пуассоновское кодирование. Функция `encode(x_norm, f_max, dt, T_sim)` для каждого t генерирует бинарный импульсный поток $s_{t,k} \in \{0,1\}$, $k = 1, \dots, T_{sim}$, по закону Бернулли с параметром $p_t = \tilde{x}_t \cdot f_{\max} \cdot dt$ (формула (6)).

Модуль 3 – симуляция резервуара. Функция `simulate(spikes_in, W, v_thresh, v0, beta)` обновляет вектор потенциалов $\mathbf{v}_t \in \mathbb{R}^{N_{res}}$ по формуле (4) и возвращает матрицу состояний $\mathbf{S}_{train} \in \mathbb{R}^{T_{train} \times N_{res}}$ ($N_{res} = 500$), матрица W масштабируется до $\rho(W) = 0,9$ по формуле (8).

Модуль 4 – обучение считывателя. Функция `train(S, y, alpha)` принимает матрицу состояний $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{T \times N_{res}}$, внутри расширяет до $\tilde{\mathbf{S}} = [\mathbf{S} \mid \mathbf{1}] \in \mathbb{R}^{T \times (N_{res}+1)}$ и возвращает $\tilde{\mathbf{w}}^* = (\tilde{\mathbf{S}}^T \cdot \tilde{\mathbf{S}} + \alpha \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{S}}^T \cdot \mathbf{y}$ аналитически (формула (10)), $\alpha = 10^{-4}$, число параметров $N_{res} + 1 = 501$.

Модуль 5 – прогноз и оценка. Функция `predict(S_test, w_star)` возвращает $\hat{y}(t + 1) = \tilde{\mathbf{w}}^{*T} \cdot \tilde{\mathbf{r}}(t)$ (формула Шага 5), где $\tilde{\mathbf{r}}(t) = (\mathbf{r}(t)^T, 1)^T \in \mathbb{R}^{N_{res}+1}$. RMSE и MAE вычисляются на $T_{test} = 500$ точках.

Программный комплекс реализован как последовательный конвейер: `generate_mg` → `encode` → `simulate` → `train` → `predict`. Данные передаются в виде массивов NumPy:

- `generate_mg` возвращает $\{x_t\}_{t=1}^{T_{test}}$;
- `encode` принимает $\{\phi(x_t)\} \in [0,1]^{T_{train}}$ и возвращает $\mathbf{S}_{in} \in \{0,1\}^{T_{train} \times T_{sim}}$;
- `simulate` принимает $\mathbf{S}_{in}$ и возвращает $\mathbf{S}_{train} \in \mathbb{R}^{T_{train} \times N_{res}}$;
- `train` принимает $\mathbf{S}_{train}$, расширяет до $\tilde{\mathbf{S}} = [\mathbf{S}_{train} \mid \mathbf{1}] \in \mathbb{R}^{T_{train} \times (N_{res}+1)}$ и возвращает $\tilde{\mathbf{w}}^* \in \mathbb{R}^{N_{res}+1}$ (501 параметр);

– predict принимает $\mathbf{S}_{\text{test}} \in \mathbb{R}^{T_{\text{test}} \times N_{\text{res}}}$ и $\tilde{\mathbf{w}}^*$, возвращает $\{\hat{y}_t\} \in \mathbb{R}^{T_{\text{test}}}$.

Базовая сравнительная модель: класс LSTMBaseline(d_in=1, d_h=64, d_out=1) реализован в PyTorch 2.0. Использованы оптимизатор Adam ($\eta = 10^{-3}$), функция потерь MSE, ранняя остановка patience = 5, до 50 эпох, длина окна $L = 20$, число обучаемых параметров 17 217. Воспроизводимость обеспечена seed = 42.

Сравнительный эксперимент на эталонном тесте Mackey–Glass ($\tau = 17$) показал, что жидкостная машина состояний уступает рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью по точности не более чем на 17 % (различие статистически значимо по критерию Уэлча при $p < 0,05$, однако носит предварительный характер ввиду $n = 5$), обучая при этом в 34 раза меньше параметров (501 против 17 217). Полное время конвейера жидкостной машины состояний (~ 58 с) несколько превышает время обучения рекуррентной сети (47,8 с), однако в сценариях многократного переобучения считывателя без повторной симуляции резервуара жидкостная машина состояний обеспечивает адаптацию в 3,9 раза быстрее (12,4 с против 47,8 с). Анализ чувствительности к спектральному радиусу (табл. 4, $N_{\text{res}} = 500$, $n = 5$ запусков) выявил глобальный минимум RMSE = 0,0083 при $\rho = 0,9$. При $\rho = 0,5$ RMSE = 0,0134 (+61 %) – резервуар не удержи-

вает историю входа на горизонте $\tau = 17$ шагов (емкость памяти MC $\rightarrow 0$ при $\rho \rightarrow 0$). При $\rho = 1,2$ RMSE = 0,0156 (+88 %) нарушается условие echo state property ($\rho(W) < 1$), резервуар теряет устойчивость к начальным условиям. Значение $\rho = 0,9$ обеспечивает максимальную точность прогноза при сохранении echo state property, что подтверждает теоретическую рекомендацию работы [6]. Установлено, что дальнейшее увеличение размера резервуара с 500 до 2 000 нейронов снижает RMSE лишь на 8,4 % при семикратном росте t_{train} .

Полученные результаты дополняют существующий научный контекст: в отличие от работы Влачаса и соавторов [8], исследовавших резервуарные вычисления на пространственно-временных эталонных тестах, настоящая работа показывает, что ЖМС достигает RMSE = 0,0083 при 501 обучаемом параметре – в 34 раза меньше, чем у LSTM (17 217 параметров при RMSE = 0,0071) на задаче одношагового прогноза скалярного хаотического ряда. Показано, что жидкостная машина состояний предпочтительна в сценариях с жесткими ограничениями на число обучаемых параметров или требованием быстрой переадаптации считывателя, тогда как рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью эффективна при требовании RMSE $\leq 0,0075$ на нормированном ряду Mackey–Glass ($\tau = 17$) в условиях данного эксперимента.

Список источников

1. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
2. Maass W., Natschläger T., Markram H. Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations // *Neural Computation*. 2002. Vol. 14, no. 11. P. 2531–2560. <https://doi.org/10.1162/089976602760407955>.
3. Jaeger H. The “echo state” approach to analysing and training recurrent neural networks. URL: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/7d4a7eec-a22c-4df0-903d-93f9cd5aca02> (дата обращения: 01.03.2026).
4. Maass W. Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models // *Neural Networks*. 1997. Vol. 10, no. 9. P. 1659–1671. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(97\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(97)00011-7).

References

1. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
2. Maass W., Natschläger T., Markram H. Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations. *Neural Computation*. 2002;14(11):2531–2560. <https://doi.org/10.1162/089976602760407955>.
3. Jaeger H. The “echo state” approach to analysing and training recurrent neural networks. URL: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/7d4a7eec-a22c-4df0-903d-93f9cd5aca02> (accessed: 01.03.2026).
4. Maass W. Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models. *Neural Networks*. 1997;10(9):1659–1671. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(97\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(97)00011-7).

5. Maass W. Liquid state machines: Motivation, theory, and applications // *Computability in Context: Computation and Logic in the Real World* / S. B. Cooper, A. Sorbi, eds. London : Imperial College Press, 2011. P. 275–296.
6. Lukoševičius M. A practical guide to applying echo state networks // *Neural Networks: Tricks of the Trade* / G. Montavon, G. B. Orr, K.-R. Müller, eds. 2nd ed. Berlin/Heidelberg : Springer, 2012. Vol. 7700. P. 659–686. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_36.
7. Hazan H., Saunders D. J., Khan H. et al. BindsNET: A machine learning-oriented spiking neural networks library in Python // *Frontiers in Neuroinformatics*. 2018. Vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fninf.2018.00089>.
8. Vlachas P. R., Pathak J., Hunt B. R. et al. Backpropagation algorithms and reservoir computing in recurrent neural networks for the forecasting of complex spatiotemporal dynamics // *Neural Networks*. 2020. Vol. 126. P. 191–217. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.02.016>.
9. Farmer J. D. Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1982. Vol. 4, no. 3. P. 366–393. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(82\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0167-2789(82)90042-2).
10. Grassberger P., Procaccia I. Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1984. Vol. 13, no. 1–2. P. 34–54. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(84\)90269-0](https://doi.org/10.1016/0167-2789(84)90269-0).
11. Wolf A., Swift J. B., Swinney H. L. et al. Determining Lyapunov exponents from a time series // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985. Vol. 16. P. 285–317. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90011-9).
12. Jaeger H. Echo state network // *Scholarpedia*. URL: http://www.scholarpedia.org/article/Echo_state_network (дата обращения: 01.04.2026).
5. Maass W. Liquid state machines: Motivation, theory, and applications. In: S. B. Cooper, A. Sorbi, eds. *Computability in Context: Computation and Logic in the Real World*. London: Imperial College Press; 2011. p. 275–296.
6. Lukoševičius M. A practical guide to applying echo state networks. In: G. Montavon, G. B. Orr, K.-R. Müller, eds. *Neural Networks: Tricks of the Trade*. 2nd ed. Berlin/Heidelberg: Springer; 2012. Vol. 7700. p. 659–686. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_36.
7. Hazan H., Saunders D. J., Khan H. et al. BindsNET: A machine learning-oriented spiking neural networks library in Python. *Frontiers in Neuroinformatics*. 2018;12. <https://doi.org/10.3389/fninf.2018.00089>.
8. Vlachas P. R., Pathak J., Hunt B. R. et al. Backpropagation algorithms and reservoir computing in recurrent neural networks for the forecasting of complex spatiotemporal dynamics. *Neural Networks*. 2020;126:191–217. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.02.016>.
9. Farmer J. D. Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1982;4(3):366–393. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(82\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0167-2789(82)90042-2).
10. Grassberger P., Procaccia I. Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1984;13(1–2):34–54. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(84\)90269-0](https://doi.org/10.1016/0167-2789(84)90269-0).
11. Wolf A., Swift J. B., Swinney H. L. et al. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985;16:285–317. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90011-9).
12. Jaeger H. Echo state network. *Scholarpedia*. URL: http://www.scholarpedia.org/article/Echo_state_network (accessed: 01.04.2026).

Информация об авторе

Е. В. Алымова – кандидат технических наук;
<https://orcid.org/0000-0002-1340-6590>,
langnbsp@gmail.com

About the author

E. V. Alymova – Candidate of Sciences (Engineering);
<https://orcid.org/0000-0002-1340-6590>,
langnbsp@gmail.com

Научная статья

УДК 004.732+519.876.5

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-2>

Исследование функционирования локальных вычислительных сетей на основе имитационного моделирования

Наталья Сергеевна Веремчук*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия*

Аннотация. Локальные вычислительные сети широко используются в современных организациях для передачи данных и взаимодействия пользователей. Рост и развитие информационно-коммуникационных технологий приводят к необходимости тщательного проектирования и оценки качества функционирования локально-вычислительных сетей перед внедрением новых решений. Традиционные методы расчета пропускной способности и задержки пакетов часто оказываются недостаточными для учета реальных условий эксплуатации сети, поскольку они основаны на упрощающих предположениях относительно характера нагрузки и трафика. Проектирование и оптимизация таких сетей представляют собой сложную задачу, особенно в условиях ограниченных ресурсов и растущих требований к скорости обработки информации. В данной статье продемонстрирована возможность применения методов имитационного моделирования к изучению локально-вычислительных сетей, включая оценку их эффективности и оптимизацию структуры. Построена имитационная модель локально-вычислительной сети. Описаны настройки основных элементов моделируемого процесса. Проведены эксперименты с построенной моделью при различной вместимости очередей и нагрузке на сервер. По результатам экспериментов уточнены параметры и характеристики сети, отмечены выводы по оптимизации ее работы и улучшению функционирования. В частности, установлено, что в рассматриваемой сети есть проблемы с организацией очереди. Размер очереди – это управляемый параметр, и его оптимальное значение можно подбирать экспериментально с применением имитационной модели. Отмечено, что улучшения работы сети, а именно снижения процента потерянных запросов, можно достичь оптимизацией размера очереди. Материалы статьи могут применяться для оценки функционирования локально-вычислительных сетей при их проектировании и модернизации, а также в рамках освоения основных образовательных программ.

Ключевые слова: вычислительная сеть, имитационная модель, параметры сети

Для цитирования: Веремчук Н. С. Исследование функционирования локальных вычислительных сетей на основе имитационного моделирования // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 25–32. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-2>.

Original article

Investigation of functioning of local computer networks based on simulation modeling

Natalya S. Veremchuk*Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia*

Abstract. Local area networks are widely used in modern organizations for data transmission and user interaction. The growth and development of information and communication technologies lead to the need for careful design and evaluation of the quality of functioning of local area networks before implementing new solutions. The prevalent methods employed for the calculation of bandwidth and packet delay are frequently insufficient to encompass the true operational state of a network. Such insufficiency arises from their reliance on simplifying assumptions pertaining to the nature of network load and traffic. Designing and optimizing such networks is a difficult task, especially under conditions of limited resources and increasing demands on infor-

mation processing speed. This article illustrates the feasibility of employing simulation modeling techniques for the investigation of local computer networks, encompassing the assessment of their efficacy and the refinement of their architecture. A simulation model of a local computer network has been built. The settings of the main elements of the simulated process are described. Tests are conducted with the constructed model with different queue capacities and server loads. Based on the results of the tests, the parameters and characteristics of the network are clarified, conclusions on optimizing its operation and improving its functioning are noted. In particular, it was found that the network under consideration has problems with queuing. The queue size is a controllable parameter, and its optimal value can be selected experimentally using a simulation model. It is noted that improving network performance, namely reducing the percentage of lost requests, can be achieved by optimizing the queue size. The materials presented in the article serve as a basis for evaluating local computer network functionality during design and modernization, and are also relevant to the development of foundational educational programs.

Keywords: computer network, simulation model, network parameters

For citation: Veremchuk N. S. Investigation of functioning of local computer networks based on simulation modeling. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):25–32. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-2>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационно-коммуникационных технологий приводит к значительному увеличению объема передаваемых данных и росту числа подключенных устройств в корпоративных сетях [1, 2]. Это приводит к необходимости тщательного проектирования и оценки качества функционирования локально-вычислительных сетей (ЛВС) перед внедрением новых решений [3, 4]. Традиционные методы расчета пропускной способности и задержки пакетов часто оказываются недостаточными для учета реальных условий эксплуатации сети, поскольку основаны на упрощающих предположениях относительно характера нагрузки и трафика. Проблема часто заключается в том, что точное предсказание поведения сложной системы требует учета множества факторов, например взаимодействия процессов, случайных изменений нагрузки и многое другое. Для решения таких задач активно применяются методы имитационного моделирования, позволяющие воспроизвести поведение реальной сети в виртуальной среде и провести эксперименты с различными конфигурациями оборудования и схемами коммутации [5–8].

Методы имитационного моделирования получили широкое распространение благодаря своей гибкости и универсальности [9, 10]. С их применением можно строить модели сложных систем и анализировать поведение

при различных нагрузках и параметрах конфигурации [5, 8]. Выбор инструмента моделирования часто зависит во многом от специфики решаемой задачи и уровня детализации моделируемого процесса.

В литературе современные исследования показывают, что использование инструментов имитации позволяет значительно повысить точность прогнозирования характеристик сети, снизить риски сбоев и увеличить эффективность системы [6]. Эти преимущества позволяют выделить имитационное моделирование как один из ключевых подходов к проектированию и модернизации локальных вычислительных сетей.

При создании программ имитационного моделирования возникают задачи, общие для широкого класса моделей: организация псевдопараллельного выполнения алгоритмов, динамическое распределение памяти, операции с модельным временем, отображающим астрономическое время функционирования оригинала, имитация случайных процессов, ведение массива событий, сбор и обработка результатов моделирования. С целью упрощения решения этих и ряда иных задач созданы специализированные инструменты, программные комплексы, языки моделирования. Реализация поставленных задач выполняется целиком либо частично встроенными функциями соответствующего языка.

Одним из ключевых аспектов, определяющих успех разработчика имитационной модели, является выбор подходящего программного продукта. Современный рынок инструментов предлагает разнообразный ассортимент программных решений, предназначенных для целей имитации различных процессов. Некоторые из них являются специализированными системами, разработанными для конкретных областей применения. Другие представляют собой многофункциональные пакеты, которые поддерживают одну или несколько методик моделирования.

Однако в большинстве исследований основное внимание уделяется глобальным сетям и телекоммуникациям общего назначения, оставляя открытым вопрос оптимального подхода к моделированию небольших корпоративно-локальных сетей. Цель данной работы состоит в разработке имитационной модели локально-вычислительной сети для изучения ее эксплуатационных характеристик и разработке рекомендаций по улучшению ее функционирования. Материалы статьи могут применяться для оценки функционирования локально-вычислительных сетей при их проектировании и модернизации, а также в рамках освоения основных образовательных программ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опишем построение имитационной модели небольшой локально-вычислительной сети (ЛВС). В сети реализуется передача сообщений, механизм тайм-аута и потери сообщений. ЛВС имеет радиальную структуру и содержит четыре рабочие станции и один сервер. Пусть поток сообщений на рабочих станциях – пуассоновский. В рамках моделируемого процесса необходимо предусмотреть сбор статистики по сообщениям, ожидающим отправки на рабочих станциях.

Цель работы – демонстрация возможности применения методов имитационного моделирования к изучению локально-вычислительных сетей, включая оценку их эффективности и оптимизацию структуры.

Для построения имитационной модели ЛВС использовалась отечественная бесплатная программная среда AnyLogic Personal Learning Edition, находящаяся в открытом доступе. Выбор указанной программной среды для моделирования ЛВС особенно оправдан. В AnyLogic поддерживается дискретно-событийное моделирование, которое идеально подходит для имитации работы ЛВС. Пакеты данных (события) поступают в систему, ожидают обслуживания в очереди, обрабатываются серверами и маршрутизаторами и далее передаются по каналам. В AnyLogic есть готовая библиотека моделирования процессов, которая позволяет быстро и наглядно собрать модель сетевого узла или каналов передачи данных. ЛВС можно рассматривать не только как систему, но и как множество взаимодействующих агентов (компьютеры, серверы). Поддерживаемое в AnyLogic агентное моделирование предоставляет возможность имитировать сложное сетевое поведение и протоколы. Для визуализации моделируемых процессов можно использовать динамическую анимацию, встроенные элементы для создания графиков, гистограмм и многое другое. Это позволяет наблюдать за экспериментами в режиме реального времени, что, в свою очередь, помогает выявлять логические ошибки и эффективно представлять полученные результаты.

Для построения имитационной модели ЛВС установлены следующие ограничения:

- ЛВС содержит четыре рабочие станции, откуда поступают сообщения;
- поток сообщений на рабочих станциях – пуассоновский;
- ЛВС имеет радиальную структуру, т. е. все рабочие станции подключены к одному серверу;
- сервер может обрабатывать одновременно только один запрос;
- очереди скапливаются на рабочих станциях;
- на каждой рабочей станции собирается статистика по количеству сообщений, попадающих в очередь;

– скорость обработки запросов сервером рассчитывается по экспоненциальному закону в пределах 100 мс;

– очереди на рабочих станциях имеют буфер размером в 1 запрос.

Установленные в ограничениях параметры могут изменяться в ходе проведения экспериментов с имитационной моделью.

Задачей экспериментов является оценка эффективности работы сети при различных условиях, например выяснить, как изменение интенсивности входящего трафика (λ) влияет на задержки и потери.

В модели рассматривается пуассоновский поток сообщений (простейший поток) – это ординарный поток событий (поступлений сообщений в сеть), для которого имеют место условия стационарности, отсутствия последствий и ординарности. Стационарность: вероятность поступления k сообщений на любом интервале времени зависит только от длины этого интервала, а не от его расположения на временной оси. Отсутствие последствий: количества сообщений, поступивших на непересекающихся интервалах времени, независимы. Ординарность: вероятность поступления двух и более сообщений за малый промежуток времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью поступления одного сообщения.

Время обслуживания запросов сервером часто моделируется экспоненциальным распределением, функция плотности вероятности которого равна $f(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}$, для $t \geq 0$, где

μ – параметр распределения, средняя скорость обслуживания (запросов в единицу времени). Обратная величина $1 / \mu$ – это среднее время обслуживания одного запроса. Функция распределения: $F(t) = P(T < t) = 1 - e^{-\mu t}$ – вероятность того, что запрос будет обработан быстрее, чем за время t .

В качестве единицы модельного времени в проекте программной среды AnyLogic выбраны секунды. Для имитации поступления и обработки запросов использована последовательность элементов «Source», «Queue», «Delay», «SelectOutput» и «Sink» из библиотеки моделирования процессов среды AnyLogic. При создании диаграммы моделируемой ЛВС использовались четыре элемента «source», которые имитировали рабочие станции, отправляющие сообщения серверу. С применением объектов «queue» имитировались очереди запросов на станциях. Элемент «SelectOutput» применяется для сбора статистики по запросам, поступающим с рабочих станций и находящимся в очереди. Для имитации работы сервера применялся элемент «Delay». Завершает диаграмму элемент «Sink», который уничтожает все объекты моделируемой системы. В результате построения диаграмма работы ЛВС выглядит так, как показано на рис. 1.

В свойствах элементов построенной диаграммы заданы параметры, удовлетворяющие описанным выше требованиям. Для каждого элемента «Source» настроено время между прибытиями сообщений, соответствующих

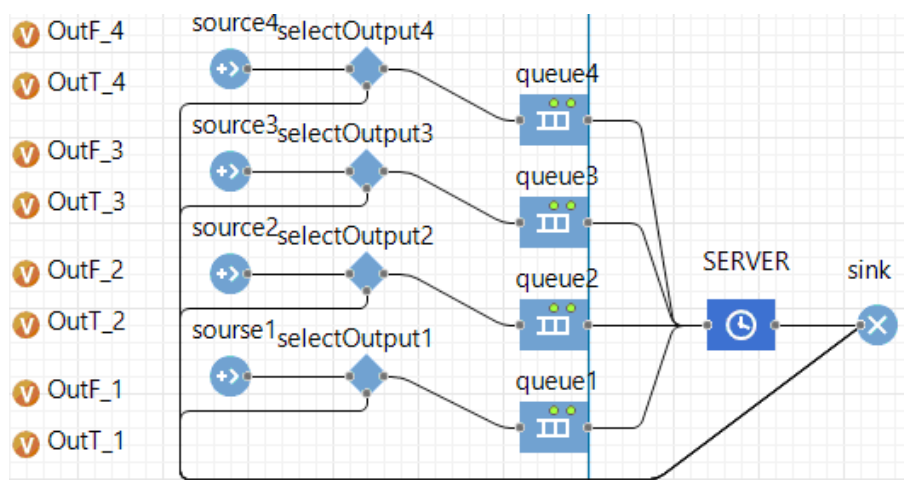


Рис. 1. Основные элементы диаграммы моделируемого процесса работы ЛВС

Примечание: составлено автором.

пуассоновскому потоку. Сообщения имитируются с применением агентного моделирования. Для этого создан новый агент с параметром, в котором хранится момент выдачи запроса. В настройках элемента «SelectOutput» прописаны его вместимость и условие, ограничивающее поступление переполняющих запросы в очередь. В настройках сервера указываются также его вместимость и время задержки – exponential (10,0), что составляет 100 мс в соответствии с требованиями.

В модели ведется сбор статистических данных, отображающих время реакции сервера. Для сбора статистики применяются переменные, в которые будет записывается общее количество отправленных и вышедших из очереди запросов (рис. 1). В настройках элементов «SelectOutput» соответственно указаны действия при выходе. Для наглядного отображения собранной статистической информации применялись различные диаграммы (рис. 2).

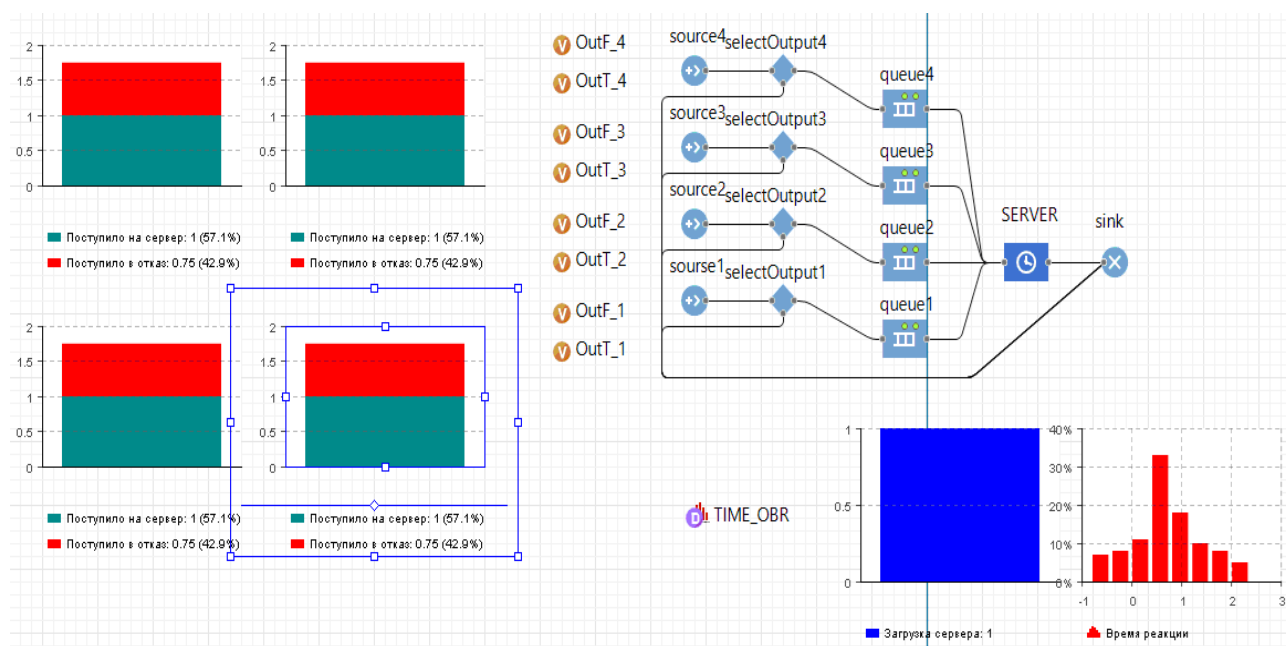


Рис. 2. Рабочая область моделируемого процесса

Примечание: составлено автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах варьировались и уточнялись следующие параметры: интенсивность входящего потока (λ), размер буфера (очереди), интенсивность потока обслуживания (μ).

Первый эксперимент проведен с целью выяснения количества обработанных и потерянных запросов при разной скорости их отправки. Для четырех станций установлены параметры времени между их прибытиями: 1, 2, 3 и 4 секунды соответственно. Подобные промежутки выбраны как возможные промежутки времени для отправки сообщений разными пользователями. Результат эксперимента представлен на рис. 3.

По результатам первого эксперимента отмечено, что при ограниченной очереди в 1 запрос

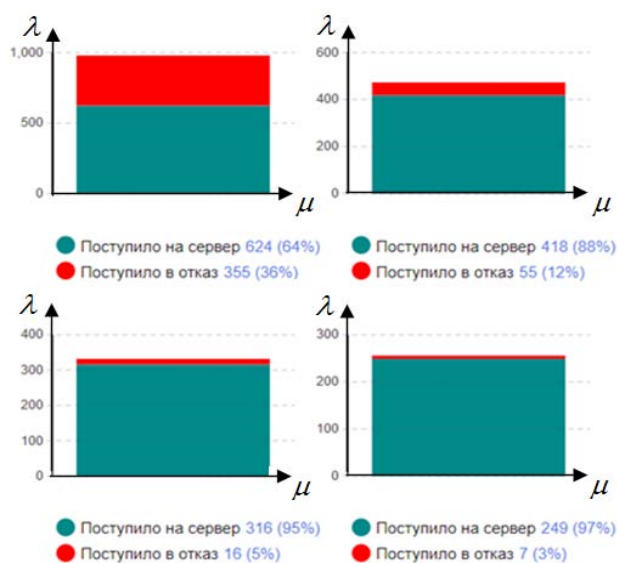


Рис. 3. Результат первого эксперимента

Примечание: составлено автором.

и скорости работы сервера 100 мс минимум треть запросов теряется при отправке сообщений со станции. В остальных случаях потери либо незначительны, либо не превышают 15 % от общего количества. Очереди позволяют не перегружать сервер, но при таких параметрах потери слишком существенны.

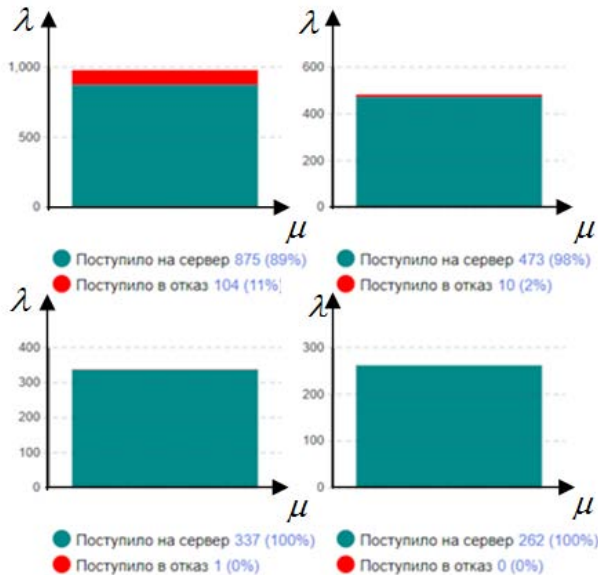


Рис. 4. Результат эксперимента при увеличении вместимости очередей в два раза
 Примечание: составлено автором.

Подобное решение при достаточном увеличении очередей позволит исключить потерю запросов, но замедлит работу сети. В результате изменения вместимости очередей удалось добиться 1 % потери запросов, что значительно превосходит 15 % при первоначальных значениях параметров.

Третий эксперимент проведен с сервером при увеличении его мощности. Для этого необходимо установить значение времени задержки exponential (100,0). Результат эксперимента представлен ниже (рис. 6).

Результат эксперимента не оправдал ожиданий, и увеличение мощности сервера не повлияло на количество обработанных запросов.

При исследовании эффективности работы ЛВС рассматриваются задачи оптимизации таких целевых функций, как, например, минимизация среднего времени отклика системы, минимизация вероятности потери

Для следующего эксперимента вместимость очередей была изменена в два и в четыре раза соответственно для проверки того, как это повлияет на количество потерянных запросов без увеличения производительности сервера. Результаты представлены ниже (рис. 4, 5).

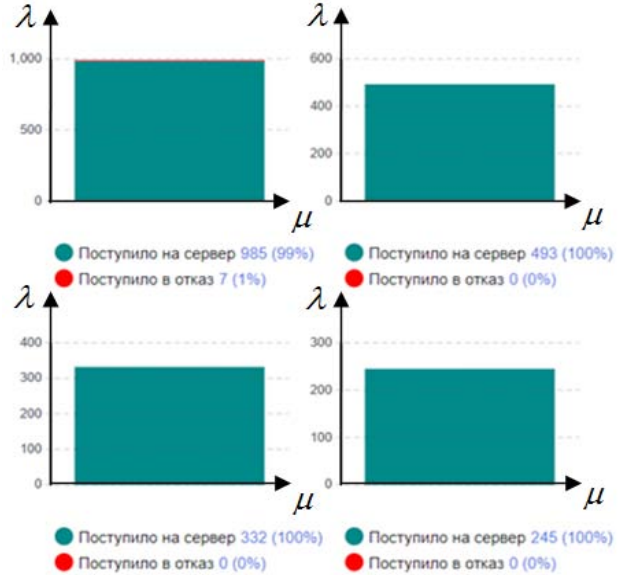


Рис. 5. Результат эксперимента при увеличении вместимости очередей в четыре раза
 Примечание: составлено автором.

пакетов, максимизация пропускной способности сети, оптимальное распределение загрузки сервера.

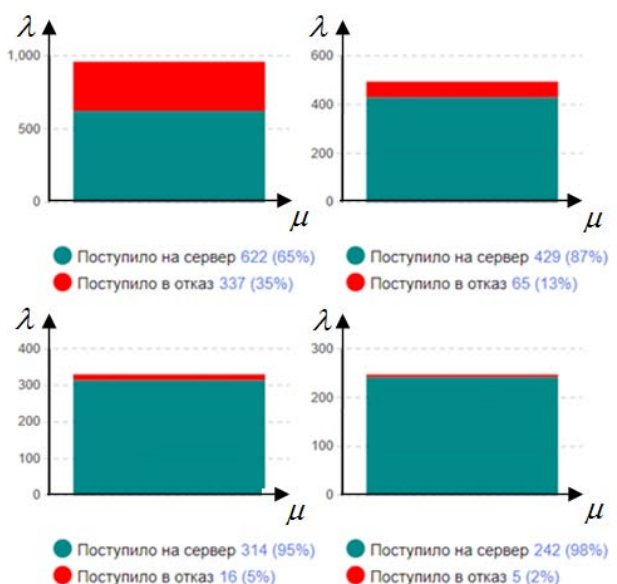


Рис. 6. Эксперимент с увеличением мощности сервера
 Примечание: составлено автором.

По результатам проведенных экспериментов отмечено, что для предложенной архитектуры сети с целью минимизации потери пакетов следует увеличить вместимость очередей на рабочих станциях по крайней мере в четыре раза (рис. 5). Также можно отметить, что для данной ЛВС необходимо контролировать входную нагрузку. При росте числа пользователей потребуется модернизация сервера с целью повышения его производительности.

Установленный размер очереди по условию задачи приводит к потерям, что говорит о проблеме с организацией очереди. Размер очереди – это управляемый параметр, и его оптимальное значение можно подбирать экспериментально с применением имитационной модели. Оптимальное значение – это компромисс: очередь должна быть достаточно большой, чтобы буферизовать пики нагрузки и снизить потери до приемлемого уровня, но не настолько большой, чтобы запросы в ней устаревали. Улучшение работы сети в данном контексте будет определяться снижением процента потерянных запросов. Этого улучшения, согласно гипотезе второго эксперимента, планируется достичь не увеличением производительности сервера, а оптимизацией размера буфера (очереди).

В качестве направлений дальнейших исследований эффективности работы ЛВС с применением имитационной модели можно отметить следующие: переход с дисциплины FIFO на приоритетное обслуживание критичных пакетов, что может снизить время отклика системы; контроль входной нагрузки;

выявление узких мест, например сервер обработки и др.

В построенной имитационной модели значения параметров в настройках элементов можно изменять и в режиме реального времени имитировать различные сценарии работы сети и исходы развития событий, на основании которых принимать более качественные и обоснованные решения в вопросах проектирования и оценки качества функционирования локально-вычислительных сетей. Модель адаптируется под другую архитектуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье продемонстрирована возможность применения методов имитационного моделирования к изучению локально-вычислительных сетей, включая оценку их эффективности и оптимизацию структуры. Построена имитационная модель локально-вычислительной сети. Описаны настройки основных элементов моделируемого процесса.

Проведены эксперименты с построенной моделью при различной вместимости очередей и нагрузке на сервер. По результатам экспериментов уточнены параметры и характеристики сети, сделаны выводы по оптимизации ее работы и улучшению функционирования.

Материалы статьи могут применяться для оценки функционирования локально-вычислительных сетей при их проектировании и модернизации, а также в рамках освоения основных образовательных программ.

Список источников

1. Кропотов В. Л., Каминев К. Р. Особенности проектирования компьютерной сети для предприятий малого бизнеса // Актуальные исследования. 2023. № 3–1. С. 24–26.
2. Ретюнских С. Н. Способ оценки структурной надежности вычислительных компьютерных сетей // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 86–91.
3. Платонов Д. Е. Оценка производительности технологической сети при обработке однопродуктового потока с использованием компьютерного моделирования // Вестник Санкт-Петербургского

References

1. Kropotov V. L., Kaminov K. R. Osobennosti proektirovaniya kompyuternoy seti dlya predpriyatiy malogo biznesa. *Aktualnye issledovaniya*. 2023;(3–1):24–26. (In Russ.).
2. Retyunskikh S. N. Method for assessing structural reliability computing computer networks. *Modern High Technologies*. 2022;(2):86–91. (In Russ.).
3. Platonov D. E. Evaluation of process network performance in single product flow processing using computer simulations. *Vestnik of Saint Petersburg State University of Technologies and Design. Series 4: Industrial Technologies*. 2023;(1):46–50. (In Russ.).

- государственного университета технологий и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. № 1. С. 46–50.
4. Мельникова Е. М. Трудности при проектировании компьютерной сети // Научно-исследовательский центр «Technical Innovations». 2023. № 15. С. 159–163.
 5. Подсадников А. В., Розов К. В., Кратов С. В. Применение средств имитационного моделирования компьютерных сетей в учебном процессе // Информатика и образование. 2021. № 1. С. 47–56.
 6. Шелухин О. И., Шариков А. Ю. Имитация поведения компьютерной системы с помощью искусственных нейронных сетей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 5. С. 29–37.
 7. Карандашев А. А., Оленев В. Л., Бриттов Г. С. Моделирование динамики информационных потоков в маршрутах вычислительных сетей // Информационно-управляющие системы. 2023. № 3. С. 39–50.
 8. Веремчук Н. С. Исследование процессов передачи данных с применением имитационного подхода // Цифровизация и кибербезопасность: современная теория и практика : материалы III Международной научно-практической конференции, 26–27 октября 2023 г., г. Омск. Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2024. С. 13–18.
 9. Веремчук Н. С. Экспериментальное исследование системы массового обслуживания клиентов в банке // Вестник кибернетики. 2022. № 3. С. 25–31.
 10. Веремчук Н. С. Имитационное моделирование как инструмент экономического планирования производственных линий // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2025. Т. 19, № 3. С. 216–228.
 4. Melnikova E. M. Trudnosti pri proektirovanii kompyuternoy seti. *Scientific Research Center “Technical Innovations”*. 2023;(15):159–163. (In Russ.).
 5. Podsadnikov A. V., Rozov K. V., Kratov S. V. Applying network simulation tools in learning process. *Informatics and Education*. 2021;(1):47–56. (In Russ.).
 6. Sheluhin O. I., Sharikov A. Yu. Simulation of the behavior of a computer system using artificial neural networks. *T-Comm*. 2021;15(5):29–37. (In Russ.).
 7. Karandashev A. A., Olenov V. L., Brittov G. S. Modeling the dynamics of information flows in the routes of computer networks. *Information and Control Systems*. 2023;(3):39–50. (In Russ.).
 8. Veremchuk N. S. Research of data transmission processes using a simulation approach. In: *Proceedings of the 3rd International Research-to-Practice Conference “Tsifrovizatsiya i kiberbezopasnost: sovremennaya teoriya i praktika”*, October 26–27, 2023, Omsk. Omsk: The Siberian State Automobile and Highway University; 2024. p. 13–18. (In Russ.).
 9. Veremchuk N. S. Experimental study of the mass customer service system in the bank. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(3):25–31. (In Russ.).
 10. Veremchuk N. S. Simulation modeling as a tool for economic planning of production lines. *Russian Journal of Social Sciences and Humanities*. 2025;19(3):216–228. (In Russ.).

Информация об авторе

Н. С. Веремчук – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-2709-9755>,
n-veremchuk@rambler.ru

About the author

N. S. Veremchuk – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-2709-9755>,
n-veremchuk@rambler.ru

Научная статья
УДК 378.147:004



<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-3>

Инструмент оценки курса в Moodle на основе структуры и стандартных логов

Адриан Гросу✉, Анастасия Игоревна Гросу
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. Предмет статьи – практическая задача сопоставления задуманной структуры электронного курса с фактической активностью пользователей, зафиксированной в штатном журнале событий установки Moodle. Цель – описать авторский способ построения сводной оценки и отчета, а также реализацию этого способа в виде локального модуля, пригодного и для точечной работы преподавателя в своем курсе, и для обзорных действий администратора по множеству курсов. Задачи сводятся к формализации входных данных, выбору набора метрик, заданию правил доступа и хранения отчетов, обеспечению воспроизводимости расчета на выбранном календарном интервале. Методология носит инженерный характер: на вход подаются описание элементов курса и отфильтрованные по периоду и ролям записи стандартного журнала, на выходе – числовые показатели по блокам «структура», «типовой состав активностей», «использование контента», «охват студентами», «стабильность активности во времени», взвешенный итог с явной формулой и перечень элементов с низкой относительной вовлеченностью с группировкой по типам модулей и исключением декоративных меток. Результаты – готовое расширение с интерфейсом запуска оценки, просмотра и удаления отчетов, отдельным административным режимом массового запуска. Вывод закрепляет полезность инструмента для самопроверки преподавателем того, насколько разработанные им элементы реально используются, и для институционального мониторинга при явном ограничении: показатели отражают наблюдаемое использование и согласованность структуры с логами, а не эффект обучения. Новизна – в связке указанных метрик, разграничении сценариев доступа и прозрачном представлении итога в отчете.

Ключевые слова: электронный курс, Moodle, журнал событий, оценка использования элементов курса, мониторинг курсов, обучающая аналитика, самодиагностика курса, администрирование

Для цитирования: Гросу А., Гросу А. И. Инструмент оценки курса в Moodle на основе структуры и стандартных логов // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 33–41. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-3>.

Original article

Tool for Moodle course assessment based on structure and standard logs

Adrian Grosu✉, Anastasiya I. Grosu
Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The subject of this paper is a practical task: aligning the intended structure of an online course with actual user activity recorded in the standard event log of a Moodle system. The aim is to describe an original method for producing a consolidated course evaluation report and its implementation as a local plugin suitable both for a teacher's course-level self-check and for administrative cross-course monitoring. The tasks include formalizing input data, selecting a metric set, defining access and report-storage rules, and ensuring reproducible calculations within a selected calendar interval. The methodology is engineering-oriented: the input includes course element descriptions and role- and period-filtered records from the standard log; the output includes numerical indicators for structure, activity type composition, content use, student reach, and temporal activity stability, along with a weighted aggregate score with an explicit formula and a list of low-engagement elements grouped by module type, excluding decorative labels. The result is a working extension with inter-

faces for running evaluations, viewing reports, deleting reports, and executing batch runs in a separate administrative mode. The conclusion confirms the practical value of the tool for teachers' self-assessment of whether designed course elements are actually used, and for institutional monitoring, with an explicit limitation: the indicators reflect observed usage patterns and structural consistency with logs rather than learning outcomes. The novelty lies in the combined use of these metrics, role-specific access scenarios, and transparent score presentation in the report.

Keywords: online course, Moodle, event log, course element usage evaluation, course monitoring, learning analytics, course self-diagnosis, administrating

For citation: Grosu A., Grosu A. I. Tool for Moodle course assessment based on structure and standard logs. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):33–41. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-3>.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы связана с тем, что преподаватель при проектировании курса закладывает опорные элементы – задания, тесты, ресурсы, ветвления по неделям, – а после запуска получает лишь фрагментарную обратную связь. Параллельно в системе накапливаются записи о действиях пользователей [1]. Пока два этих пласта не сведены в один наглядный отчет с понятными числами и списком узких мест, ответ на практический вопрос остается трудозатратным: какие из разработанных элементов в выбранный период реально используются, а какие фактически простаивают? Для подразделения, отвечающего за сопровождение дистанционного обучения, тот же разрыв проявляется в масштабе каталога курсов: без единого правила расчета и хранения срезов трудно сопоставлять курсы между собой и возвращаться к результатам проверки позже.

Работы по обучающей аналитике и анализу журналов в системах управления обучением показывают, что поведенческие следы допускают агрегирование в показатели вовлеченности и риска отсева, но смысл событий зависит от настроек платформы и сценария курса [2]. Отдельный пласт исследований посвящен индикаторам качества цифрового курса и рубрикам экспертной оценки: там подчеркивается, что автоматические прокси не заменяют педагогическую экспертизу, но могут поддерживать регулярный контроль [3, 4]. Для среды Moodle описаны подходы к извлечению признаков из стандартного хранилища логов и построению дашбордов [5, 6]. Обсуждаются

ограничения полноты данных и этические аспекты [7, 8]. При этом в прикладной практике часто встречается разрыв между «универсальной аналитикой» и локальным инструментом, который преподаватель может запустить в своем курсе без выгрузки в сторонние сервисы, с фиксированным календарным окном и сохранением отчета для последующего разбора.

Цель статьи – изложить авторский инженерный способ оценки курса по структуре и журналу событий и описать реализованный программный модуль для Moodle, ориентированный на две роли: преподавателя (самопроверка использования разработанных элементов) и администратора (обзор и массовый запуск).

Задачи: сформулировать требования к входным данным и к интерпретации результата как показателя использования, а не эффекта обучения; описать состав метрик, правила фильтрации журнала по периоду и ролям, способ агрегирования в итоговый балл; привести сведения о правах доступа, хранении отчетов и пользовательских сценариях; обозначить ограничения и направления развития.

Нерешенные и уточняемые аспекты, на которые опирается работа: неоднозначность отдельных типов событий как прокси «усвоения»; чувствительность показателей к длине периода и к составу студентов; необходимость институциональной настройки весов. Эти вопросы в статье не снимаются экспериментом на выборке курсов, но фиксируются как рамка честного применения инструмента

и как основа для дальнейших исследований с внешней калибровкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Среда разработки и размещение модуля

Реализация выполнена как локальный модуль платформы Moodle с идентификатором компонента `local_coursequality`. Нижняя совместимость по версии ядра зафиксирована на уровне 4.1.0 и выше (номер версии ядра в файле описания плагина: 2022112800). Используются штатные программные интерфейсы Moodle для работы с контекстом курса, зачислениями и ролями, а также для построения навигации в настройках курса.

Объект и источники данных

Объектом служит один курс внутри установки Moodle. Входные данные делятся на два блока.

Первый блок – структура курса на момент расчета: перечень видимых элементов из таблиц, связывающих экземпляры модулей с курсом, и справочник типов модулей. В выборку попадают записи, в которых элемент не помечен как удаляемый и имеет признак видимости для пользователей курса.

Второй блок – журнал событий плагина регистрации «Стандартный журнал» таблицы (`logstore_standard_log`). Перед расчетом проверяется фактическое наличие таблицы в базе данных; при отсутствии журнала расчет по логам невозможен, что отражается в отчете.

Когорта студентов и фильтрация журнала

Под студентами понимаются пользователи с действующим зачислением на курс и назначением роли со стандартным коротким именем «Студент» в контексте курса. Число студентов в когорте обозначим N (при $N = 0$ показатели, зависящие от логов, задаются нулевыми или неопределенными значениями согласно ветвлениям в программе).

Все показатели, зависящие от логов, считаются только по этой когорте и только внутри календарного интервала $[t_n, t_k]$, который задает пользователь: нижняя граница – начало

суток даты начала, верхняя – конец суток даты окончания; привязка к всемирному координированному времени. Дата окончания не может быть позже текущих суток; начало не может следовать за концом. Интерфейс не принимает запуск без изменения периода, если обе даты совпадают с текущей датой: пользователь обязан выбрать диапазон явно.

Для оценки обращения к отдельному элементу курса в журнале отбираются строки с уровнем контекста «модуль в курсе», идентификатором курса, временем $t_n \leq t \leq t_k$, полем действия «чтение» (в терминологии Moodle – `stud` со значением «чтение») и пользователем из когорты студентов.

Формулы и правила нормирования показателей

Ниже S с индексом обозначает подбалл в шкале от 0 до 100 после нормирования; исходные доли и частоты безразмерны.

1) *Разнообразие структуры.* Пусть среди видимых элементов курса есть K различных типов модулей, а доля элементов j -го типа равна p_j (сумма всех p_j равна единице). Используется энтропия Шеннона (мера неопределенности распределения, классическая формула теории информации) [9]:

$$H = -\sum_j p_j \log_2 P_j,$$

где суммирование ведется по типам, которые реально присутствуют в курсе.

Вспомогательные величины для нормирования: $a = \min(1, H / 2,5)$, $b = \min(1, K / 6)$.

Подбалл структуры: $S_{\text{стр}} = 100 \cdot (0,6a + 0,4b)$; округление до двух знаков после запятой выполняется в программе так же, как для остальных подбаллов.

2) *Рекомендуемые типы активности.* Задан неизменяемый в текущей версии перечень M типов модулей (урок, тест, задание, модули H5P, игровой модуль и т. д. – точный список задается в коде). Пусть m – число типов из этого перечня, которые хотя бы один раз встречаются среди видимых элементов курса. Тогда $S_{\text{рек}} = 100 \cdot m / M$.

3) **Использование контентных модулей.**

Выделяется подмножество видимых элементов типов «страница», «книга», «ресурс», «папка», «ссылка» (перечень задается в коде). Пусть их C штук, $C \geq 1$. Для элемента с номером i пусть u_i – число различных студентов когорты, имевших за период хотя бы одно чтение в контексте этого элемента. Доля охвата элемента $r_i = u_i / N$ при $N > 0$; средняя доля по контентным элементам $\bar{r} = (1 / C) \sum_i r_i$.

Подбалл: $S_{\text{кон}} = 100 \cdot \min(1, \bar{r} / 0,6)$, то есть средняя доля 0,6 (60 % когорты в среднем по контентным элементам) отображается как верхняя граница шкалы. Дополнительно в отчет выводится число элементов с $r_i < 0,05$ как вспомогательный счетчик «почти без просмотров».

4) **Охват.** Пусть A – число различных студентов когорты, у которых за период есть хотя бы одна запись в журнале по курсу (без ограничения на уровень контекста, в пределах отбора по когорте и времени). Доля $q = A / N$ при $N > 0$. Тогда $S_{\text{охв}} = 100 \cdot \min(1, q / 0,85)$, то есть доля 0,85 принята как ориентир «очень высокий охват» для приведения к шкале до 100.

5) **Стабильность.** Недели внутри $[t_n, t_k]$ задаются группировкой меток времени событий (в реализации используется комбинация года и номера недели по всемирному времени). Для недели w пусть A_w – число различных студентов когорты с хотя бы одним событием на курсе в эту неделю; $f_w = A_w / N$ – доля активных в неделю w . Пусть получено W недель с ненулевой активностью, $\bar{f} = (1 / W) \sum_w f_w$. Если $W < 3$, подбаллу стабильности в коде присваивается фиксированное промежуточное значение 50 (неполная наблюдаемость по неделям). При $W \geq 3$ считается стандартный коэффициент вариации ряда $\{f_w\}$: $CV = \sigma / \bar{f}$ при $\bar{f} > 0$, где σ – выборочное стандартное отклонение долей f_w ; при нулевом $\bar{f}$ коэффициент вариации полагается нулем. Подбалл стабильности:

$$S_{\text{стаб}} = 100 \cdot \max(0, \min(1, 1 - \min(1, CV))),$$

то есть при $CV = 0$ получается 100, при $CV \geq 1$ – 0, между – линейное сжатие на отрезке.

6) **Итоговый балл.** По умолчанию веса подбаллов $w_{\text{стр}} = 0,20$, $w_{\text{рек}} = 0,20$, $w_{\text{кон}} = 0,25$, $w_{\text{охв}} = 0,20$, $w_{\text{стаб}} = 0,15$ (сумма равна 1).

Итог:

$$S_{\text{итог}} = w_{\text{стр}} \cdot S_{\text{стр}} + w_{\text{рек}} \cdot S_{\text{рек}} + w_{\text{кон}} \cdot S_{\text{кон}} + w_{\text{охв}} \cdot S_{\text{охв}} + w_{\text{стаб}} \cdot S_{\text{стаб}},$$

в отчете значение округляется до двух десятичных знаков. Пользователю одновременно показываются веса и развернутая формула в текстовом виде.

7) **Элементы с низкой вовлеченностью** (для списка в отчете, не отдельный подбалл в сумме). Для видимого элемента с идентификатором экземпляра модуля считается v – число различных студентов когорты с чтениями в контексте элемента за период. Доля вовлеченности элемента $g = v / N$ при $N \geq 1$; в коде для знаменателя при подготовке списков используется $\max(1, N)$, чтобы избежать деления на ноль при пустой когорте. В перечень «низкая вовлеченность» попадают элементы с $g \leq 0,05$, тип «метка» исключается. Группировка – по типу модуля, внутри группы – сортировка по возрастанию g .

Сохранение отчета и программный контур

Результат расчета записывается в таблицу `local_coursequality_report`: идентификатор курса, пользователь, запустивший оценку, время создания, суммарный балл, $S_{\text{итог}}$ и текстовое поле с сериализованным набором промежуточных величин в формате JSON для отображения без повторного обхода журнала.

Пользовательский сценарий в курсе: форма выбора дат, проверка параметров, вызов вычислителя, запись строки, перенаправление на страницу просмотра отчета. Реализованы список отчетов по курсу, просмотр и удаление с контролем прав.

Доступ и административные сценарии

Доступ к инструменту внутри курса выстроен на возможностях Moodle. Преподаватель с правом редактирования курса определяется по назначению роли «Преподаватель» либо по числовому идентификатору роли 3 в стандартной поставке. Администратор сайта или пользователь с правом `local/coursequality:manage` может открыть инструмент без зачисления в курс как редактирующий преподаватель.

Запуск оценки в курсе требует права `local/coursequality:evaluate` в контексте курса, за исключением сценария для пользователей с правом управления на уровне сайта, где проверка сформулирована отдельно. Ссылка на инструмент добавляется в ветку настроек курса. Для институционального обхода предусмотрены внешняя административная страница со списком отчетов и страница массового запуска оценки по списку курсов с теми же правилами дат.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках выполненной работы результатом является развернутый на платформе Moodle программный модуль с устойчивым сценарием использования и сохранением снимков расчета в базе данных. Ниже последовательно показаны экранные формы, соответствующие основным действиям пользователя. Скриншоты сняты на демонстрационной установке Moodle с включенным стандартным журналом событий.

После установки модуля пользователю с подходящими правами в настройках курса (раздел «Дополнительно» / меню «шестеренки» в зависимости от темы (рис. 1)) доступна

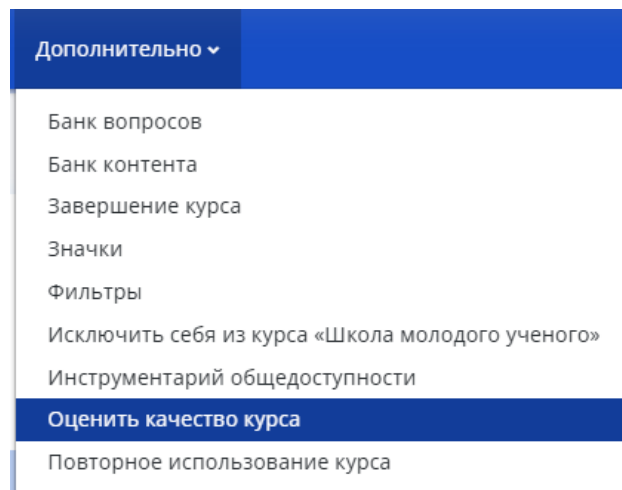


Рис. 1. Фрагмент меню настроек курса с пунктом перехода к модулю оценки качества курса

Примечание: составлено авторами.

отдельная ссылка на инструмент оценки курса. Имеет смысл проиллюстрировать место входа, чтобы читатель видел, что инструмент встроен в привычную навигацию Moodle, а не вынесен на сторонний сайт.

На странице модуля (рис. 2) внутри курса отображаются заголовок, при необходимости – таблица ранее сохраненных отчетов (дата создания, итоговый балл, действия просмотра и удаления) и блок запуска новой оценки с полями выбора даты начала и окончания периода и кнопкой отправки формы.

Оценка качества курса

Сохранённые отчёты

Сформирован	Балл
понедельник, 13 апреля 2026, 10:45	45,67

Оценка курса

с 13.04.2026 по 13.04.2026

Оценить курс

Рис. 2. Страница модуля в курсе: список сохраненных отчетов и форма выбора периода для новой оценки

Примечание: составлено авторами.

После успешного расчета пользователь перенаправляется на страницу просмотра отчета (рис. 3). В верхней части выводится итоговый балл, текст с формулой взвешенной суммы и пять подбаллов с краткими пояснениями

смысла каждого показателя. Ниже строкой собраны служебные сведения: выбранный период в формате день.месяц.год, число студентов в когорте, число видимых элементов и отметка о доступности таблицы стандартного журнала.

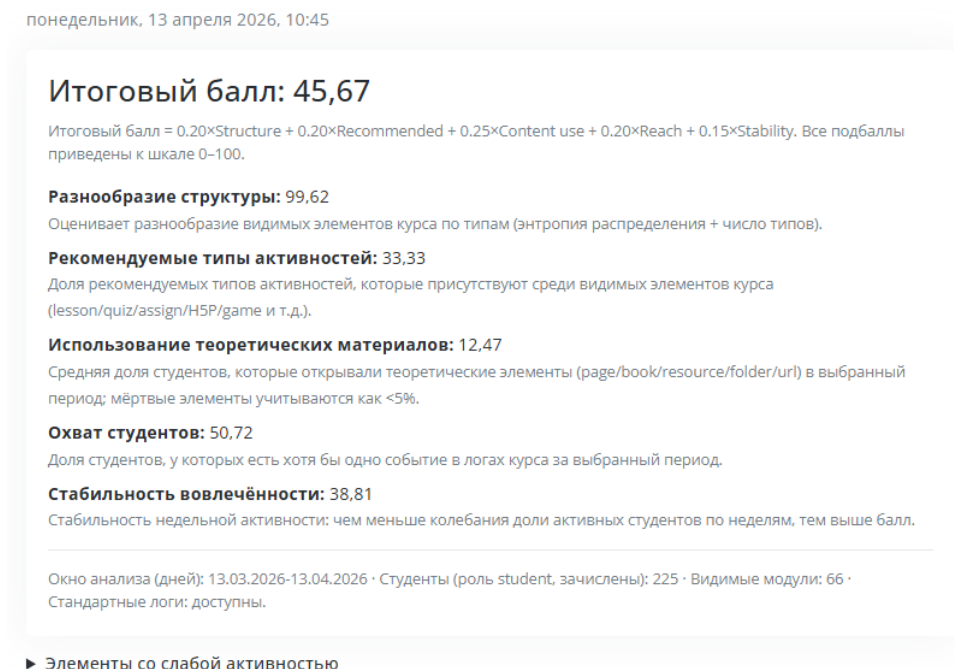


Рис. 3. Фрагмент отчета: итоговый балл, формула, подбаллы и пояснения к ним

Примечание: составлено авторами.

Дополнительный блок отчета (рис. 4) свернут по умолчанию и раскрывается по заголовку. Внутри приведена подсказка о пороге низкой вовлеченности в процентах и вложенные сворачиваемые группы по типам модулей

с перечнем элементов, долей касаний и ссылками на активности.

Для институционального сценария реализованы страницы администрирования на уровне сайта (рис. 5). На странице списка отображаются

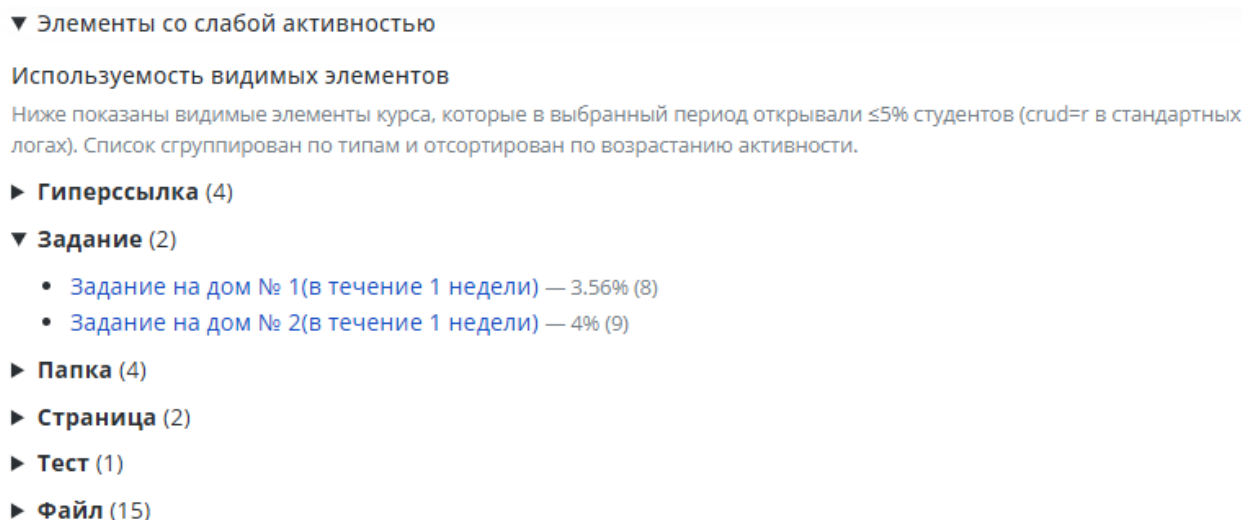


Рис. 4. Раскрытый блок отчета: элементы с низкой долей обращений, сгруппированные по типу модуля

Примечание: составлено авторами.

Массовая оценка				
Все отчёты				
Сформирован	Курс	Пользователь	Балл	
понедельник, 13 апреля 2026, 10:45	Курс 1	Гросу Адриан	45,67	 
четверг, 9 апреля 2026, 15:24	Курс 2	Гросу Адриан	44,91	 

Рис. 5. Административная таблица сохраненных отчетов по сайту
Примечание: составлено авторами.

последние записи с указанием курса, пользователя, запустившего оценку, балла и тех же действий просмотра и удаления. Отдельная страница массового запуска (рис. 6) позволяет задать

категории курсов и/или список идентификаторов курсов и по отправке формы последовательно создать отчеты для ограниченного числа курсов за один проход.

Все отчёты

Массовая оценка

Категории (Ctrl/Cmd — несколько)

!Разное

КПК 2024

XV Международный IT-Форум

Цифровая кафедра

Программирование и базы данных

Управление цифровой информацией в физической культуре и спорте

HR-аналитика

Цифровой маркетинг

1С Кадровое делопроизводство в организации и его администрирование

Цифровая дидактика

Дизайн визуальных коммуникаций

Цифровая химия

Основы применения цифровых технологий в правовых экосистемах

Цифровая трансформация процессов техносферной безопасности

Цифровые технологии в здравоохранении

☐ Включать подкатегории

Или выберите курсы точноно

Курсы (id через запятую, опционально):

11099, 2837

Оценить курсы в выбранных категориях

Рис. 6. Страница массового запуска оценки по категориям и/или списку идентификаторов курсов
Примечание: составлено авторами.

Все описанные метрики и веса выводятся пользователю в читаемом виде, период анализа в курсе задается явно и отображается в отчете, низкая вовлеченность по элементам представлена структурированно, а административный контур дополняет сценарий преподавателя без дублирования кода расчета.

Полученный инструмент решает узкую, но часто воспроизводимую задачу: сопоставить задуманную структуру курса с тем, что видно в стандартном журнале событий за выбранный период, и выдать результат

в виде чисел, явной формулы и списка элементов с низкой долей обращений. Такой результат уместно трактовать как диагностику использования и согласованности структуры с наблюдаемой активностью, а не как оценку педагогического эффекта или усвоения материала. Эта граница совпадает с общепринятым выводом в работах по обучающей аналитике: поведенческие следы в LMS полезны для мониторинга и ранних сигналов, но плохо подменяют экспертную оценку дизайна курса и итогов обучения.

Сильная сторона предложения в том, что расчет воспроизводим: одни и те же входные данные и период дают один и тот же отчет, который можно сохранить и вернуться к нему позже. Для преподавателя это опора при самопроверке: какие опорные элементы действительно «прогреваются» студентами, а какие остаются на периферии внимания в выбранном окне. Для администратора добавлен отдельный контур обзора и массового запуска без необходимости зачислять учетную запись в каждый курс как редактирующего преподавателя, что снижает административное трение при обходе каталога.

Ограничения следует формулировать прямо: в качестве прокси «обращения к элементу» используются чтения в контексте модуля – это близко к факту показа страницы активности, но не различает поверхностный просмотр и работу с содержанием. Также когорта студентов определяется через зачисление и роль «Студент», при нестандартной политике ролей или зачислений через метакурсы доля студентов и, следовательно, знаменатели долей могут смещаться. Веса и пороги нормирования заданы автором и не калибровались в данной работе по выборке курсов с внешней разметкой качества. Смена весов изменит итог без изменения фактических логов. Чувствительность к настраиваемой длине периода: короткое окно занижает охват и стабильность, слишком длинное смешивает разные фазы семестра.

Сопоставление с практикой разработки аналитики в Moodle показывает, что типичные решения либо ограничиваются дашбордами без жесткой привязки к «одному числу на курс», либо уходят во внешние хранилища [10]. Локальный модуль с собственной таблицей отчетов и явной формулой итога занимает промежуточное положение: меньше

универсальности, зато больше прозрачности для пользователя, который не является аналитиком данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы была связана не с проверкой гипотезы об улучшении обучения после внедрения инструмента, а с созданием и описанием программного средства, которое переводит структуру курса и журнал событий в сохраняемый отчет с интерпретируемыми баллами. Задачи по формализации входных данных, расчету метрик, разграничению доступа преподавателя и администратора, а также выводу детализации по элементам курса выполнены в объеме реализованного модуля.

Итоговый вклад можно сформулировать так: предложена связка метрик и правил фильтрации журнала, реализованная как расширение Moodle с двумя сценариями использования; пользователю выдается не только итоговый балл, но и пояснения, формула, период, размер когорты и структурированный перечень слабых по доле обращений элементов с исключением декоративных меток.

Направления дальнейшей работы выглядят естественно из перечня ограничений: вынесение весов и порогов в настройки установки, расширение набора событий или источников данных при сохранении понятности, а также пилотное сопоставление отчетов с экспертными рубриками или внутренними рейтингами курсов на ограниченной выборке, если понадобится эмпирическая валидация. Для практики уже на текущем уровне достаточно использовать инструмент как средство самодиагностики и внутреннего аудита при явной трактовке показателей как использования, а не качества обучения в широком смысле.

Список источников

1. Romero C., Ventura S. Educational data mining and learning analytics: An updated survey // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2020. Vol. 10, no. 3. <https://doi.org/10.1002/widm.1355>.

References

1. Romero C., Ventura S. Educational data mining and learning analytics: An updated survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2020;10(3). <https://doi.org/10.1002/widm.1355>.

2. Тербушева Е. А., Пиотровская К. Р. Аналитический потенциал платформы Moodle для мониторинга качества персонифицированного обучения // Общество. Коммуникация. Образование. 2021. Т. 12, № 4. С. 19–34. <https://doi.org/10.18721/JHSS.12402>.
3. Шаимов Н. Д., Ломазова И. А., Мицюк А. А. и др. Анализ академической успеваемости студентов с использованием журналов событий электронной образовательной среды // Моделирование и анализ информационных систем. 2022. Т. 29, № 4. С. 286–314. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2022-4-286-314>.
4. Карманова Е. В., Захарова Я. М., Киселев А. В. Интеллектуальный анализ образовательных результатов студентов университета с использованием LMS Moodle // Информатика и образование. 2024. Т. 39, № 3. С. 16–28. <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2024-39-3-16-28>.
5. Pan Z., Biegley L., Taylor A. et al. A systematic review of learning analytics: Incorporated instructional interventions on learning management systems // Journal of Learning Analytics. 2024. Vol. 11, no. 2. P. 52–72. <https://doi.org/10.18608/jla.2023.8093>.
6. Aljohani N. R., Daud A., Abbasi R. A. et al. An integrated framework for course adapted student learning analytics dashboard // Computers in Human Behavior. 2019. Vol. 92. P. 679–690. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.035>.
7. López-Zambrano J., Lara J. A., Romero C. Towards portability of models for predicting students' final performance in university courses starting from Moodle logs // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 1. <https://doi.org/10.3390/app10010354>.
8. Bodily R., Verbert K. Review of research on student-facing learning analytics dashboards and educational recommender systems // IEEE Transactions on Learning Technologies. 2017. Vol. 10, no. 4. P. 405–418. <https://doi.org/10.1109/TLT.2017.2740172>.
9. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27, no. 3. P. 379–423.
10. Prinsloo P., Slade S., Khalil M. The answer is (not only) technological: Considering student data privacy in learning analytics // British Journal of Educational Technology. 2022. Vol. 53, no. 4. P. 876–893. <https://doi.org/10.1111/bjet.13216>.
2. Terbusheva E. A., Piotrowska X. R. Analytical potential of the LMS Moodle for monitoring the quality of personification. *Society. Communication. Education*. 2021;12(4):19–34. <https://doi.org/10.18721/JHSS.12402>. (In Russ.).
3. Shaimov N. D., Lomazova I. A., Mitsyuk A. A. et al. Analysis of students' academic performance using LMS event logs. *Modeling and Analysis of Information Systems*. 2022;29(4):286–314. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2022-4-286-314>. (In Russ.).
4. Karmanova E. V., Zakharova Ya. M., Kiselev A. V. Educational data mining in a university using LMS Moodle. *Informatics and Education*. 2024;39(3):16–28. <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2024-39-3-16-28>. (In Russ.).
5. Pan Z., Biegley L., Taylor A. et al. A systematic review of learning analytics: Incorporated instructional interventions on learning management systems. *Journal of Learning Analytics*. 2024;11(2):52–72. <https://doi.org/10.18608/jla.2023.8093>.
6. Aljohani N. R., Daud A., Abbasi R. A. et al. An integrated framework for course adapted student learning analytics dashboard. *Computers in Human Behavior*. 2019;92:679–690. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.035>.
7. López-Zambrano J., Lara J. A., Romero C. Towards portability of models for predicting students' final performance in university courses starting from Moodle logs. *Applied Sciences*. 2020;10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010354>.
8. Bodily R., Verbert K. Review of research on student-facing learning analytics dashboards and educational recommender systems. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2017;10(4):405–418. <https://doi.org/10.1109/TLT.2017.2740172>.
9. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*. 1948;27(3):379–423.
10. Prinsloo P., Slade S., Khalil M. The answer is (not only) technological: Considering student data privacy in learning analytics. *British Journal of Educational Technology*. 2022;53(4):876–893. <https://doi.org/10.1111/bjet.13216>.

Информация об авторах

А. Гросу – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0004-5520-6708>,
grosu_a@surgu.ru ✉
А. И. Гросу – магистрант;
<https://orcid.org/0009-0001-7371-4931>,
grosu_ai@edu.surgu.ru

About the authors

A. Grosu – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0004-5520-6708>,
grosu_a@surgu.ru ✉
A. I. Grosu – Master's Degree Student;
<https://orcid.org/0009-0001-7371-4931>,
grosu_ai@edu.surgu.ru

Научная статья

УДК 621.382

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-4>



Влияние формы корпуса и расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения

Иван Николаевич Жаданов, Александр Алексеевич Швачко✉

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

Аннотация. В статье рассматривается влияние формы корпуса и расстановки полупроводниковых гетероструктур на эффективность охлаждения оптоэлектронных устройств. Проанализировано, каким образом геометрия корпуса и компоновка активных элементов определяют пути теплового потока, формирование локальных перегревов и величину температурных перепадов. Проведено сравнение различных конструктивных решений с точки зрения равномерности температурного поля и способности к рассеянию тепла. Показано, что даже при использовании одинаковых материалов рациональная форма корпуса и оптимальное расположение гетероструктур позволяют существенно повысить эффективность теплоотвода и стабильность работы устройств.

Ключевые слова: гетероструктуры, светодиоды, температура, нагрев гетероструктур, корпус, форма корпуса

Для цитирования: Жаданов И. Н., Швачко А. А. Влияние формы корпуса и расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 42–51. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-4>.

Original article

Effect of heterostructure configuration and shape design on cooling performance

Ivan N. Zhadanov, Alexandr A. Shvachko✉

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Abstract. The article examines the influence of the semiconductor heterostructures' configuration and shape design on the cooling performance of optoelectronic devices. The authors investigate how the heat sink geometry and the active elements' arrangement define the heat flow paths, local overheating, and the temperature fluctuation magnitude. In terms of temperature field uniformity and heat dissipation capability, the paper compares various structural alternatives. It is confirmed that the optimal shape design and layout of the heterostructure components significantly improve the heat dissipation and the stability of the specified devices despite using the same materials.

Keywords: heterostructures, light-emitting diode (LED) lamps, temperature, heterostructure heating, shape, shape design

For citation: Zhadanov I. N., Shvachko A. A. Effect of heterostructure configuration and shape design on cooling performance. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):42–51. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-4>.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием электроники выделяемое тепло концентрируется все сильнее – это давит на возможности отвода энергии.

В оптоэлектронике ситуация усугубляется: там даже небольшие перепады температур способны менять поведение приборов [1, 2]. Полупроводниковые гетероструктуры,

например, начинают работать нестабильно, если нагревается лишь один участок кристалла. Уменьшение размеров чипов только усиливает эффект – старые методы охлаждения уже не справляются [3]. Приходится детально просчитывать, как тепло распространяется внутри корпуса, где находятся горячие зоны и как они взаимодействуют с окружающими слоями. Конструкция упаковки теперь играет ключевую роль, ведь она формирует путь для теплового потока [4]. Без учета этих факторов даже самый продуманный дизайн может потерять в долговечности.

Влияет ли форма оболочки прибора – зависит не только от дизайна, но и от того, как внутри движется тепло. Путь энергии сквозь конструкцию во многом задается контурами самого кожуха: они управляют тем, насколько легко воздух омывает поверхность [5]. От этого напрямую зависит, успеет ли система рассеивать избыточный жар. Внутри же положение слоистых соединений меняет картину нагрева в малых областях чипа. Эти участки начинают мешать друг другу, если расположены тесно или асимметрично [6]. Перегрев возникает там, где горячие точки накладываются случайным образом. Даже отличные материалы для радиатора бессильны, когда компоновка создает «бутылочные горлышки» для теплового потока [7].

Современные вычислительные подходы дают возможность досконально изучать тепловые явления еще до начала создания физического образца – это снижает потребность в лабораторных испытаниях. Расчеты, основанные на аналитике или частично на опытных данных, выполняются в специализированном ПО и помогают определить уровень теплового сопротивления, разницу температур и энергетическое поведение гетероструктур под разными нагрузками. Трехмерная модель передачи тепла учитывает форму корпуса, особенности состава материалов и условия отвода тепла, что делает возможным четкую визуализацию того, как именно распределяется тепло по элементам [8].

Целью данной статьи является исследование влияния формы корпуса и геометрии расстановки гетероструктур на подложке на эффективность системы их охлаждения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы понять, как тепло распространяется внутри оптоэлектроники, используют не только расчеты, но и физические испытания. Зачастую выбирают моделирование методом конечных элементов: оно помогает глубоко проникнуть в процессы передачи тепла даже при сложной форме устройств, если делить объект на мелкие части и отдельно просчитывать законы теплопроводности. Это открывает путь к учету реальных форм корпуса, характеристик веществ и разных условий на поверхностях, например теплообмена с воздухом или излучения. Картина распределения температур становится почти понятной, можно заранее заметить места, которые могут перегреться, однако на качество расчета влияют начальные данные и точность разбивки сетки.

С помощью контактных датчиков, например термопар или терморезисторов, удастся точно замерять температуру прямо во время работы устройств. Хотя такие способы давно используют для верификации компьютерных моделей, они не лишены недостатков: данные собираются лишь в отдельных точках, а сами датчики могут мешать естественному нагреву, особенно если речь идет о крошечных деталях. Тепловизоры же работают без физического контакта, показывая картинку нагрева всей поверхности сразу, причем почти моментально. Такой подход отлично подходит, чтобы быстро находить горячие участки и понимать, насколько равномерно греется изделие. С другой стороны, точность этих данных сильно зависит от того, насколько хорошо поверхность излучает тепло.

В настоящей работе исследуется влияние формы корпуса и вариантов расстановки гетероструктур на эффективность охлаждения электронного устройства. Были проведены аналитические расчеты температурных

характеристик, а также численное моделирование тепловых процессов методом конечных элементов. Проведено сравнение различных геометрических конфигураций корпуса и схем размещения гетероструктур с точки зрения максимальной рабочей температуры и равномерности температурного поля. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по оптимизации конструкции корпуса и размещению гетероструктур с целью повышения эффективности охлаждения и улучшения эксплуатационных характеристик устройств [9].

Изменение температуры гетероструктуры осуществлялось согласно выражению:

$$\Delta T = R_t s j \left(R_0 j^2 + \frac{\eta' h \nu}{e} \right), \quad (1)$$

где ΔT – **нагрев активной области**; R_t – тепловое сопротивление (этот коэффициент показывает, насколько эффективно устройство рассеивает тепло); s – площадь контакта; J – плотность тока накачки; R_0 – удельное сопротивление материала; η' – **эффективность инжекции** (показывает, какая доля носителей тока успешно попадает в активную область); $h\nu$ – энергия фотона; e – элементарный заряд электрона.

В качестве гетероструктуры была выбрана GaInAs – она обладает хорошими оптическими, так и производственными свойствами. Прямая зона проводимости делает перераспределение зарядов более продуктивным процессом, благодаря чему световое излучение формируется эффективнее. Длина волны зависит от содержания индия в составе материала. Изменяя пропорции, можно настраиваться точно на нужный участок спектра [10]. Работает лучше всего там, где начинается инфракрасное излучение. Субстраты из InP подходят для выращивания GaInAs без возникновения внутренних напряжений. Благодаря подгонке параметров по кристаллической решетки количество дефектов заметно снижается. Устройства на базе гетеропереходов удерживают электроны там, где это нужно больше всего. Потери от побочных процессов

становятся меньше – работа прибора получается надежнее. Технологии осаждения тонких пленок легко работают с этим соединением. Все эти особенности вместе приводят к одному: эффективность светодиодов на основе GaInAs оказывается особенно высока [11].

В качестве материала радиатора выбран алюминиевый сплав 6061 – один из наиболее распространенных конструкционных сплавов для теплотехнических задач. Его теплопроводность находится на уровне ~ 170 Вт/(м·К), что достаточно для эффективного отвода тепла от активной области. При этом материал остается легким: плотность около 2700 кг/м³ позволяет не увеличивать массу конструкции. Отдельно стоит отметить теплоемкость – порядка 900 Дж/(кг·К). Благодаря этому радиатор не так резко реагирует на кратковременные тепловые нагрузки, сглаживая температурные колебания. В реальных условиях это снижает риск локального перегрева. С механической точки зрения сплав также удобен: он достаточно прочен, хорошо держит форму и не деформируется при умеренных температурах. Это важно для сохранения стабильного теплового контакта с гетероструктурой. Химические свойства определяются наличием естественной оксидной пленки на поверхности. Она защищает материал от коррозии без дополнительных покрытий. При необходимости поверхность можно анодировать – тогда возрастает излучательная способность, а вместе с ней и вклад лучистого теплообмена.

Алюминиевый сплав 6061 – обладает высокой теплопроводностью. Благодаря этому диоды не перегреваются в работе. Легкий вес сочетается с хорошей теплопередачей, так что радиатор остается компактным. Материал характеризуется высокой механической прочностью и жесткостью, обеспечивая надежное крепление светодиодов. Надежность конструкции зависит от твердости материала. Он часто встречается на заводах, поэтому цена остается приемлемой. Ржавчине почти не подвержен, значит, прослужит долго без потери качества. Тепловые характеристики не ухудшаются даже при нагреве, которого стоит

ожидать от мощных LED-ламп. Благодаря таким характеристикам он отлично работает как основа для охлаждения светодиодов [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве варьируемого параметра был выбран ток I , определяющий электрический и тепловой режим работы светодиода. Значение тока изменялось восемь раз в диапазоне от 0,4 до 0,8 А с шагом 0,05 А, что соответствует реальным условиям эксплуатации прибора. Для каждого значения тока производился расчет температурного приращения при фиксированных значениях остальных параметров модели. Полученные результаты были автоматически обработаны и представлены в графическом виде. Анализ результатов позволяет оценить зависимость температуры светодиода от величины протекающего тока.

Численное моделирование процессов нагрева и охлаждения радиатора было выполнено методом конечных элементов. В модели учитывалась реальная геометрия корпуса радиатора, а также материал радиатора – алюминиевый сплав 6061 с заданными теплофизическими характеристиками. В качестве источника тепла задавалась тепловая мощность, выделяемая светодиодными гетероструктурами, рассчитанная на основе аналитических зависимостей. Теплоотвод в окружающую среду моделировался с учетом естественной конвекции и теплового излучения с поверхности радиатора [13].

На рис. 1 представлена зависимость температуры гетероструктуры от величины протекающего тока, рассчитанная по формуле (1).

Данные рис. 1 позволяют провести сравнительный анализ тепловых режимов при различных значениях тока. Из рисунка видно, что с увеличением тока температура возрастает практически линейно.

Симуляция нагрева проводилась в нестационарном режиме, что позволило проанализировать динамику роста температуры радиатора во времени до установившегося состояния. Для оценки эффективности теплоотвода дополнительно была выполнена симуляция

процесса охлаждения после отключения тепловой нагрузки. В ходе моделирования были получены распределения температурных полей и тепловых потоков для различных форм корпуса и вариантов расстановки гетероструктур [14]. Результаты симуляции позволили выявить зоны максимального перегрева и оценить влияние геометрии радиатора на скорость нагрева и охлаждения. В таблице 1 приведены данные максимальной и минимальной температуры структуры и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе. На рис. 2 приведены данные расчета для радиатора типа «звезда».

Диапазон температур для последующего анализа выбран в пределах 315–367 К на основе результатов численного моделирования. Данные значения соответствуют минимальной и максимальной температуре, полученной в области гетероструктуры при заданных граничных условиях и уровне тепловой нагрузки.

Нижняя граница диапазона характеризует зоны с наиболее интенсивным теплоотводом и близка к температуре охлаждающей среды, тогда как верхняя граница отражает области с максимальной концентрацией тепловыделения вблизи активной части структуры.

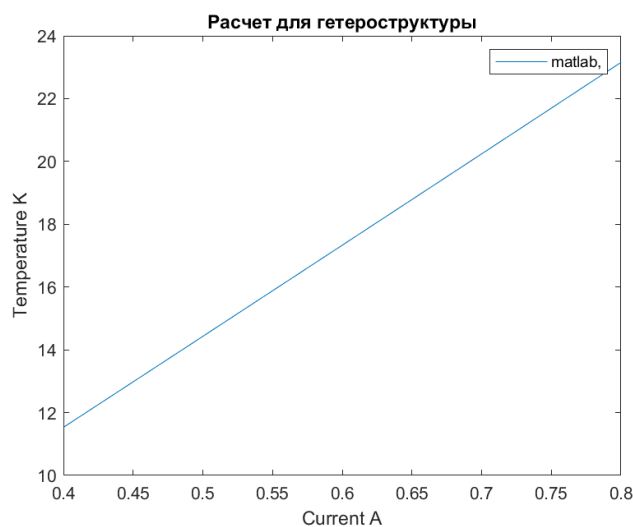


Рис. 1. Зависимость температуры гетероструктуры от величины протекающего тока

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

Такой выбор шкалы позволяет корректно отобразить распределение температуры и сохранить различимость локальных температурных особенностей, что обеспечивает последующий анализ температурных полей и сравнение эффективности различных конструкций радиаторов.

На рис. 2 видно хорошее охлаждение кристалла формой радиатора типа «звезда». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты остаются холодными, что говорит о равномерном охлаждении гетероструктуры.

Таблица 1

Результат расчета и симуляции для радиатора типа звезда

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	338,52	344,44	350,41	356,43	362,51	368,65	374,85	381,11	387,42
	Min	322,08	325,69	329,29	332,90	336,50	340,11	343,72	347,32	350,93

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

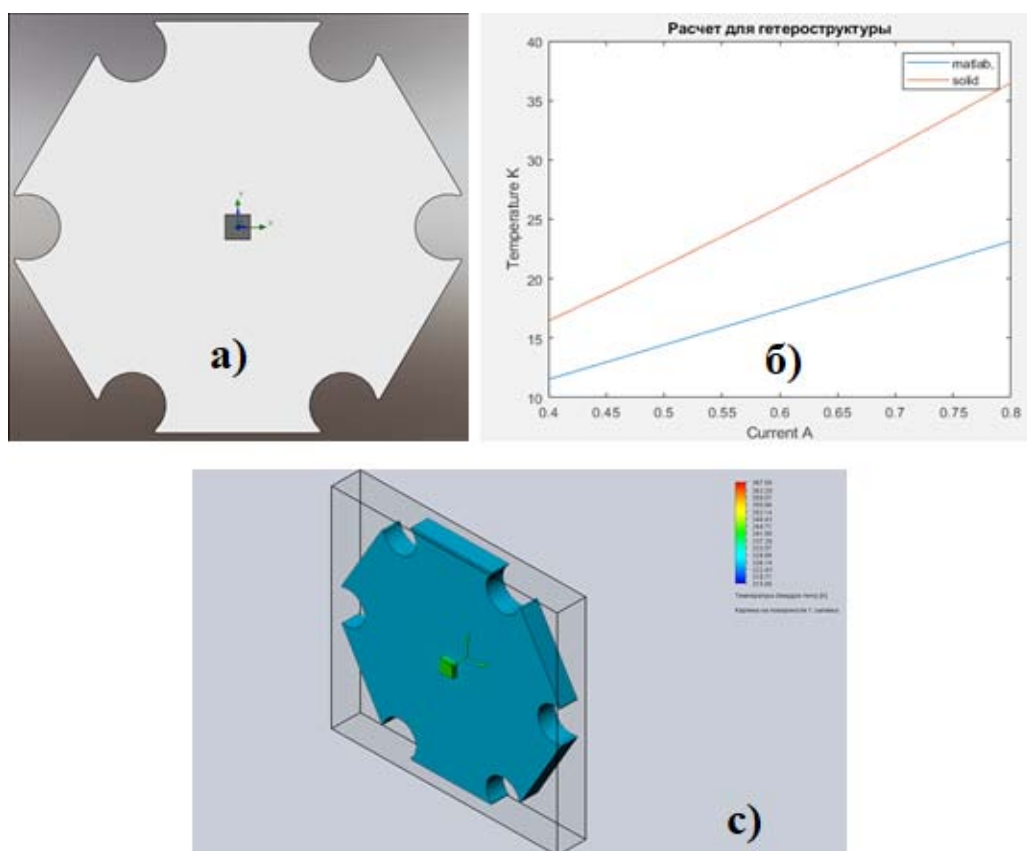


Рис. 2. а – радиатор типа «звезда»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности

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

В табл. 2 приведены данные максимальной и минимальной температур структуры и радиатора для расчета методом конечных элементов

в диапазоне изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа квадрат. На рис. 3 приведены данные расчета для радиатора типа квадрат.

Таблица 2

Результат расчета и симуляции для радиатора типа квадрат

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	361,33	370,26	379,29	388,40	397,60	406,78	415,94	424,88	433,66
	Min	343,48	349,76	356,05	362,33	368,61	374,89	381,17	387,46	393,74

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

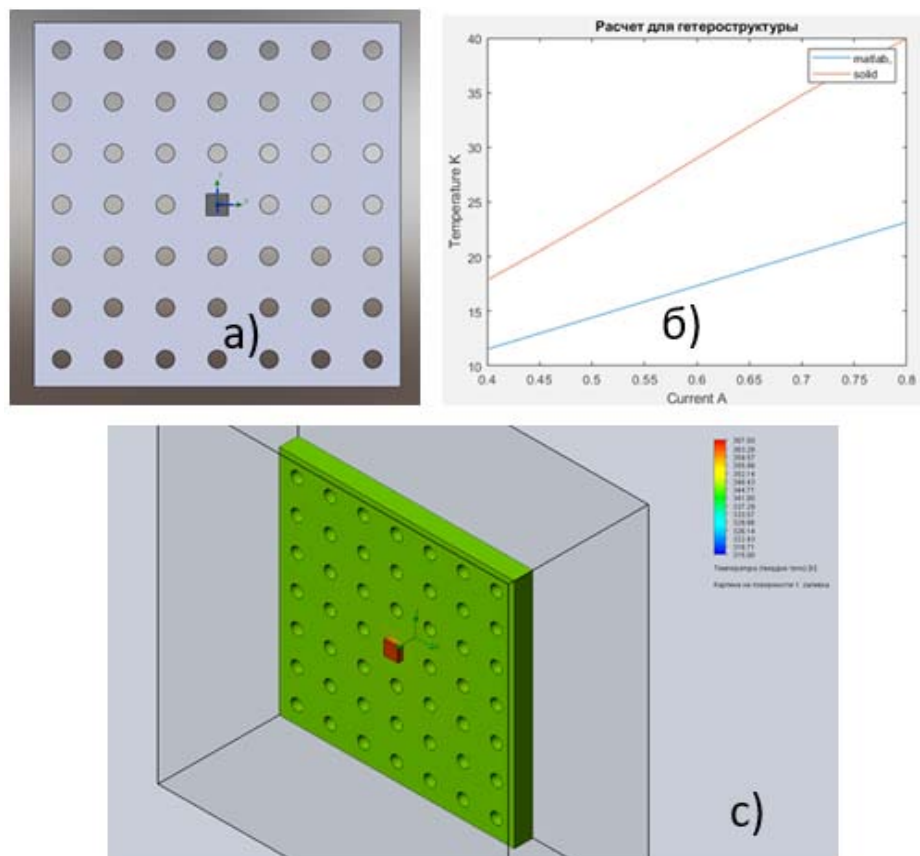


Рис. 3. а – радиатор типа «квадрат»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; в – картина температуры на поверхности
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 3 видно низкое охлаждение кристалла формой радиатора типа «квадрат». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты более теплые, что говорит о более низком охлаждении.

В табл. 3 приведены данные максимальной и минимальной температуры структуры и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа «круг». На рис. 4 приведены данные расчета для радиатора типа «круг».

Таблица 3

Результат расчета и симуляции для радиатора типа «круг»

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	366,72	376,35	386,06	395,86	405,71	415,49	425,15	434,69	444,17
	Min	348,59	355,51	362,43	369,35	376,27	383,19	390,11	397,03	403,95

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

На рис. 4 видно плохое охлаждение кристалла формой радиатора типа «круг». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты очень теплые, что говорит о более плохом охлаждении.

В табл. 4 приведены данные максимальной и минимальной температуры структуры

и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа «ребристый». На рис. 4 приведены данные расчета для радиатора типа «ребристый».

На рис. 5 видно хорошее охлаждение кристалла формой радиатора типа «ребристый». Температурный перепад остается

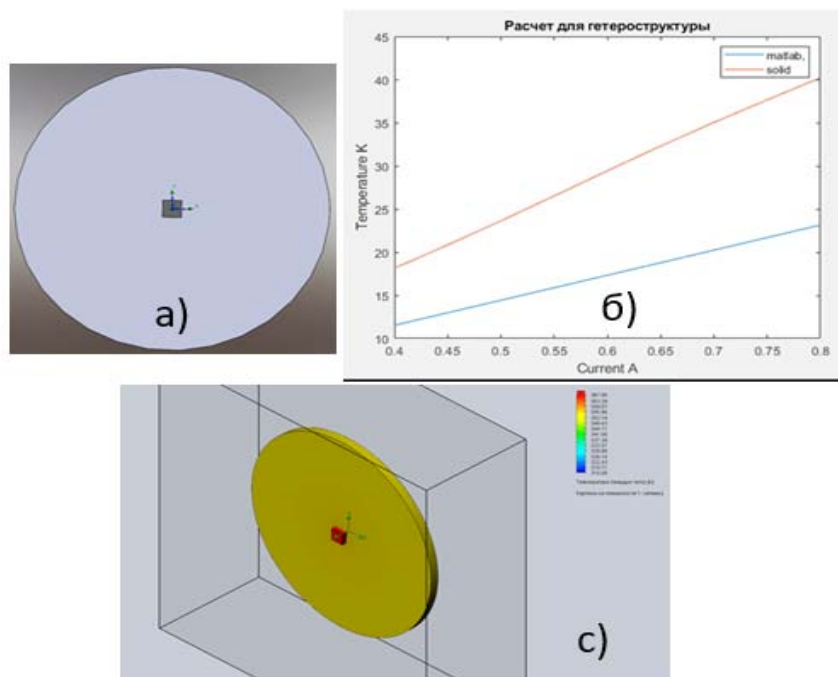


Рис. 4. а – радиатор типа «звезда»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 4

Результат расчета и симуляции для радиатора типа «ребристый»

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	342,82	349,31	355,85	362,46	369,14	375,89	382,70	389,57	396,52
	Min	326,31	330,44	334,58	338,71	342,85	346,98	351,12	355,25	359,39

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

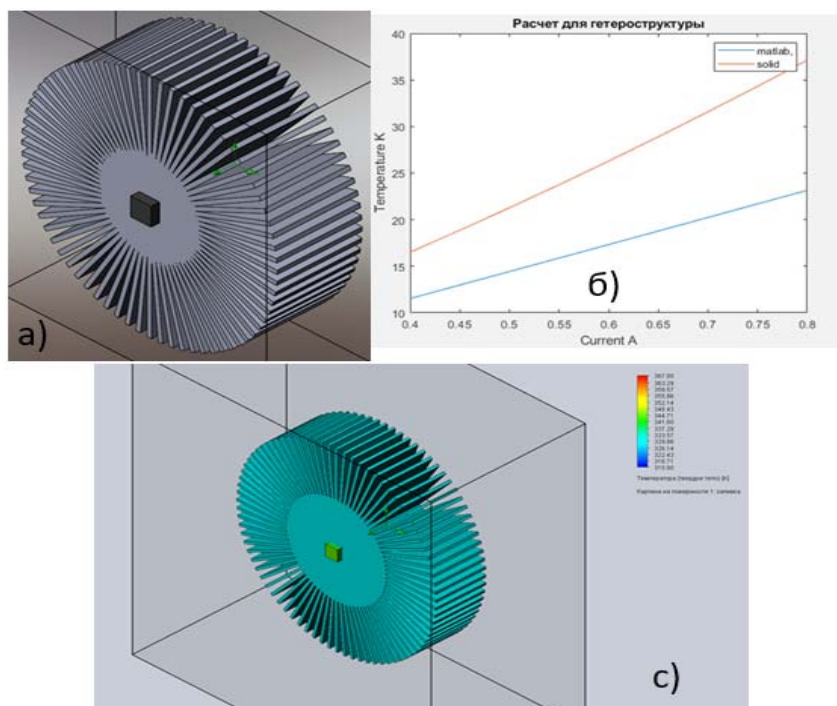


Рис. 5. а – радиатор типа «ребристый»; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

относительно стабильным. Температурные градиенты холодные, что говорит о хорошем охлаждении.

В табл. 5 приведены данные о максимальной и минимальной температуре структуры

и радиатора для расчета методом конечных элементов для диапазона изменения тока на рабочем элементе для радиатора типа «трубчатый». На рис. 6 приведены данные расчета для радиатора типа «трубчатый».

Таблица 5

Результат расчета и симуляции для радиатора типа «трубчатый»

Ток, А		0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
Т, К	Max	339,99	346,11	352,27	358,50	364,79	371,14	377,56	384,04	390,57
	Min	323,45	327,22	331,00	334,78	338,56	342,34	346,11	349,89	353,67

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

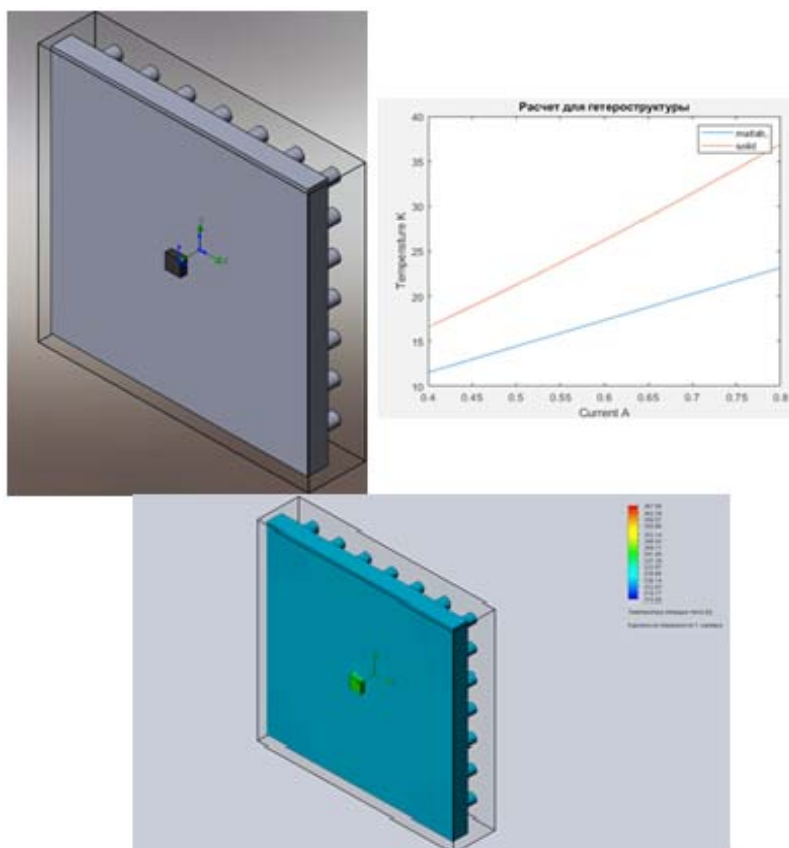


Рис. 6. а – радиатор типа трубчатый; б – результаты расчета изменения температуры и сравнение с результатами аналитического метода; с – картина температуры на поверхности

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

На рис. 6 видно хорошее охлаждение кристалла формой радиатора типа «трубчатый». Температурный перепад остается относительно стабильным. Температурные градиенты холодные, что говорит о хорошем охлаждении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе исследование было направлено на анализ влияния формы корпуса

на эффективность теплоотвода в светодиодных приборах. Полученные результаты показали, что решающую роль играет не только материал радиатора, но и его геометрия: именно форма корпуса во многом определяет максимальный уровень нагрева кристалла и характер распределения тепла внутри конструкции. Наилучшие тепловые характеристики продемонстрировали радиаторы звездчатой, трубчатой и ребристой формы,

обеспечивающие развитую поверхность теплообмена и более равномерное распространение тепловых потоков.

Радиатор типа «круг» является наименее эффективным с точки зрения охлаждения гетероструктуры. Несмотря на сравнительно большую площадь основания, такая конструкция характеризуется недостаточно развитой поверхностью теплоотдачи и ограниченными условиями естественной конвекции. Отсутствие ребер и направляющих элементов приводит к формированию застойных зон воздуха вблизи поверхности радиатора, что снижает интенсивность теплообмена с окружающей средой.

Установлено, что конструкции с увеличенной площадью поверхности за счет ребер, каналов и выступов значительно эффективнее отводят тепло, что выражается в снижении температурного перепада между активной областью и внешней поверхностью радиатора. Это связано с улучшенными условиями теплопроводности внутри материала, а также с более интенсивным естественным конвективным теплообменом с окружающей средой. В отличие от них, компактные или геометрически упрощенные корпуса склонны к накоплению тепла вблизи зон максимальной тепловой нагрузки, что приводит к формированию локальных перегревов.

В рассматриваемой области нельзя выделить одну универсальную «эталонную» конструкцию, которая бы использовалась как стандарт для всех задач. Однако на практике чаще всего ориентируются на несколько типовых решений: плоские радиаторы, радиаторы с продольными ребрами, а также конструкции с развитой радиальной или звездчатой геометрией. Именно такие варианты обычно принимаются за базу при сравнении,

поскольку они хорошо изучены и широко применяются в светодиодной технике. При сопоставлении с ними видно, что упрощенные формы корпуса уступают не столько из-за материала, сколько из-за характера распределения тепла. В типовых конструкциях тепло быстрее уходит от центра к периферии и эффективнее передается в окружающую среду, тогда как в более гладких формах оно задерживается вблизи источника. Связь между формой корпуса и расположением гетероструктур проявляется достаточно явно. Если активные элементы сгруппированы в одной зоне, даже удачная геометрия радиатора не всегда компенсирует локальный перегрев. И наоборот, при более равномерной расстановке гетероструктур влияние формы корпуса становится менее критичным, поскольку тепловая нагрузка распределяется по всей поверхности. На практике это означает, что рассматривать форму корпуса и компоновку по отдельности не совсем корректно. Они работают совместно: геометрия задает направление отвода тепла, а расположение источников определяет, насколько равномерно это тепло поступает в радиатор.

Различия в температурных перепадах между исследуемыми образцами обусловлены особенностями передачи тепла от рабочей области к радиатору и далее во внешнюю среду. Применение радиаторов оптимальной геометрии позволяет сформировать более равномерное температурное поле, снизить термомеханические напряжения и повысить стабильность работы устройства. Таким образом, сочетание продуманной формы корпуса и рационального размещения гетероструктур обеспечивает эффективное охлаждение и уменьшение нагрева светодиодов в рабочих режимах.

Список источников

1. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепломассообмена. СПб. : Университет ИТМО, 2010. 93 с.
2. Ципина Н. В. Теплофизические процессы в приборах. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2022. 135 с.

References

1. Dulnev G. N., Tikhonov S. V. Osnovy teorii teplomas-soobmena. St. Petersburg: ITMO University; 2010. 93 p. (In Russ.).
2. Tsipina N. V. Teplofizicheskie protsessy v priborakh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2022. 135 p. (In Russ.).

3. Ramesh T., Praveen A. S., Pillai P. B. et al. Numerical simulation of heat sinks with different configurations for high power LED thermal management // *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. 2022. Vol. 13.
4. Jiang B. Research and optimization design of thermal management for LED // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023. Vol. 68. P. 242–246.
5. Zou Y., Xia Y., Ren H. et al. Heat dissipation design and optimization of high-power LED lamps // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. Vol. 37.
6. Li H., Zhu X., Zhang D. et al. Thermal management towards ultra-bright and stable perovskite nanocrystal-based pure red light-emitting diodes // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, no. 1.
7. Ye J., Mo S., Jia L. et al. Experimental performance of a LED thermal management system with suspended microencapsulated phase change material // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 207.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
9. Kononenko V. K., Kuntsevich B. F. Selection of the lasing frequency and heating the quantum-well heterostructure laser diodes // *Proceedings of the 11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, September 5–8, 2011, Kharkov, Ukraine. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
10. Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. San Diego, CA : Academic Press, 2003. 279 p.
11. Coldren L. A., Corzine S. W., Mašanović M. L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2012. 752 p.
12. Pop E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices // *Nano Research*. 2010. Vol. 3, no. 3. P. 147–169.
13. Гришаев В. Я., Никишин Е. В. *Источники и приемники оптического излучения*. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2024. 68 с.
14. Лебедев А. И. *Физика полупроводниковых приборов*. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 488 с.
3. Ramesh T., Praveen A. S., Pillai P. B. et al. Numerical simulation of heat sinks with different configurations for high power LED thermal management. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. 2022;13.
4. Jiang B. Research and optimization design of thermal management for LED. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023;68:242–246.
5. Zou Y., Xia Y., Ren H. et al. Heat dissipation design and optimization of high-power LED lamps. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023;37.
6. Li H., Zhu X., Zhang D. et al. Thermal management towards ultra-bright and stable perovskite nanocrystal-based pure red light-emitting diodes. *Nature Communications*. 2024;15(1).
7. Ye J., Mo S., Jia L. et al. Experimental performance of a LED thermal management system with suspended microencapsulated phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2022;207.
8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013. 756 p.
9. Kononenko V. K., Kuntsevich B. F. Selection of the lasing frequency and heating the quantum-well heterostructure laser diodes. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, September 5–8, 2011, Kharkov, Ukraine. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2011.
10. Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. San Diego, CA: Academic Press; 2003. 279 p.
11. Coldren L. A., Corzine S. W., Mašanović M. L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2012. 752 p.
12. Pop E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices. *Nano Research*. 2010;3(3):147–169.
13. Grishaev V. Ya., Nikishin E. V. *Istochniki i priemniki opticheskogo izlucheniya*. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta; 2024. 68 p. (In Russ.).
14. Lebedev A. I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov*. Moscow: FIZMATLIT; 2008. 488 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И. Н. Жаданов – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0005-8621-1689>,
 zhadanovvv@mail.ru

А. А. Швачко – доцент;
<https://orcid.org/0000-0001-6633-0975>,
 alexandr1899@gmail.com✉

About the authors

I. N. Zhadanov – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0005-8621-1689>,
 zhadanovvv@mail.ru

A. A. Shvachko – Docent;
<https://orcid.org/0000-0001-6633-0975>,
 alexandr1899@gmail.com✉

Научная статья

УДК 004.89+004.62

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-5>



Эволюция алгоритмов управления сложными системами

Дмитрий Юрьевич Зорькин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ эволюции методов управления сложными системами – от классических ПИД-регуляторов к современным подходам на основе обучения с подкреплением (RL, Reinforcement Learning) и глубокого обучения с подкреплением (DRL, Deep Reinforcement Learning). Цель исследования – выявить сильные и слабые стороны различных классов алгоритмов управления и обосновать области их эффективного применения в прикладных задачах (автономное вождение, промышленная автоматизация, энергетика, робототехника). Методология включает систематический обзор 15 научных источников, структурированное сравнение по критериям точности (установившейся ошибки регулирования), устойчивости (к возмущениям и изменению параметров) и адаптивности (способности к самонастройке), анализ численных данных из практических внедрений. Научная новизна состоит в разработке комплексной методики сравнительной оценки классических и интеллектуальных систем управления с количественным обоснованием областей применения: ПИД обеспечивают точность $\pm 1\text{--}3\%$ для линейных объектов, RL $\pm 0,5\text{--}2\%$ с адаптацией за 10–50 итераций, DRL $\pm 0,1\text{--}0,5\%$ при работе с высокоразмерными данными. Основные результаты показывают, что RL/DRL-системы превосходят ПИД по энергоэффективности на 10–40 % (подтверждено на примере управления охлаждением дата-центра Google с экономией 40 %) и адаптивности в динамичных средах, однако требуют значительных вычислительных ресурсов (дни–недели обучения на GPU) и порождают проблемы верифицируемости. Практическая значимость заключается в предоставлении инженерам-проектировщикам АСУ ТП (Автоматизированная Система Управления Технологическим Процессом), обоснованных рекомендаций по выбору типа системы управления с учетом сложности объекта, требований к адаптивности и доступных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: управление сложными системами, ПИД-регулятор, обучение с подкреплением, глубокое обучение, адаптивное управление, автономное вождение, промышленная автоматизация, энергосбережение, робототехника

Для цитирования: Зорькин Д. Ю. Эволюция алгоритмов управления сложными системами // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 52–59. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-5>.

Original article

Evolution of algorithms for managing complex systems

Dmitry Yu. Zorkin

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. The article presents a comparative analysis of the evolution of control methods for complex systems: from classical PID controllers to modern approaches based on Reinforcement Learning (RL) and Deep Reinforcement Learning (DRL). This study aims to pinpoint the strengths and weaknesses of various control algorithm classes and validate where they can be effectively applied to practical tasks such as autonomous driving, industrial automation, energy, and robotics. The methodology includes a systematic review of 15 scientific sources, structured comparison based on criteria of accuracy (steady-state control error), stability (disturbances and parameter changes), and adaptability (self-tuning capability), analysis of numerical data from practical implementations. The scientific novelty lies in the development of a comprehensive methodology for

comparative evaluation of classical and intelligent control systems with quantitative justification of application areas: PID provides accuracy of $\pm 1\text{--}3\%$ for linear objects, RL $\pm 0.5\text{--}2\%$ with adaptation in 10–50 iterations, DRL $\pm 0.1\text{--}0.5\%$ when working with high-dimensional data. The main results show that RL/DRL systems surpass PID in energy efficiency by 10–40% (confirmed by the example of Google data center cooling management with 40% savings) and adaptability in dynamic environments, but require significant computational resources (days or weeks of GPU training) and pose verifiability problems. The practical significance lies in providing control system designers with evidence-based recommendations for choosing the type of control system, considering the complexity of the controlled object, adaptability requirements, and available computational resources.

Keywords: management of complex systems, PID controller, Reinforcement Learning (RL), deep learning, adaptive control, autonomous driving, industrial automation, energy conservation, robotics

For citation: Zorkin D. Yu. Evolution of algorithms for managing complex systems. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):52–59. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-5>.

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления развивается более полутора веков [1]. С момента появления первых автоматов и механических регуляторов эта область прошла путь от простых систем регулирования скорости и температуры к сложным человеко-машинным и распределенным системам. Сложная система управления характеризуется множеством взаимосвязанных элементов, нелинейной динамикой, распределенными параметрами и неопределенностью модели. В рамках автоматизированных систем управления она включает объект управления и систему управления, обеспечивающую регулирование его параметров.

На ранних этапах развития доминировали классические линейные методы, прежде всего ПИД-регулирование, частотный анализ и оптимальное управление [2]. ПИД-регуляторы получили широкое распространение благодаря простоте и надежности и до сих пор применяются в большинстве систем автоматизации [3]. При наличии адекватной математической модели они обеспечивают устойчивость и малую статическую ошибку.

С усложнением объектов управления, появлением нелинейностей, запаздываний и многомерных связей эффективность классических регуляторов стала снижаться. ПИД-подходы плохо адаптируются к неопределенности и изменяющимся условиям работы [4]. В ответ на эти ограничения были разработаны

гибридные методы, такие как фаззи-ПИД и нейро-ПИД, использующие нечеткую логику, нейронные сети и эволюционные алгоритмы [5]. Эти подходы повысили адаптивность систем управления и нашли применение в ряде современных технических систем.

С развитием вычислительной техники и средств связи стало возможным применение более сложных алгоритмов управления в реальном времени [6]. К концу XX века получили развитие адаптивные и робастные методы, а в XXI веке ключевую роль начали играть алгоритмы искусственного интеллекта. Особенно заметное влияние оказали методы обучения с подкреплением и глубокого обучения.

Обучение с подкреплением основано на формировании стратегии управления через взаимодействие с динамической средой и получение вознаграждения за успешные действия. Интеграция этого подхода с глубокими нейронными сетями привела к появлению глубокого обучения с подкреплением, способного работать с высокоразмерными пространствами состояний и действий. В настоящее время DRL рассматривается как перспективная парадигма для управления сложными динамическими системами [7].

Современные методы DRL позволяют решать задачи, недоступные классическим регуляторам, включая управление быстрыми и распределенными процессами. В то же время данные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, больших обучающих

выборки и остаются сложными с точки зрения верификации и обеспечения безопасности. Поэтому актуальным направлением является разработка гибридных подходов, сочетающих преимущества классического управления и методов обучения.

Развитие алгоритмов управления отражает переход от жестких регуляторов к адаптивным системам, способным обучаться на опыте. В данной работе рассматриваются и сопоставляются ПИД-регулирование, классическое обучение с подкреплением и глубокое обучение с подкреплением с точки зрения их эволюции и практической применимости [7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования основана на анализе научной литературы и сравнении основных классов алгоритмов управления. В качестве материалов использованы фундаментальные и современные публикации, посвященные теории управления, а также применению методов RL и DRL. Для анализа выбраны три группы алгоритмов: классические ПИД-регуляторы, методы обучения с подкреплением без использования глубоких нейронных сетей и алгоритмы глубокого обучения с подкреплением. Такой выбор позволяет охватить эволюцию подходов от традиционных решений к современным интеллектуальным методам.

Сравнение алгоритмов проводится по ключевым критериям точности, устойчивости и адаптивности. Точность характеризует способность системы минимизировать отклонение управляемой величины, устойчивость отражает сохранение работоспособности при возмущениях, а адаптивность показывает возможность подстройки параметров при изменении условий. Для ПИД-регуляторов эти характеристики оцениваются аналитически и по стандартным показателям переходных процессов, тогда как для RL и DRL используются эмпирические метрики, такие как скорость сходимости и качество отклика.

Методика также включает качественное описание внутренней логики каждого

класса алгоритмов и анализ вычислительных требований. На основе данных из литературы для каждого подхода формируется обобщенный профиль по выбранным критериям, который используется для последующего формального сравнения. Основу исследования составляют открытые публикации и отчеты с результатами экспериментов и симуляций систем управления различной сложности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализировав исторические и современные исследования, можно выделить следующие результаты эволюции алгоритмов управления:

1. Классические ПИД-регуляторы демонстрируют эффективность в задачах с известной линейной моделью объекта.
2. RL-системы: адаптивное управление в производственных процессах.
3. DRL-системы: интеллектуальное управление с числовыми данными.

ПИД-регулирование эффективно для линейных и слабонелинейных систем и широко применяется для стабилизации процессов, таких как управление двигателями или температурой [8]. Однако при наличии выраженных нелинейностей, задержек и неопределенностей его возможности ограничены, так как жесткие коэффициенты не обеспечивают достаточной адаптации [9]. Для повышения эффективности используются фаззи-, нейро- и генетически настроенные ПИД-регуляторы, хотя базовый принцип их работы остается неизменным.

Наряду с ПИД развивались адаптивные, оптимальные и робастные методы управления, включая LQR и H_∞ , обеспечивающие формальные гарантии устойчивости. Эти подходы особенно важны для ответственных объектов. Сравнительные исследования показывают различия в производительности ПИД и интеллектуальных контроллеров, что иллюстрируется экспериментами на простых объектах управления [9]. Результаты исследования приведены на рис. 1.

Показатель	PID Control RL	Control %	Изменение	p-значение	Стат. значимость
Урожайность (гр/мес)	1200	1350	+12.5%	0.03	Да
Потребление энергии (кВт·ч/мес)	150	135	-10%	0.04	Да
Расход воды (л/мес)	80	70	-12.5%	0.05	Да (порог 0.05)
Расход удобрений (гр/мес)	50	45	-10%	0.06	Нет
Время безотказной работы (%)	95	98	3%	0.02	Да
Состояние растений (шкала 1–5)	04.фев	04.май	7%	0.01	Да

Рис. 1. Сравнение эффективности PID Control RL и контрольной группы

- урожайность – масса биомассы, полученной с одного растения;
- энергопотребление (кВт·ч/день) – суммарное потребление электроэнергии системой освещения, климат-контроля;
- Control (Контрольная группа) – без автоматизации;
- PID Control – с ПИД-регулятором температуры и влажности;
- RL – с адаптивным управлением на основе обучения с подкреплением.

Примечание: составлено автором.

Результаты исследования также были продемонстрированы на рис. 2. RL-система обеспечивает +12,5 % урожайности при снижении энергопотребления на 10 % по сравнению с оптимально настроенным ПИД (отметим статисти-

ческую значимость $p < 0,05$). Эти данные иллюстрируют превосходство адаптивного метода (RL) в динамически изменяющемся окружении (реальное растение), где ПИД лишь стабилизирует заранее известные режимы (рис. 2).

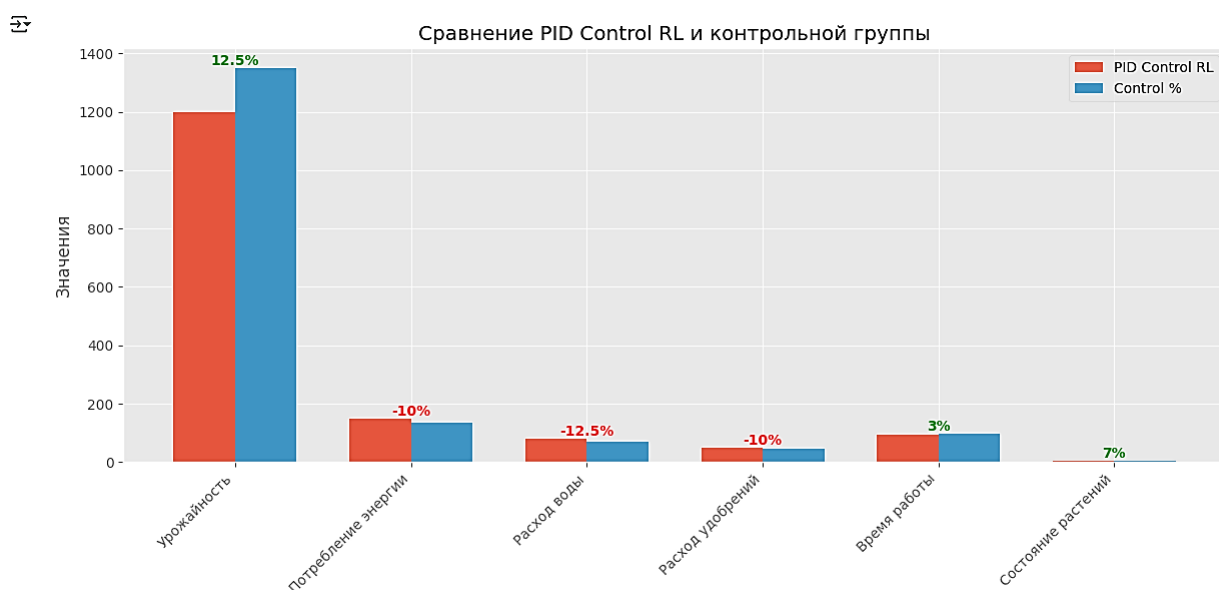


Рис. 2. Сравнение эффективности PID Control RL и контрольной группы по ключевым агротехническим показателям

- урожайность – масса товарной продукции;
- энергоэффективность – отношение урожайности к затратам энергии;
- время роста – период от посадки до сбора урожая;
- состояние растений – интегральный показатель (содержание питательных веществ, товарный вид).

Примечание: составлено автором.

Типовой промышленный манипулятор (робот-рука), контролируемый ПИД-регулятором на низком уровне и более умными алгоритмами на высоком уровне. Более современный этап истории связан с применением обучения с подкреплением (RL) и его

глубоких версий. В промышленности и энергетике эти методы начинают использоваться там, где классические алгоритмы плохо справляются или их сложно сконструировать вручную. К примеру, DeepMind продемонстрировал, как RL-контроллер автоматизировал

охлаждение дата-центров Google, приведя к сокращению расходов на электроэнергию примерно на 40 % [10]. В экспериментах по робототехнике DRL-подходы освоили такие задачи, как планирование траектории, захват и манипуляции сложными объектами в неизвестной среде. С точки зрения вычислительной мощности современные нейросетевые контроллеры стали возможны благодаря росту GPU/TPU: как отмечают авторы [10], с 2000-х годов глубокое обучение перешло в практику в силу роста ресурсов и доступных данных.

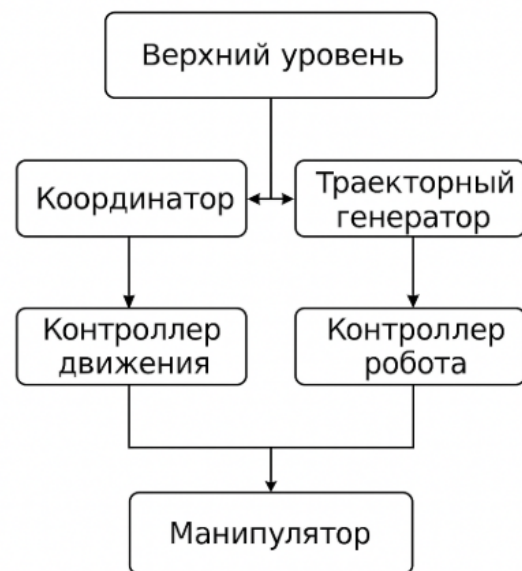
Анализ существующих кейсов применения показывает эффективность подходов RL/DRL в различных областях. В автономном вождении RL предлагается для выработки стратегий смены полос, обгона и планирования маршрута [10], где традиционные ПИД-регулирующие решения неприменимы к высокоуровневым задачам (на уровне рулевого управления требуется обучение на больших данных, а не жесткая формула). В системах энергоменеджмента RL демонстрирует преимущества в оптимизации энергопотребления при сохранении безопасности: кроме упомянутого дата-центра, есть примеры использования DRL для управления энергосетями и турбинами [11]. Научные работы по ядерным реакторам указывают, что DRL-контроллер может обеспечить «минимальное вмешательство оператора» при сложных переходных режимах запуска/остановки, тогда как ПИД-регуляторы требуют грубой перенастройки [11].

Современная индустриальная робототехническая система с комплексным управлением (робототехнический манипулятор). RL/DRL позволяют адаптироваться к новым задачам (различные объекты, окружение) без пересчета новых коэффициентов, в отличие от жестко настроенного ПИД (рис. 3).

В историко-системном ракурсе видно, что алгоритмы движутся от жесткой инженерной настройки к самообучающимся системам. Это отражено в росте публикаций по этой теме в последние десятилетия. Например,

Udugama (2023) констатирует, что DRL-подходы позволили совершить качественный скачок в решении высокоразмерных задач управления по сравнению с классическим Q-обучением [11]. Однако при этом отмечаются существенные пробелы: искусственные агенты все еще далеки от человека-оператора как высшего контура управления, обеспечивающего надежность в непредвиденных ситуациях, а вопросы интерпретируемости DRL остаются открытыми [11].

Таким образом, результаты исследования показывают: исторически основным рабочим инструментом были ПИД-регуляторы



Иерархическое управление

Рис. 3. Робототехнический манипулятор

- координатор – верхнеуровневый модуль планирования, распределяющий задачи между исполнительными устройствами и синхронизирующий их работу;
- траекторный регулятор – блок формирования требуемой траектории движения в декартовых или суставных координатах с учетом кинематических ограничений;
- контроллер робота – управляющий компьютер, реализующий алгоритмы кинематики, динамики и планирования движений;
- контроллер движения – низкоуровневый регулятор приводов отдельных степеней свободы, обеспечивающий отработку заданных перемещений;
- сенсорная система – совокупность датчиков положения, силомоментных датчиков, систем технического зрения.

Примечание: составлено автором.

(линейные модели), которые эволюционировали к адаптивным и гибридным схемам [12]. Современный этап характеризуется внедрением алгоритмов RL и DRL, которые обеспечивают большую адаптивность и возможность обучения на примерах, но требуют значительных вычислительных ресурсов и тщательно продуманной структуры функций вознаграждения. Это подтверждают эксперименты и практические внедрения: RL-контроллеры регулярно превосходят ПИД

по энергоэффективности и устойчивости к изменениям среды [13], хотя за счет сложности настройки и проверяемости уступают простоте классики.

Сравнительный анализ

В этом разделе приведено формальное сравнение трех подходов – ПИД, RL, DRL – в контексте прикладных задач автономного вождения, промышленности, энергетики и робототехники. Сравнительные характеристики данных подходов отражены в таблице.

Таблица

Сравнительные характеристики

Параметр	ПИД	RL	DRL
Точность установившегося режима	$\pm 1-3 \%$	$\pm 0,5-2 \%$	$\pm 0,1-0,5 \%$
Время сбора данных о состоянии	10–100 мс	50–500 мс	100–1000 мс
Полнота мониторинга (количество параметров)	5–20	20–100	100–1000+
Адаптация к изменению параметров объекта ($\pm 20 \%$)	Требуется перенастройка	Автоматическая в течение 10–50 итераций	Автоматическая в течение 5–20 итераций
Энергоэффективность (относительно базовой)	100 % (базовая)	110–125 %	125–140 %

Примечание: составлено автором.

Оценка алгоритмов управления проводится по критериям точности, устойчивости и адаптивности.

ПИД-регуляторы широко применяются в промышленной автоматике для управления температурой, скоростью и другими параметрами. Их основные преимущества – простота, предсказуемость и низкие вычислительные затраты. ПИД обеспечивает высокую точность и устойчивость для линейных систем с известной моделью, однако обладает ограниченной адаптивностью и плохо подходит для условий с меняющейся средой. В сложных задачах, таких как автономное вождение или управление энергосистемами, ПИД используется преимущественно на низком уровне и уступает более гибким методам.

Обучение с подкреплением (RL) эффективно в задачах со сравнительно небольшим пространством состояний. Его ключевым преимуществом является способность вырабатывать стратегию через взаимодействие со средой. RL применяется в автономном управлении, промышленной оптимизации

и энергетике, демонстрируя высокую адаптивность и конкурентную точность. Вместе с тем методы RL не всегда обеспечивают формальные гарантии устойчивости и требуют значительных вычислительных ресурсов на этапе обучения.

Глубокое обучение с подкреплением (DRL) расширяет возможности RL за счет использования нейронных сетей и позволяет решать задачи с высокоразмерными данными. DRL применяется в робототехнике, автономном транспорте и управлении сложными системами, обеспечивая высокую адаптивность и способность к обобщению. Однако такие методы отличаются высокой сложностью, затратным обучением и трудностями в верификации.

Сравнительный анализ показывает, что ПИД-регуляторы надежны и легко проверяемы, но малоадаптивны. Методы RL и DRL обладают большей гибкостью и способны оптимизировать поведение в сложных средах, однако требуют больших данных и вычислительных ресурсов. Выбор подхода

определяется спецификой задачи: для критичных и хорошо формализуемых систем предпочтителен ПИД, тогда как для адаптивных задач и задач с неструктурированной средой перспективнее RL и DRL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что развитие алгоритмов управления шло от простых и надежных регуляторов к более сложным и адаптивным методам. Классические ПИД-регуляторы остаются базовым инструментом, обеспечивающим устойчивость и предсказуемость в стандартных задачах. Вместе с тем современные методы обучения с подкреплением, включая RL

и DRL, открывают новые возможности управления в сложных и изменяющихся средах, где традиционные подходы оказываются недостаточно гибкими.

В работе выполнен сравнительный анализ ПИД, RL и DRL, показавший, что DRL-контроллеры обладают преимуществами в задачах с высокой неопределенностью и большим числом переменных, но требуют значительных вычислительных ресурсов и дополнительной проработки вопросов надежности. Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием гибридных подходов, снижением ресурсозатрат на обучение и обеспечением безопасности интеллектуальных алгоритмов управления.

Список источников

1. Терехов В. А. Управление в динамических системах: современные задачи и подходы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. Т. 6, № 119. С. 20–29.
2. Красовский А. А., Колесников А. А., Буков В. Н. и др. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления. Москва–Таганрог : Таганрогский радиотехнический университет, 2000. Ч. 1. 400 с.
3. Frolova K. A., Shestakov A. V. Models for managing the structural parameters of complex project systems // The Way of Science. 2020. Vol. 9, no. 79. P. 35–42.
4. Шубладзе А. М., Гуляев С. В., Малахов В. А. и др. Автоматическая настройка и адаптация в промышленных ПИД регуляторах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 12. С. 26–30.
5. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И. Д. Рудинского. 2-е изд. М. : Горячая линия-Телеком, 2013. 384 с.
6. Саяпин О. В., Тиханьчев О. В., Безвесильная А. А. и др. Об одной тенденции развития алгоритмов, реализуемых в системах поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36, № 3. С. 388–397. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.143.388-397>.
7. Terven J. Deep Reinforcement Learning: A chronological overview and methods // AI. 2025. No. 6. <https://doi.org/10.3390/ai6030046>.
8. Четвертных А. А., Бобров Д. А., Видинеев Д. С. и др. Сравнительный анализ PID-регулятора и SMC-регулятора // Молодежь. Техника. Космос : труды XVI общероссийской молодежной научно-технической конференции, приуроченной к 90-летию

References

1. Terekhov V. A. Upravlenie v dinamicheskikh sistemakh: sovremennye zadachi i podkhody. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2011;6(119):20–29. (In Russ.).
2. Krasovskiy A. A., Kolesnikov A. A., Bukov V. N. et al. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya*. Moscow/Taganrog: Taganrogskiy radiotekhnicheskiy universitet; 2000. Pt. 1. 400 p. (In Russ.).
3. Frolova K. A., Shestakov A. V. Models for managing the structural parameters of complex project systems. *The Way of Science*. 2020;9(79):35–42.
4. Shubladze A. M., Gulyaev S. V., Malakhov V. A. et al. *Avtomaticheskaya nastroyka i adaptatsiya v promyshlennyykh PID regul'yatorakh. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. 2007;(12):26–30. (In Russ.).
5. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy*. I. D. Rudinsky, trans. 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2013. 384 p. (In Russ.).
6. Sayapin O. V., Tikhanychev O. V., Bezvesilnaya A. A. et al. On one trend in the development of algorithms implemented in decision support systems. *Software & Systems*. 2023;36(3):388–397. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.143.388-397>. (In Russ.).
7. Terven J. Deep Reinforcement Learning: A chronological overview and methods. *AI*. 2025;(6). <https://doi.org/10.3390/ai6030046>.
8. Chetvertnykh A. A., Bobrov D. A., Vidineev D. S. et al. *Sravnitelnyy analiz PID-regulyatora i SMC-regulyatora*. In: *Proceedings of the 16th All-Russian Youth Scientific and Technical Conference dedicated to the 90th anniversary of Yuri A. Gagarin, USSR pilot-cosmonaut, Hero of the Soviet Union, and the first person*

- Юрия Алексеевича Гагарина, летчика-космонавта СССР, Героя Советского Союза, первого человека, отправившегося в космическое пространство. 25–29 марта 2024 г., Санкт-Петербург. В 4-х томах. Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 2024. С. 64–68.
9. Усков А. А., Кузьмин А. В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М. : Научно-техническое издательство «Горячая линия-Телеком», 2004. 143 с.
 10. Гао Т. Роботизированное обучение по демонстрациям с использованием диффузионной модели и алгоритмов обучения с подкреплением // Инженерный вестник Дона. 2025. Т. 3, № 123. С. 898–919.
 11. Trenev I., Tkachenko A., Kustov A. Movement stabilization of the parrot mambo quadcopter along a given trajectory based on PID controllers // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 54. P. 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.450>.
 12. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : труды XXXIII Международной научно-технической конференции, 13–19 сентября 2024 г., г. Сочи. М. : Артишок, 2024. 175 с.
 13. Oróstica R., Duarte-Mermoud M. A., Jáuregui C. Stabilization of inverted pendulum using LQR, PID and fractional order PID controllers: A simulated study // 2016 IEEE International Conference on Automatica, ICA-ACCA 2016, October 19–21, 2016, Curico. Curico/Chile : IEEE, 2016. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2016.7778434>.
 14. Воевода А. А., Романников Д. О. Формирование структуры нейронной сети посредством декомпозиции исходной задачи на примере задачи управления роботом манипулятором // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2018. № 9. С. 27–32.
 15. Боровик В. С., Шидловский С. В. Обучение с подкреплением в системах управления объектами с транспортным запаздыванием // Автометрия. 2021. Т. 57, № 3. С. 48–57. <https://doi.org/10.15372/AUT20210306>.
 - to travel into outer space “Molodezh. Tekhnika. Kosmos”, March 25–29, 2024, Saint Petersburg. In 4 vols. St. Petersburg: BSTU “VOENMEKH” named after D. F. Ustinov; 2024. p. 64–68. (In Russ.).
 9. Uskov A. A., Kuzmin A. V. Intellectulnye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennye neyronnye seti i nechetkaya logika. Moscow: Nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo “Goryachaya liniya-Telekom”; 2004. 143 p. (In Russ.).
 10. Gao T. Robotizirovannoe obuchenie po demonstratsiyam s ispolzovaniem diffuzionnoy modeli i algoritmov obucheniya s podkrepleniem. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2025;3(123):898–919. (In Russ.).
 11. Trenev I., Tkachenko A., Kustov A. Movement stabilization of the parrot mambo quadcopter along a given trajectory based on PID controllers. *IFAC-PapersOnLine*. 2021;54:227–232. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.450>.
 12. Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii. In: *Proceedings of the 33rd International Science-to-Practice Conference*, September 13–19, 2024, Sochi. Moscow: Artyshok; 2024. 175 p. (In Russ.).
 13. Oróstica R., Duarte-Mermoud M. A., Jáuregui C. Stabilization of inverted pendulum using LQR, PID and fractional order PID controllers: A simulated study. In: *2016 IEEE International Conference on Automatica, ICA-ACCA 2016*, October 19–21, 2016, Curico. Curico/Chile: IEEE; 2016. p. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2016.7778434>.
 14. Voevoda A. A., Romannikov D. O. Formation of the structure of a neuron network through decomposition of the initial task on a particular example of the robot-manipulator managing problem. *Izvestia SPbETU “LETI”*. 2018;(9):27–32. (In Russ.).
 15. Borovik V. S., Shidlovskii S. V. Reinforcement learning in plant control systems with transport lag. *Avtometriya*. 2021;57(3):48–57. <https://doi.org/10.15372/AUT20210306>. (In Russ.).

Информация об авторе

Д. Ю. Зорькин – преподаватель;
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,
mosh285@gmail.com

About the author

D. Yu. Zorkin – Lecturer;
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,
mosh285@gmail.com

Научная статья

УДК 004.942

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-6>



Возможности применения гибридных цифровых двойников для решения задачи предиктивного энергоэффективного управления в многоквартирном доме

Иван Владиславович Поддубный[✉], **Светлана Александровна Лысенкова**
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты измерений параметров микроклимата в жилом помещении квартиры многоквартирного дома в северном регионе с акцентом на концентрацию углекислого газа в воздухе как наиболее чувствительный показатель качества воздуха для организма человека. Предмет исследования составляет динамика концентрации углекислого газа, температуры, относительной влажности и давления в реальных условиях проживания. Цель работы заключается в оценке инерционности микроклимата жилого помещения, сопоставлении измеренных уровней углекислого газа с действующими рекомендациями по качеству воздуха и обосновании целесообразности применения цифрового двойника для решения задачи предиктивного управления системой умного дома. Методически исследование основано на применении измерительного устройства на базе микроконтроллера ESP32-C3 Super Mini с датчиками АНТ20, BMP280 и SCD40, формирующего временные ряды микроклиматических параметров. Показано, что при ночном пребывании одного человека концентрация углекислого газа монотонно возрастает от порядка 1 100 см³/м³ до значений выше 1 800 см³/м³, выходящих за пределы норм, рекомендуемых для жилых помещений. Научная новизна работы заключается в экспериментальном обосновании того факта, что микроклимат спальни можно рассматривать как инерционную систему, для которой целесообразно применение инструментов предиктивного управления устройствами умного дома на основе прогнозируемой динамики углекислого газа. Также приводится обоснование того, что цифровой двойник, интегрирующий данные датчиков и модель помещения, способен заранее выявлять моменты ухудшения качества воздуха и инициировать наиболее энергосберегающие управляющие воздействия.

Ключевые слова: цифровой двойник, микроклимат квартиры, предиктивное управление, энергоэффективность, интеллектуальное управление, датчики микроклимата

Для цитирования: Поддубный И. В., Лысенкова С. А. Возможности применения гибридных цифровых двойников для решения задачи предиктивного энергоэффективного управления в многоквартирном доме // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 60–66. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-6>.

Original article

Possibilities of using hybrid digital twins to solve problem of predictive energy efficient management in apartment building

Ivan V. Poddubnyj[✉], **Svetlana A. Lysenkova**
Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. This article presents the results of measuring microclimate parameters in a residential apartment in a multi-apartment building in the northern region, focusing on carbon dioxide concentrations as the most sensitive indicator of air quality for the human body. The study examines the dynamics of carbon dioxide concentrations, temperature, relative humidity, and pressure under real-life conditions. This study aims to assess the inertia of the residential microclimate, compare measured carbon dioxide levels with current air quality guidelines, and justify the feasibility of using a digital twin to solve the problem of predictive control of a smart home system. The study methodologically uses a measuring device based on an ESP32-C3 Super Mini micro-

controller with AHT20, BMP280, and SCD40 sensors, which generates time series of microclimate parameters. It is shown that during the overnight stay of one person, carbon dioxide concentrations increase monotonically from approximately 1100 cm³/m³ to values above 1800 cm³/m³, exceeding the recommended limits for residential premises. The scientific novelty of this study lies in the experimental substantiation of the fact that the bedroom microclimate can be considered an inertial system, for which the use of predictive control tools for smart home devices based on the predicted dynamics of carbon dioxide is advisable. It is also substantiated that a digital twin integrating sensor data and a room model can proactively detect deteriorating air quality and initiate the most energy-saving control actions.

Keywords: digital twin, apartment microclimate, predictive control, energy efficiency, intelligent control, microclimate sensors

For citation: Poddubnyj I. V., Lysenkova S. A. Possibilities of using hybrid digital twins to solve problem of predictive energy efficient management in apartment building. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):60–66. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-6>.

ВВЕДЕНИЕ

Качество воздуха в жилых помещениях является важным фактором, определяющим самочувствие, работоспособность, а также качество сна человека. Одним из ключевых индикаторов, позволяющих определить качество воздуха, выступает концентрация углекислого газа, так как она непосредственно связана с дыхательной активностью людей и режимами проветривания либо вентиляции помещений [1]. В ряде нормативных документов, например ГОСТ 30494–2011, приведена классификация воздуха в помещениях. Диапазон содержания CO₂ от 600 до 1 000 см³/м³ считается допустимым, а более высокие значения классифицируются как низкое качество воздуха в помещении. Повышенное содержание CO₂ в помещении ведет к ухудшению общего состояния человека и головной боли, снижению концентрации внимания, росту числа ошибок в работе, а также может вызывать проблемы с дыхательной и кровеносной системами [2].

Важно отметить, что реальные условия эксплуатации квартир, особенно в холодный период года, часто приводят к тому, что окна закрываются для снижения теплопотерь, отопительные приборы частично перекрываются, а приток воздуха практически отсутствует. В таких случаях концентрация углекислого газа ночью может существенно превышать рекомендуемые диапазоны, что редко осознается жильцами, поскольку субъективное

восприятие качества воздуха инерционно и зависит от привычек человека.

В условиях развития концепции применения умных домов и цифровых двойников [3] появляется возможность рассматривать жилую квартиру как управляемую систему, в которой микроклиматические параметры могут не только измеряться, но и прогнозироваться с учетом инерции микроклимата в помещении, а также поведения жильцов. Однако для построения таких моделей необходима экспериментальная база наблюдений, позволяющая выявить характерные закономерности в различных ситуациях. Настоящая работа посвящена анализу динамики концентрации углекислого газа и связанных параметров микроклимата в конкретном помещении, что позволяет обосновать инерционность системы и сформировать требования к предиктивному управлению.

Цель статьи заключается в демонстрации выраженной инерционности микроклимата, что впоследствии обоснует перспективность применения цифрового двойника для упреждающего управления системами вентиляции в умном доме.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование было проведено в жилой комнате в районах Крайнего Севера при низкой наружной температуре – около –15 °С. Отопительный прибор в обследуемой комнате был перекрыт для поддержания комфортной

температуры, а также для поддержания комфортной влажности использовался бытовой увлажнитель воздуха. В ночной период в помещении находился один человек, эпизодически выполнялось проветривание путем открытия окна.

Для регистрации параметров микроклимата было использовано разработанное измерительное устройство на базе микроконтроллера ESP32-C3 Super Mini. В качестве датчиков применена комбинация следующих устройств:

- 1) АНТ20 – для измерения температуры и относительной влажности;
- 2) BMP280 – для измерения атмосферного давления;
- 3) SCD40 – для измерения концентрации углекислого газа.

Схема подключения датчиков к микроконтроллеру приведена на рис. 1.

Датчики и микроконтроллер размещались в едином корпусе, спроектированном в системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D и изготовленном с использованием

технологии 3D-печати, что обеспечивало стабильное положение сенсоров и защиту от возможных механических воздействий (рис. 2).

Считывание показаний с датчиков выполнялось с шагом около одной минуты, что позволило получить детальный временной ряд длительностью несколько часов. Для последующего анализа данные были приведены к единой шкале времени в минутах от начала измерений, после чего были построены графики динамики концентрации углекислого газа, температуры, относительной влажности и давления. Дополнительно были вычислены основные статистические характеристики: минимальные, максимальные и средние значения (табл.). Средняя концентрация углекислого газа за период наблюдения составила около $1\,570\text{ см}^3/\text{м}^3$ при минимальном значении $1\,058\text{ см}^3/\text{м}^3$ и максимуме $1\,809\text{ см}^3/\text{м}^3$. Средняя температура воздуха была близка к $26,5\text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность – к 49% ,

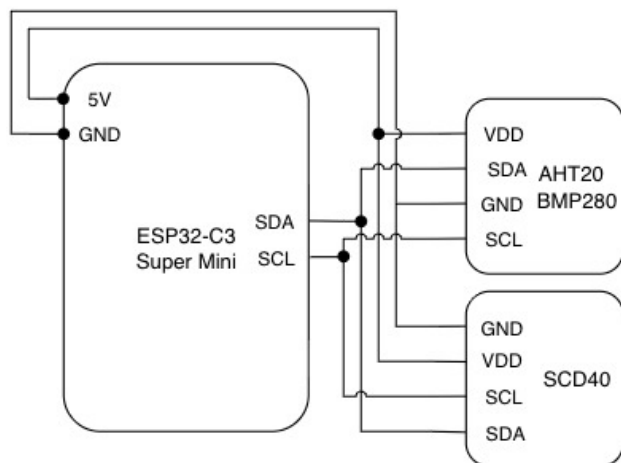


Рис. 1. Схема подключения датчиков к микроконтроллеру

Примечание: составлено авторами.

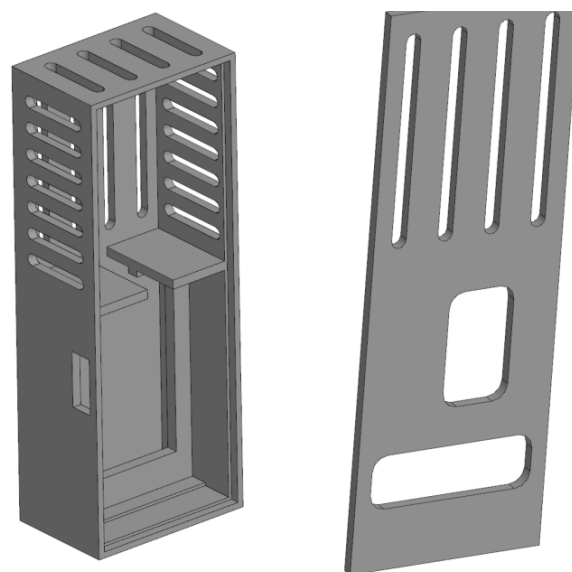


Рис. 2. Корпус для микроконтроллера и датчиков

Примечание: составлено авторами.

Таблица

Статистические характеристики полученных параметров микроклимата

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее
CO ₂	1 058	1 809	1 572,75
Температура	26	28,4	26,48
Влажность	30,5	53,1	48,76
Давление	750,3	752,9	751,57

Примечание: составлено на основании данных, полученных в исследовании.

а давление изменялось в узком диапазоне около 752 мм рт. ст. Также выявлены участки с выраженными изменениями параметров, соответствующие, в частности, открытию окна.

Методический анализ строился на сопоставлении полученных значений концентрации углекислого газа с диапазонами, приводимыми в ГОСТ 30494–2011 и профильной литературе по качеству воздуха в жилых помещениях, где уровни до $600 \text{ см}^3/\text{м}^3$ рассматриваются как наиболее предпочтительные, от 600 до $1\,000 \text{ см}^3/\text{м}^3$ – как признак ухудшения качества воздуха и недостаточной вентиляции помещения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений показателей микроклимата в ночной период времени

в жилом помещении показали, что концентрация углекислого газа в спальне в начальный момент наблюдений составляла порядка $1\,100\text{--}1\,150 \text{ см}^3/\text{м}^3$, что уже превышает рекомендуемые для жилых помещений уровни, но еще находится в диапазоне, который часто оценивается как допустимый при кратковременном воздействии. По мере пребывания человека в помещении без значимых притоков наружного воздуха концентрация углекислого газа демонстрирует устойчивый рост и достигает максимальных значений порядка $1\,800\text{--}1\,810 \text{ см}^3/\text{м}^3$. Такой уровень соответствует зоне пониженного качества воздуха, ассоциируемой с повышенной сонливостью, снижением концентрации внимания и субъективным ощущением духоты.

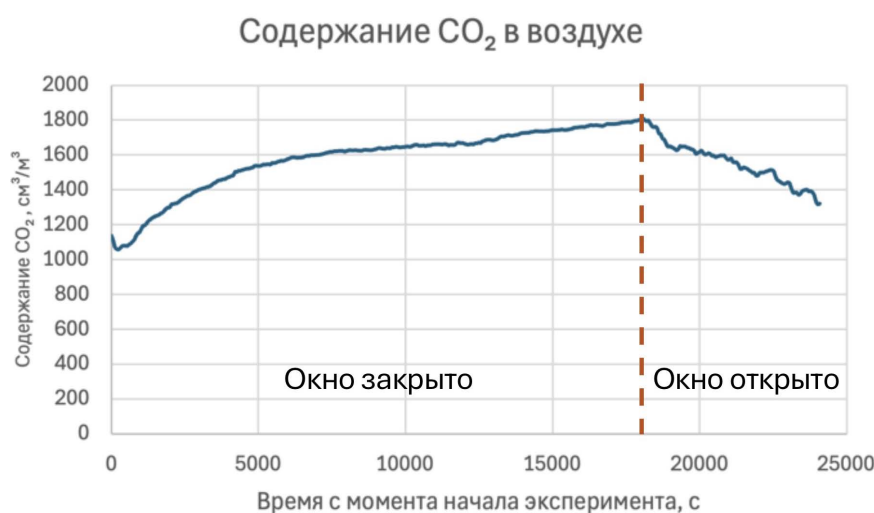


Рис. 3. Динамика концентрации CO₂ в воздухе с отметкой об открытии окна

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

Температура воздуха в помещении в течение ночи имеет тенденцию к постепенному снижению с порядка $28,3^\circ\text{C}$ в начале периода до около $26,1\text{--}26,4^\circ\text{C}$ к концу наблюдений (рис. 4). При закрытом отопительном приборе и наружной температуре минус пятнадцать градусов такое поведение отражает естественный тепловой баланс помещения, в котором внутренние источники тепла постепенно уступают влиянию инфильтрации и общему охлаждению помещения. Измерения параметра относительной влажности воздуха показывают рост с около 30–35 % до 50–53 %, что объясняется сочетанием снижения общей

температуры воздуха в помещении, работы бытового увлажнителя воздуха, а также естественным выделением влаги организмом человека. При этом давление изменяется в узком диапазоне и не оказывает заметного влияния на динамику остальных параметров в рассматриваемом масштабе времени.

Полученные результаты позволяют сделать несколько важных выводов. Во-первых, микроклимат жилого помещения в ночное время обладает выраженной инерционностью, которая характеризуется медленным изменением концентрации углекислого газа, температуры и влажности, что создает хорошие условия

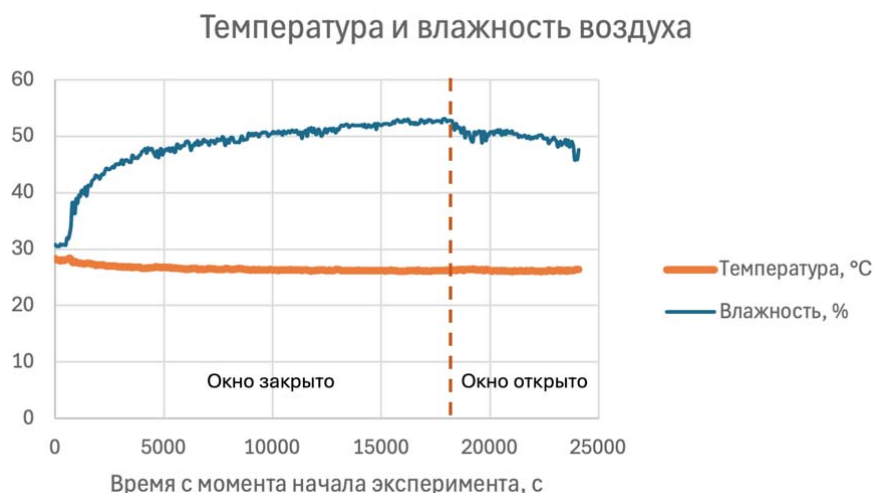


Рис. 4. Динамика температуры воздуха

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

для применения инструментов упреждающего регулирования. Во-вторых, при отсутствии автоматической вентиляции и при закрытых окнах концентрация CO_2 устойчиво выходит за пределы значений, рекомендуемых для жилых помещений, и удерживается в зоне пониженного качества воздуха. В-третьих, эпизодическое ручное проветривание позволяет кратковременно улучшать ситуацию, но не может обеспечить достаточный системный контроль качества воздуха.

С позиции системного управления эти наблюдения свидетельствуют о том, что микроклимат спальни можно рассматривать как динамическую систему с медленными изменениями состояния и относительно предсказуемыми трендами при фиксированных сценариях поведения жильца. В таких условиях применение цифрового двойника, объединяющего физическую модель помещения и данные с датчиков, представляется перспективным инструментом для решения задачи предиктивного управления микроклиматом. Цифровой двойник в данном случае мог бы на основе накопленных измерений и модели воздухообмена [4] заранее прогнозировать рост концентрации углекислого газа и заблаговременно инициировать мероприятия по проветриванию помещения — от открытия окон в рекомендованный момент с уведомлением пользователя до автоматического включения приточной вентиляции, если она предусмотрена.

Важно понимать, что в отличие от условного порогового регулирования, при котором вентиляция включается в момент достижения фиксированного уровня концентрации углекислого газа и ожидает последующего снижения этого параметра, что также является высокоинерционным процессом, предиктивное управление на основе цифрового двойника позволяет учитывать такую высокую инерцию и временную структуру процесса [5]. Допустим, если тенденция роста концентрации CO_2 указывает на достижение $1\,400\text{--}1\,500\text{ см}^3/\text{м}^3$ во время сна, то через определенное время система может запланировать кратковременное проветривание так, чтобы минимизировать тепловые и энергетические потери [6] при сохранении концентрации в пределах рекомендуемых значений. Кроме того, цифровой двойник может адаптироваться к поведению конкретного пользователя, учитывая режим сна, предпочтения по температуре и особенности работы различных устройств изменения микроклимата, таких как увлажнители, осушители и кондиционеры, что в перспективе создает основу для создания персонализированной системы управления микроклиматом жилого помещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование ночной динамики микроклимата в спальне квартиры

с использованием авторского измерительно-го устройства на базе ESP32-C3 Super Mini и датчиков АНТ20, BMP280 и SCD40 показало, что при реальных сценариях эксплуатации концентрация углекислого газа в помещении существенно превышает диапазон, рекомендуемый для жилых помещений, и достигает значений порядка $1\,800\text{ см}^3/\text{м}^3$. Такие результаты делают актуальной задачу не только отслеживания факта превышения показателей углекислого газа в воздухе, но и предиктивного управления системами, которые способствуют улучшению этого параметра микроклимата, например приточной вентиляции [7]. Важно обратить внимание на выявленный факт того, что микроклимат обладает выраженной инерционностью: изменения концентрации CO_2 , температуры и влажности происходят достаточно медленно, что создает хорошие условия для применения инструментов прогнозирования и упреждающего регулирования.

Список источников

1. Рымаров А. Г., Савичев В. В. Особенности определения требуемого воздухообмена в помещениях жилых зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 12. С. 23–25.
2. Мансуров Р. Ш., Гурин М. А., Рубель Е. В. Влияние концентрации углекислого газа на организм человека // *Universum: технические науки*. 2017. № 8.
3. Gopinath V., Srija A., Neethu Sravanthi C. Re-design of smart homes with digital twins // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1228, no. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012031>.
4. Дмитриев А. Н., Журавлев Г. С., Верзун В. А. Перспективы разработки цифровых двойников для эксплуатации «умных домов» // *Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании: материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 113-летию РЭУ им. Г. В. Плеханова*, 08–12 апреля 2020 г., г. Москва / под ред. В. И. Резина. М.: Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, 2020. С. 201–210.
5. Рыбакова Ю. А. Концентрация углекислого газа как критерий эффективности вентиляции // *Вестник магистратуры*. 2020. № 1–3. С. 75–79.
6. Das L., Anand P., Anjum A. et al. The impact of smart homes on energy efficiency and sustainability // *10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference*

Сформулированный на основе измерений вывод заключается в том, что спальня в многоквартирном доме может быть рассмотрена как инерционная система, для которой наиболее эффективным подходом является именно предиктивное, а не пороговое управление качеством воздуха. Наиболее перспективным направлением дальнейших работ является разработка цифрового двойника помещения, который объединяет модель воздухообмена и статистику измерений параметров микроклимата, а также алгоритмов, позволяющих прогнозировать моменты ухудшения качества воздуха и выбирать наиболее энергосберегающие сценарии работы исполнительных устройств с учетом реального поведения жильцов [8]. В последующих исследованиях целесообразно выполнить серию экспериментов в различных сезонных и эксплуатационных условиях, что позволит уточнить необходимые конфигурации цифрового двойника и повысить эффективность предиктивного управления.

References

1. Rymarov A. G., Savichev V. V. Distinctions of determining of the optimal air exchange in rooms of residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2014;(12):23–25. (In Russ.).
2. Mansurov R., Gurin M., Rubel E. The effect of carbon dioxide concentration on the human body. *Universum*. 2017;(8). (In Russ.).
3. Gopinath V., Srija A., Neethu Sravanthi C. Re-design of smart homes with digital twins. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1228(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012031>.
4. Dmitriev A. N., Zhuravlev G. S., Verzun V. A. Perspektivy razrabotki tsifrovyykh dvoynikov dlya ekspluatatsii "umnykh domov". In: V. I. Resin, ed. *Proceedings of the 10th International Research-to-Practice Conference dedicated to the 113th Anniversary of the Plekhanov Russian University of Economics "Sovremennye problemy upravleniya proektami v investitsionno-stroitel'noy sfere i prirodopol'zovanii"*, April 8–12, 2020, Moscow. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2020. p. 201–210. (In Russ.).
5. Rybakova Yu. A. Kontsentratsiya uglekislogo gaza kak kriteriy effektivnosti ventilyatsii. *Vestnik magistratury*. 2020;(1–3):75–79. (In Russ.).
6. Das L., Anand P., Anjum A. et al. The impact of smart homes on energy efficiency and sustainability. In: *10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference*

on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), December 1–3, 2023, Gautam Buddha Nagar, India. New York, NY : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 215–220. <https://doi.org/10.1109/UPCON59197.2023.10434418>.

7. Степанов И. О., Крайнов Д. В. Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 2. С. 26–36.
8. Ukpene P. C., Apaokueze T. N. The impact of smart home technologies on energy efficiency, cost savings, and environmental benefits // Journal of Energy Engineering and Thermodynamics. 2024. Vol. 4. P. 21–32. <https://doi.org/10.55529/jeet.44.21.32>.

Информация об авторах

И. В. Поддубный – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0005-2985-0871>,
ivan_poddubnyy01@mail.ru✉

С. А. Лысенкова – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>,
lsa1108@mail.ru

on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), December 1–3, 2023, Gautam Buddha Nagar, India. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2023. p. 215–220. <https://doi.org/10.1109/UPCON59197.2023.10434418>.

7. Stepanov I. O., Kraynov D. V. Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring. *News KSUAE*. 2024;(2):26–36. (In Russ.).
8. Ukpene P. C., Apaokueze T. N. The impact of smart home technologies on energy efficiency, cost savings, and environmental benefits. *Journal of Energy Engineering and Thermodynamics*. 2024;4:21–32. <https://doi.org/10.55529/jeet.44.21.32>.

About the authors

I. V. Poddubnyj – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0005-2985-0871>,
ivan_poddubnyy01@mail.ru✉

S. A. Lysenkova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>,
lsa1108@mail.ru

Научная статья

УДК 658.512-027.44

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-7>



Разработка прототипа тренажера оператора АСУТП

Михаил Яковлевич Брагинский, Дмитрий Викторович Тараканов✉

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. Данная работа посвящена изучению понятий эффективности работы человека-оператора и методов оценки эффективности путем разработки прототипа тренажера для оператора АСУТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами). В процессе работы были созданы методы и алгоритмы, обеспечивающие симуляцию управления производственным процессом для оценки эффективности работы операторов при управлении производственными процессами.

Результатом исследования является ПО прототипа тренажера для оценки эффективности работы операторов с дальнейшей возможностью адаптации ПО для реального предприятия.

Ключевые слова: тренажер, человек-оператор, эффективность работы, методы оценки, нечеткая логика

Для цитирования: Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Разработка прототипа тренажера оператора АСУТП // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 67–73. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-7>.

Original article

Prototype development of simulator for operator of ICS

Mikhail Ya. Braginskii, Dmitriy V. Tarakanov✉

Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The article is devoted to the concept study of performance efficiency for human-operator and efficiency rating methods by developing a prototype simulator for operator of industrial control system (ICS). Methods and algorithms that provide the simulation of production process control to assess operators' performance efficiency rate during process control are introduced.

A software tool was developed by the authors for the prototype simulation for an assessment of operator performance efficiency, which could be applicable in actual enterprises.

Keywords: simulator, human-operator, performance efficiency, efficiency rating, fuzzy logic

For citation: Braginskii M. Ya., Tarakanov D. V. Prototype development of simulator for operator of ICS. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):67–73. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-7>.

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность человека-оператора оценивается по результатам проделанной работы и выходным эргономическим показателям, при этом учитываются: суммарный объем выполненной работы, сложность решенной задачи, функциональные особенности и результаты выполнения задач. Также

важно учитывать затраченное время и использованные ресурсы.

Оценку эффективности работы человека-оператора проводят как часть комплексной оценки работы человеко-машинной системы [1, 2].

Главным для оценки работы оператора является анализ как теоретических знаний

об оборудовании, так и навыков работы с ним. Для анализа теоретических знаний существуют специальные тесты, созданные для данной цели [3]. Для оценки работы оператора с оборудованием существуют специальные системы управления, получающие информацию о выполняемой работе для дальнейшего анализа [4].

В качестве примера способа оценки эффективности рассмотрим существующую систему оценки эффективности работы оператора [5].

В производственной машине находится дисплейный модуль, подсоединенный к системе управления для графического представления для оператора и для контроля производительности используемой машины.

Как известно [6, 7], на практике широко используются объекты автоматического и автоматизированного управления, у которых параметры меняются в широком диапазоне. Поэтому в подобных задачах целесообразно использовать подходы, основанные на элементах интеллектуального управления, в том числе применяя аппарат нечетких множеств [8], который показал свою эффективность в условиях априорной неопределенности моделей объектов управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аппаратная часть тренажера оператора включала персональные компьютеры с операционной системой Windows 10, подключенные к локальной компьютерной сети организации.

Для выполнения работы (создания прототипа тренажера) была предложена концепция диагностической интеллектуальной системы, основанная на подаваемых сигналах тренажером оператору, распознавании событий и реакций человека-оператора на предупреждающие и аварийные сигналы.

Перед началом работы были поставлены следующие задачи:

1) получение экспериментальных данных о времени реакции оператора на предупреждающие и аварийные сигналы;

2) построение графиков кластеров времени реакции оператора;

3) идентификация кластеров.

Для выполнения всех этих пунктов была написана программа на языке C, обеспечивающая автоматизированное получение данных из журнала событий тренажера и их анализ. Для идентификации кластеров было решено использовать нейронные сети. Всю работу было решено выполнять в среде решения задач технических вычислений Matlab.

В процессе работы был разработан прототип тренажера оператора (рис. 1) с использованием языков HTML и JavaScript для создания пользовательского графического интерфейса и программирования внутренней логики функционирования. В качестве технологического объекта управления был выбран котел, в котором происходит нагрев теплоносителя, а также регулирование объема жидкости и контроль давления внутри котла. По сути, данный объект является аналогом (симулятором) котельной установки с измерительными элементами трех видов: датчиками давления (P), температуры (T) и уровня теплоносителя (L). Значения показаний этих датчиков отображаются рядом (на рис. 1 эти значения показаны в прямоугольных полях с серым фоном) жирным шрифтом, под ними показаны значения уставок (заранее заданных технологических границ) в виде дроби. Верхняя часть этой дроби показывает верхнюю уставку, нижняя часть – нижнюю уставку.

Работа оператора заключается в реагировании на ситуации. Например, в момент, когда температура теплоносителя на объекте управления становится равной максимальной, оператор должен выключить нагревательный элемент, а когда становится ниже – включить его. Время реакции оператора на эти события может быть различным (например, по причине усталости); данные о времени реакции оператора записывались в специальный текстовый файл [9, 10].

Для управления насосом, нагревателем и сливным краном (вентилем) на экране тренажера оператора были размещены чек-боксы

(показаны внизу рис. 1) с обозначением альтернативного способа управления – путем нажатия на клавиши *Q*, *W*, *E* для насоса, крана и нагревателя соответственно.

Программа тренажера оператора формирует журнал событий и позволяет получить

данные, проанализировав которые можно увидеть, в какие моменты происходило включение и отключение исполнительных механизмов (далее – ИМ) и какие значения принимали физические параметры объекта управления.

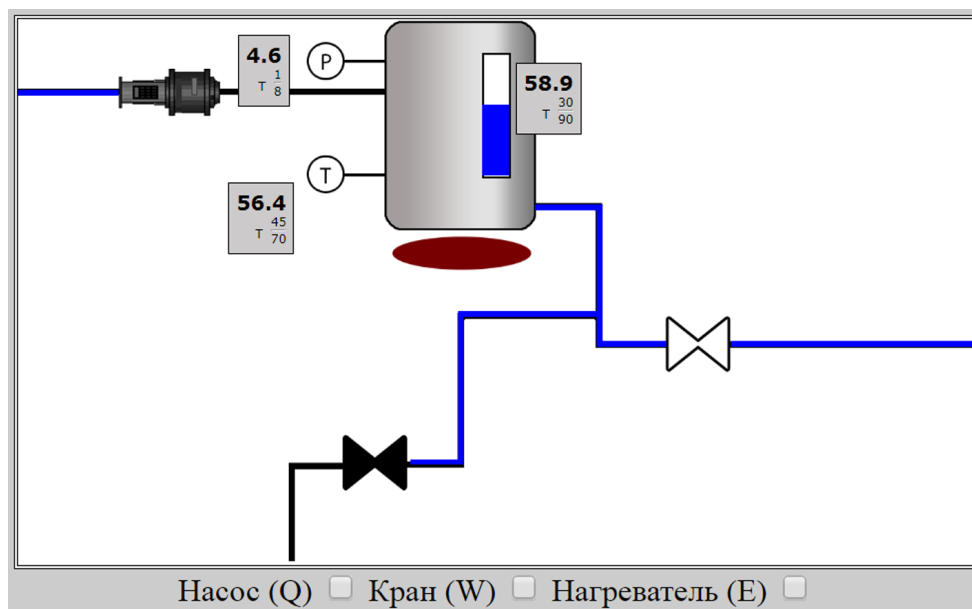


Рис. 1. Экран оператора в прототипе тренажера
Примечание: составлено авторами.

Журнал событий формирует записи каждые 0,1 секунды, поэтому количество записей в журнале составляет $10 \cdot T$, где T – время работы в тренажере оператора. Большое количество записей мешает ручному поиску моментов включения и выключения ИМ и вычислению времени их работы.

С целью автоматизированного сбора данных (АСД) была написана функция в среде Matlab. Эта функция позволяет сформировать кластеры событий для дальнейшей идентификации.

Журнал событий изначально формировался в виде таблицы, однако существуют проблемы с занесением первоначальных данных в Matlab:

- строка данных не распределяется по ячейкам;
- отсутствует признак работы ИМ в моменты нормальной работы;
- нечисловое значение признака при работе вне диапазона уставок;

– символьные значения столбца AUTO.

Для решения этих проблем было использовано редактирование таблиц Excel. Excel позволяет с помощью специальной вставки перераспределить данные по ячейкам и столбцам, а также в автоматизированном режиме заменить символьные значения на числовые:

- заменить символьные значения Н и L в столбцах SP, ST, SL на 1 и -1 соответственно;
- заменить символьные значения true и false в столбце AUTO на 1 и 0 соответственно;
- пустые ячейки в столбцах SWITCH: PUMP, HEATER, TAP заполнить 0.

Таким образом можно заносить данные в Matlab.

Алгоритм работы функций представлен на рис. 2.

Были разработаны алгоритмы сбора данных в те моменты, когда значения контролируемых параметров становились больше или меньше заданных границ (уставок) для верхнего и нижнего пределов соответственно. Исходя

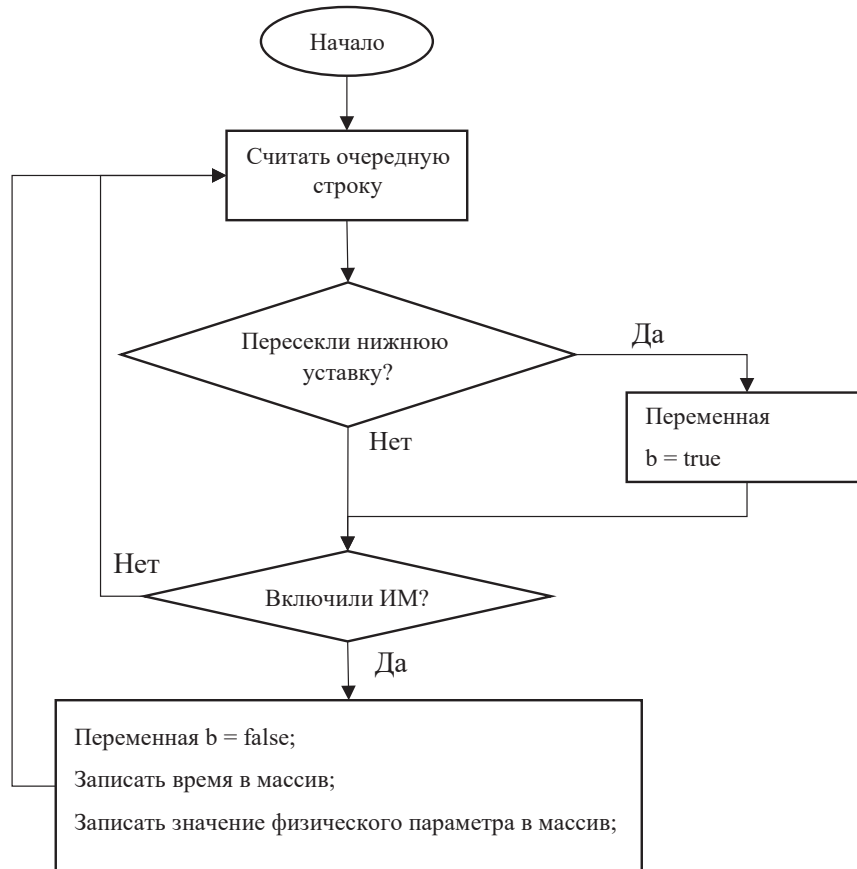


Рис. 2. Алгоритм функции АСД из журнала событий
 Примечание: составлено авторами.

из вышеописанных алгоритмов, можно сделать вывод, что будут формироваться кластеры, количество которых варьируется от 1 до 4.

Листинг функции автоматизированного сбора данных представлен ниже:

```

function [ Th, dTh, Tl, dTl, Lh, dLh, Ll, dLl] = st(A)
    numOfRows = size(A, 1); % число строк
    b = false;
    c = false;
    j=1;
    k=1;
    for i=2:numOfRows
        if A(i,7) == 1 && A(i-1,7) == 0
            b=true;
        end
        if A(i,13) == 0 && A(i-1,13) == 1 && b == true
            b=false;
            dTh(j) = A(i,10);
            Th(j) = A(i,3);
            j = j + 1;
        end
        if A(i,8) == 1 && A(i-1,8) == 0
            c=true;
        end
        if A(i,14) == 0 && A(i-1,14) == 1 && c == true
            c=false;
            dLh(k) = A(i,11);
            Lh(k) = A(i,4);
            k = k + 1;
        end
    end
end
    
```

Анализ данных осуществлялся с помощью математического аппарата нечетких множеств. Для этого была использована библиотека Fuzzy Logic Toolbox пакета прикладных программ MatLab [2]. Нечеткая кластеризация данных позволяет решить задачу идентификации событий.

Для имитации нормального и аварийных режимов работы использовался инструментальный Fuzzy Logic Designer, с помощью которого задаются через функции принадлежности такие параметры системы, как давление в магистрали, температура теплоносителя и уровень жидкости (рис. 3). Используя продукционные правила логического вывода

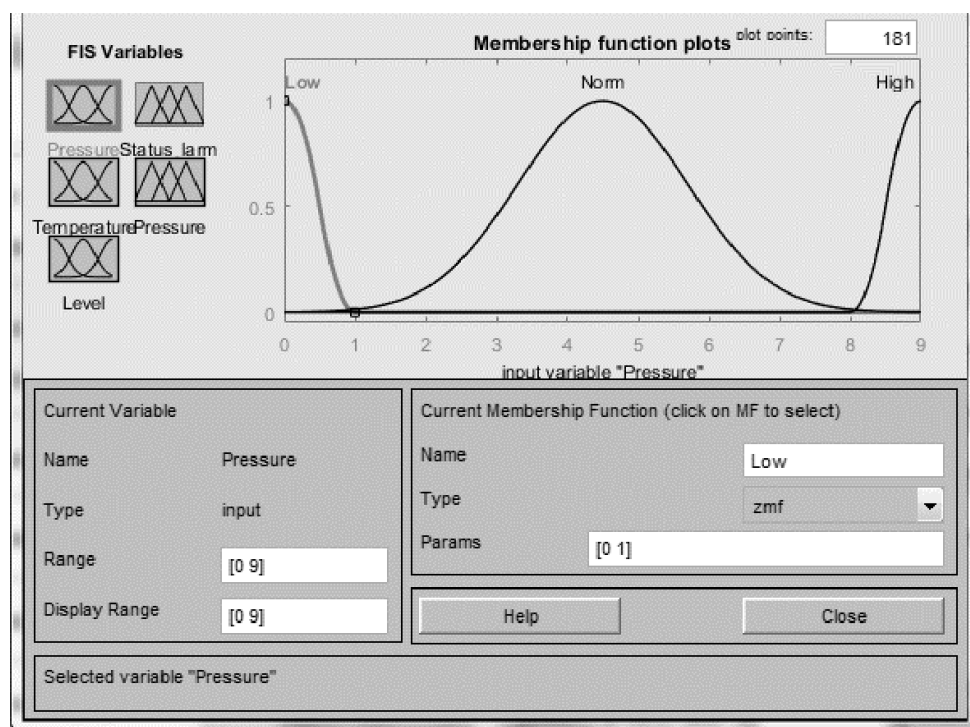


Рис. 3. Процедура фазификации параметров технологического объекта управления

Примечание: кластеризация данных осуществлялась с помощью типовой функции fcm библиотеки Fuzzy Logic.

в вышеуказанном редакторе, можно получить соответствующий отклик моделируемой системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная программа прототипа тренажера была применена для оценки времени реакции оператора в процессе выполнения трудовых функций.

В ходе проведения экспериментов были получены данные, которые характеризуют степень уровня реакции того или иного обучающегося при управлении технологическим объектом. Накопленные данные были подвергнуты процедуре кластеризации, и на рис. 4 представлен пример такого массива данных.

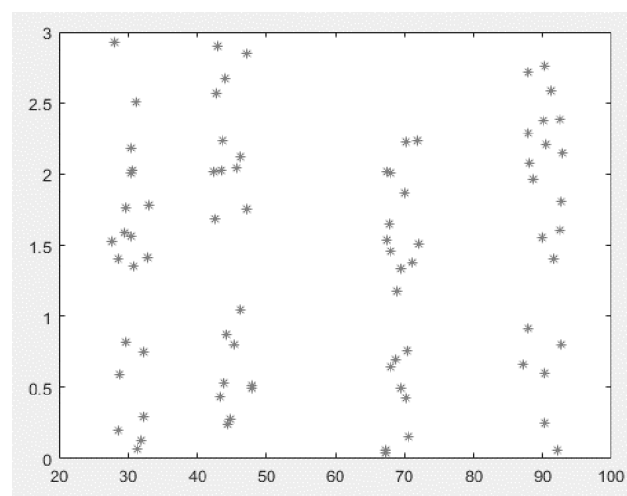


Рис. 4. Зависимость времени реакции оператора (по оси Y) от значения физических параметров модели (ось X)

Примечание: составлено авторами.

Для решения задачи кластеризации данных использовалась функция *fcm*. Результат одной из задач представлен на рис. 5. Символами «*» обозначены центры кластеров.

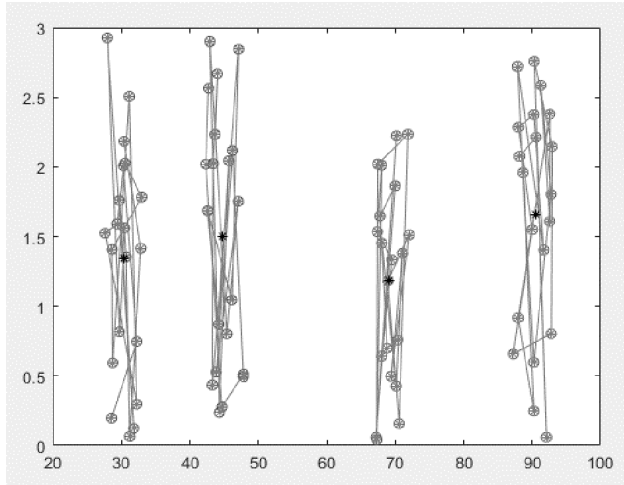


Рис. 5. Визуализация полученных кластеров
Примечание: составлено авторами.

Список источников

1. Дружинин Г. В. Учет свойств человека в моделях технологий. М. : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. 327 с.
2. Семенистая Е. С., Подопрыголова О. Н., Семунина Н. С. Анализ методов оценки надежности деятельности человека-оператора // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 2. С. 209–217.
3. Благодарный Н. С., Кобозев В. Ю., Колмогоров А. Г. и др. Компьютерные тренажеры-имитаторы для обучения персонала безаварийной эксплуатации энерготехнологических котлов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2015. Т. 1, № 1. С. 7–14.
4. Гусев Д. В., Климов Р. С. Программный комплекс априорного оценивания показателей качества профессиональной деятельности оператора эргатической системы // Программные системы и вычислительные методы. 2015. № 4. С. 374–389.
5. Путконен А. Система для оценки производительности машины и эффективности работы ее оператора : патент 2458403C2 Рос. Федерация № 2009120025/08 ; заявл. 26.05.2009 ; опубл. 10.08.2012. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_2009120025_20101210_A_RU (дата обращения: 10.02.2023).
6. Душков Б. А., Ломов Б. Ф., Рубахин В. Ф. и др. Деятельность оператора в системе «человек – машина» // Основы инженерной психологии. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Высшая школа, 1986. Гл. 8. С. 169–196.
7. Литвинов В. А. Компьютерные тренажеры как средство эффективного формирования компетен-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что использованные методы исследования и разработанные алгоритмы обработки были адекватно применены в процессе решения поставленной задачи. Был спроектирован и реализован прототип симулятора объекта управления, который можно использовать для тренировки и профессионального отбора операторов человеко-машинных систем. В целом данное решение позволяет отслеживать мгновенное время реакции человека (оператора), что соответствует его текущему физиологическому состоянию. В перспективе это позволит повысить эффективность работы операторов и диспетчеров в управлении техническими системами.

References

1. Druzhinin G. V. Uchet svoystv cheloveka v modelyakh tekhnologiy. Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodika”; 2000. 327 p. (In Russ.).
2. Semenistaya E. S., Podoprygolova O. N., Semunina N. S. Analiz metodov otsenki nadezhnosti deyatel'nosti cheloveka-operatora. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskies nauki*. 2008;(2):209–217. (In Russ.).
3. Blagodarniy N. S., Kobozev V. Y., Kolmogorov A. G. et al. Computer training simulators-imitators for educating the staff on accidentless usage of energotechnological boilers. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015;1(1):7–14. (In Russ.).
4. Gusev D. V., Klimov R. S. Programmnyy kompleks apriornogo otsenivaniya pokazateley kachestva professional'noy deyatel'nosti operatora ergaticheskoy sistemy. *Programmnye sistemy i vychislitelnye metody*. 2015;(4):374–389. (In Russ.).
5. Putkonen A. System for evaluating performance of production machine and efficiency of operator thereof. RU Patent 2458403C2 No. 2009120025/08, filed May 26, 2009, issued August 10, 2012. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_2009120025_20101210_A_RU (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).
6. Dushkov B. A., Lomov B. F., Rubakhin V. F. et al. Deyatel'nost operatora v sisteme “chelovek – mashina”. *Osnovy inzhenernoy psikhologii*. 2nd rev. ed. Moscow: Vysshaya shkola; 1986. Chap. 8. p. 169–196. (In Russ.).
7. Litvinov V. A. Kompyuternye trenazhery kak sredstvo effektivnogo formirovaniya kompetentsiy obuchayushchikhsya. *Vestnik Barnaulskogo yuridi-*

- ций обучающихся // Вестник Барнаульского юридического института МВД России. 2020. № 1. С. 210–212.
8. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
9. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Построение многофункционального тренажера по управлению теплоэнергетической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 2. С. 161–168.
10. Вильвер П. Ю., Юрин А. Ю. Специализированный программный комплекс «АСТ» для создания тренажеров // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 136–141.
- cheskogo instituta MVD Rossii*. 2020;(1):210–212. (In Russ.).
8. Leonenkov A. V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. St. Petersburg: BKHV-Peterburg; 2005. 736 p. (In Russ.).
9. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V. Construction of multifunctional simulator for controlling heat and power system. *Proceedings in Cybernetics*. 2018;(2):161–168. (In Russ.).
10. Wilwer P. Yu., Yurin A. Yu. “AST” software suite for creating training simulators. *Software & Systems*. 2016;(3):136–141. (In Russ.).

Информация об авторах

М. Я. Брагинский – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>,
braginskiy_myasurgu.ru
Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>,
sprtdv@mail.ru✉

About the authors

M. Ya. Braginskii – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0003-1332-463X>,
braginskiy_myasurgu.ru
D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>,
sprtdv@mail.ru✉

Научная статья

УДК 656.078:004.9

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-8>



Системная модель дорожно-транспортной инфраструктуры

**Олег Константинович Головнин, Елена Владимировна Чекина[✉],
Мария Владимировна Шестакова, Екатерина Александровна Тюлюнова**
Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

Аннотация. В условиях возрастающей сложности современных больших транспортных систем возникает потребность объединения различных компонентов дорожно-транспортной инфраструктуры в единую модель для их совместного анализа и оптимизации. Предметом исследования являются модели представления дорожно-транспортной инфраструктуры. Целью настоящего исследования является создание системной модели дорожно-транспортной инфраструктуры, обеспечивающей комплексное представление множества взаимосвязанных объектов, параметров и событий, влияющих на транспортную систему. Разработана оригинальная методология, интегрирующая пространственно-временные координаты и функциональные параметры компонентов дорожно-транспортной инфраструктуры. Основой подхода выступает новый показатель – индекс системной уравновешенности, который отражает степень гармонии и стабильности транспортной системы в каждый момент времени. Исследование базируется на анализе пространственно-временного взаимодействия объектов дорожно-транспортной инфраструктуры и транспортных потоков. Выполнена реализация предложенной модели в составе геоинформационной системы на примере г. Сургута, проведены вычислительные эксперименты. Полученные результаты показали возможность раннего выявления деградации инфраструктурного состояния задолго до появления критических заторов и сбоев в транспортной системе. Таким образом, предложенная модель позволяет количественно оценить уровень согласованности функционирующих компонентов дорожно-транспортной инфраструктуры, определить зоны повышенной напряженности и оценить мероприятия по улучшению ситуации.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, геоинформационная система, транспортный поток, интеграция данных, оценка эффективности, сбалансированность, оптимизация, мониторинг, интегральные показатели

Для цитирования: Головнин О. К., Чекина Е. В., Шестакова М. В., Тюлюнова Е. А. Системная модель дорожно-транспортной инфраструктуры // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 74–81. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-8>.

Original article

System model of transportation infrastructure

Oleg K. Golovnin, Elena V. Chekina[✉], Maria V. Shestakova, Ekaterina A. Tyulyunova
Samara State Medical University, Samara, Russia

Abstract. With the increasing complexity of modern large transportation systems, there is a growing need to integrate diverse transportation infrastructure components into a single model for their joint analysis and optimization. Hence, the paper describes representations of transportation infrastructure. The research aims to design a system model of the specified phenomenon, which would provide a comprehensive understanding of its determinants, i.e. interconnected objects, parameters, and events. The article proposes an original technique based on spatial and temporal data, as well as functional features of transportation infrastructure components. At the heart of the developed method lies a system stability index, a new measure reflecting the coherence and

balance of transport network components at any given time. The work investigates the spatial and temporal interactions of transportation infrastructure objects and traffic flows. The authors implement the proposed model as part of a geographic information system on the example of Surgut and perform simulation experiments. The findings show the possible early detection of infrastructure degradation prior to major traffic congestion and disruptions. Thus, the designed model allows researchers to assess quantitatively the coherence level of the transportation infrastructure components, identify high traffic density areas, and evaluate measures to improve the state of the examined system.

Keywords: transportation infrastructure, geographic information system, traffic flow, data integration, efficiency assessment, balance, optimization, monitoring, integrated indexes

For citation: Golovnin O. K., Chekina E. V., Shestakova M. V., Tyulyunova E. A. System model of transportation infrastructure. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):74–81. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-8>.

ВВЕДЕНИЕ

Современные крупные города и регионы сталкиваются с постоянным ростом транспортных нагрузок, что требует от систем дорожно-транспортной инфраструктуры (ДТИ) высокой эффективности и адаптивности. Эффективное управление такими системами невозможно без комплексного понимания их структуры, состояния и параметров функционирования. В условиях возрастающей сложности транспортных сетей ключевым инструментом становится системный подход, который позволяет объединять различные компоненты и процессы ДТИ в единую модель для их анализа и оптимизации.

В данной работе предлагается системная модель ДТИ, направленная на интеграцию всех доступных данных о ДТИ с учетом их пространственно-временной координации для оценки системной уравновешенности. Предложен индекс системной уравновешенности ДТИ, который служит интегральным показателем, отражающим гармоничность состояния объектов, процессов и явлений ДТИ. Выполнена реализация предложенной модели ДТИ в составе геоинформационной системы (ГИС).

Современные исследования в области дорожно-транспортных систем уделяют значительное внимание системному подходу к моделированию и оценке эффективности транспортной инфраструктуры с использованием ГИС и аналитических методов. Например, в [1] анализируются возможности

применения ГИС для мониторинга состояния инфраструктуры. В [2] предложены модели оценки параметров транспортных потоков с учетом динамических изменений их характеристик с использованием больших данных и ГИС.

Важным направлением является разработка интегральных индексов и показателей сбалансированности транспортных потоков. В [3] предложен многоуровневый индекс оценки сбалансированности транспортных систем. В [4] представлена методика расчета интегральных показателей транспортной доступности на основе взвешенных нормированных частных показателей с использованием данных ГИС. Разрабатываются методы прогнозирования исходных данных для модели распределения транспортных потоков по сети [5].

Детально рассмотрены задачи интеграции данных, полученных из различных источников, для создания полноценной модели транспортной системы. В [6] показано, как объединение данных с сенсоров, камер и систем навигации в рамках ГИС позволяет улучшить точность оценки транспортных показателей и оперативность принятия решений. В [7] рассмотрены вопросы интеграции больших данных и методов искусственного интеллекта для анализа и оптимизации транспортных потоков.

Для визуализации и управления транспортной инфраструктурой активно используются интеллектуальные ГИС. Использование ГИС

с функцией динамического обновления данных обеспечивает эффективный мониторинг и визуализацию показателей, что значительно повышает качество управления транспортной сетью [8]. В архитектуру интеллектуальных транспортных систем также включают ГИС для оценки и управления дорожным движением [9].

В отечественной научной литературе внимание сосредоточено на разработке методик оценки уровня обслуживания автомобилей улично-дорожной сетью [10]. Разрабатываются методы мониторинга транспортных потоков с использованием ГИС, ориентированные на повышение эффективности эксплуатации инфраструктуры [11].

Современные исследования подчеркивают значимость комплексного подхода к оценке транспортных систем, совмещающего пространственные данные, показатели нагрузки и технического состояния. В [12] рассматриваются методы оценки сбалансированности транспортной сети с использованием индекса, основанного на распределении потока и техническом состоянии элементов инфраструктуры. В [13] анализируется влияние структуры транспортной сети на эффективность распределения транспортных потоков, что подтверждает необходимость использования интегральных моделей.

Применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые перспективы для оценки и прогнозирования состояния транспортных систем. Так, в [14] предложены гибридные модели для прогнозирования нагрузок на транспортную сеть с использованием данных ГИС и алгоритмов глубокого обучения. В [15] исследуются алгоритмы оптимизации маршрутов в условиях динамической нагрузки с интеграцией пространственных данных.

Таким образом, современные исследования движутся в направлении комплексного, многослойного моделирования дорожно-транспортных систем с интеграцией пространственных данных и построением интегральных индексов, которые учитывают

как нагрузку на инфраструктуру, так и ее техническое состояние. В [16] предложена методика интегрального мониторинга показателей функционирования транспортных систем, описывающая многоэтапный подход к сбору и обработке данных. Предложенная в работе методика расчета ключевых показателей эффективности подтолкнула к разработке системной модели ДТИ в настоящей статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть ДТИ формализуется как пространственно-временная динамическая система:

$$DTI = \langle O, L, V, T, E, S \rangle,$$

где:

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – множество объектов инфраструктуры (дороги, перекрестки, мосты, парковки и др.);

$L = \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ – множество логических и физических связей (дороги, маршруты, пересадки);

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ – параметры и характеристики объектов (пропускная способность, аварийность, качество покрытия, состояние);

T – временная шкала, отражающая изменение состояния во времени;

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ – внешние и внутренние события (ДТП, ремонт, погодные условия, инциденты и др.);

$S(t)$ – совокупное системное состояние в момент времени t .

Состояние всей системы в момент времени t :

$$S(t) = \{s_i(t) \mid o_i \in O\},$$

где: $s_i(t)$ – состояние i -го объекта, которое определяется как вектор параметров из V и актуальных событий E .

Взаимодействие элементов описывается как направленный граф $G = (O, L)$ с весами ребер $w(l_{ij}, t)$, отражающими реальную эффективность/доступность связи на текущий момент времени.

Индекс системной уравновешенности – интегральная метрика, отражающая гармоничность, сбалансированность и стабильность

всей ДТИ с учетом состояния объектов, связей, трафика и инцидентов:

$$ISU(t) = \alpha \left(\frac{1}{|O|} \sum_{i=1}^{|O|} Q_i(t) \cdot W_i(t) \right) + \beta \left(\frac{1}{|L|} \sum_{j=1}^{|L|} C_j(t) \cdot W_j'(t) \right),$$

где:

$Q_i(t)$ – оценка состояния i -го объекта (нормирована от 0 до 1, где 1 – идеальное состояние, 0 – критическое);

$W_i(t)$ – весовой коэффициент важности или «системного вклада» объекта (например, центральные развязки – больше вес; второстепенная улица – меньше);

$C_j(t)$ – коэффициент качества или пропускной способности j -й связи;

$W_j'(t)$ – вес связи;

α, β – коэффициенты взвешивания, определяющие относительный вклад состояния объектов и связей.

Тогда, если $ISU(t) \rightarrow 1$, то система находится в уравновешенном (гармоничном) состоянии, все компоненты работают эффективно; если же $ISU(t) \rightarrow 0$, то система выходит из равновесия и требует вмешательства (массовые заторы, аварии, разрывы маршрутов).

В ГИС каждому объекту и связи присваиваются текущие оценки $Q_i(t)$, $C_j(t)$. Так, индекс системной уравновешенности может учитывать резкие изменения из-за событий E : например, после крупной аварии коэффициенты Q_i или C_j падают, ISU снижается, а после ввода новой развязки или завершения ремонта значения возрастают.

Оценка $Q_i(t)$ формируется на основе ключевых атрибутов объекта (дорога, перекресток, мост и т. д.), нормированных к значению от 0 до 1. Для каждого объекта определяется набор весомых критериев:

- пропускная способность cap_i ;
- процент перегрузки $load_i$;
- количество ДТП на объекте за период $accidents_i$;
- состояние дорожного покрытия $cover_i$;
- наличие ограничений движения $restr_i$ (ремонт, погодные условия).

Тогда $Q_i(t)$ рассчитывается следующим образом:

$$Q_i(t) = \alpha_1 \cdot f_{cap}(cap_i) + \alpha_2 \cdot f_{load}(load_i) + \alpha_3 \cdot f_{acc}(accidents_i) + \alpha_4 \cdot f_{cover}(cover_i) + \alpha_5 \cdot f_{restr}(restr_i),$$

где:

α_k – веса влияния каждого критерия, $\sum \alpha_k = 1$.

f_* – функции нормализации (приведение значения в диапазон $[0, 1]$, где 1 – наилучшее состояние).

Функция нормализации для типовых объектов ДТИ принимает следующие значения:

– $f_{cap}(cap_i) = 1$, если объект функционирует в рамках своей проектной нагрузки; <1 при недогрузке/перегрузке.

– $f_{load}(load_i) = 1 - \min(load_i, 1)$ (1 = полная загрузка).

– $f_{acc}(accidents_i) = e^{-\beta \cdot accidents_i}$, где β – параметр чувствительности.

– $f_{cover}(cover_i) = cover_{quality} / 100$ (при 100 – отлично).

– $f_{restr}(restr_i) = 0$, если есть ограничения; 1 – если нет.

Весы α_k выбираются согласно специфике конкретной ДТИ.

Для связи $C_j(t)$ основными параметрами служат:

- средняя скорость движения v_j ;
- протяженность d_j ;
- среднее время в пути t_j ;
- доля времени с заторами $traffic_jam_j$;
- надежность связи ($availability_j$).

Расчет $C_j(t)$ осуществляется следующим образом:

$$C_j(t) = \beta_1 \cdot f_{vel}(v_j) + \beta_2 \cdot f_{trf}(traffic_jam_j) + \beta_3 \cdot f_{avail}(availability_j),$$

где:

$f_{vel}(v_j) = v_j / v_{ref}$, где v_{ref} – проектная/разрешенная скорость;

$f_{trf}(traffic_jam_j) = 1 - \text{доля времени в заторах}$;

$f_{avail}(availability_j) = 1$, если связь доступна (не перекрыта, не на ремонте); 0 – если нет.

β_k – веса критериев для связи, $\sum \beta_k = 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках настоящей работы была реализована системная модель ДТИ с расчетом индекса системной уравновешенности на базе

ГИС транспортного назначения ITSGIS. Реализация выполнена в виде отдельного плагина. Апробация модели проведена на данных городской сети г. Сургута (ХМАО) (рис. 1).

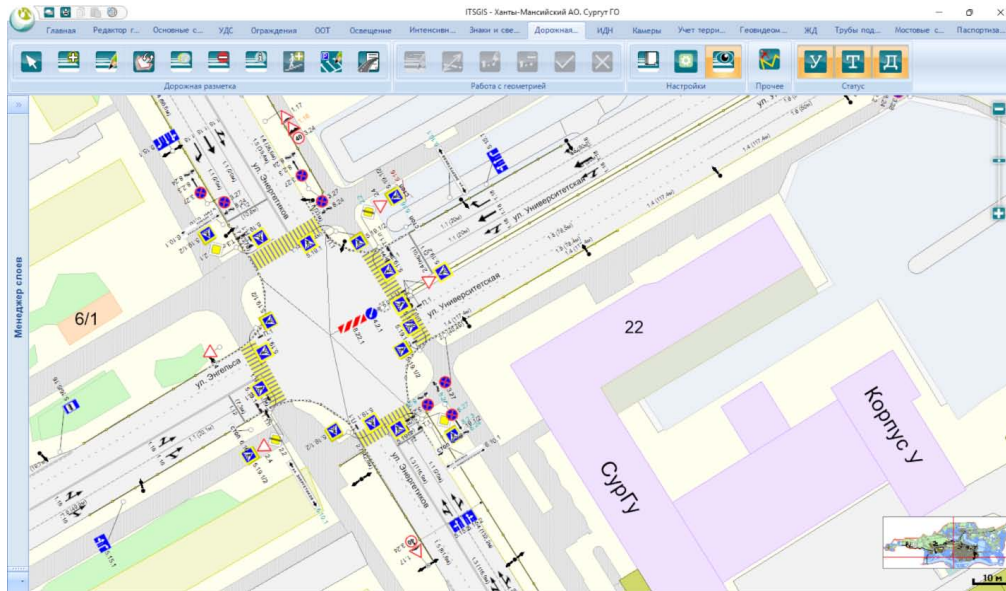


Рис. 1. Визуализация элементов дорожно-транспортной системы на основе ГИС
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В ходе реализации для пространственного моделирования использовалась интеграция географических слоев дорожной сети и транспортных объектов с атрибутивными данными о состоянии объектов и связей, поступающими из муниципальных и открытых источников. Для каждого элемента дорожной сети были рассчитаны параметры, такие как пропускная способность, аварийность, средняя загрузка, техническое состояние покрытия и наличие временных ограничений. ГИС автоматизированно генерирует граф транспортной сети, в котором каждому объекту и связи присваиваются нормированные оценки состояния (Q_i , C_j), рассчитанные по предложенным алгоритмам с учетом их весовой значимости. Индекс системной уравновешенности ISU определяется периодически или по мере поступления новых данных, что позволяет отслеживать текущий баланс и устойчивость функционирования инфраструктуры.

Визуализация состояния ДТИ реализована средствами ГИС в виде интерактивных карт, где объекты и связи с пониженными значениями индекса (Q_i , C_j) отмечаются цветом,

что позволяет выявлять участки с наибольшей нагрузкой, риском заторов или аварий, а также места плановых или экстренных ограничений. Для отдельных участков транспортной сети зафиксированы характерные изменения индекса ISU при наступлении событий: увеличение заторов в часы пик, снижение показателей из-за ДТП или проведения ремонта, восстановление уравновешенности после снятия ограничений.

В ходе экспериментальных наблюдений и анализа работы транспортной системы г. Сургута получены следующие результаты. В период утренних и вечерних пиковых нагрузок значение ISU снижалось на 10–20 % по сравнению с базовым уровнем, что отражало распространенные заторы на ключевых магистралях. После реализации схемы организации дорожного движения индекс ISU вырос на 7 %, что отразило снятие «узкого места» сети. Построенные временные ряды индекса ISU показали возможность раннего выявления деградации инфраструктурного состояния задолго до появления критических заторов и сбоев.

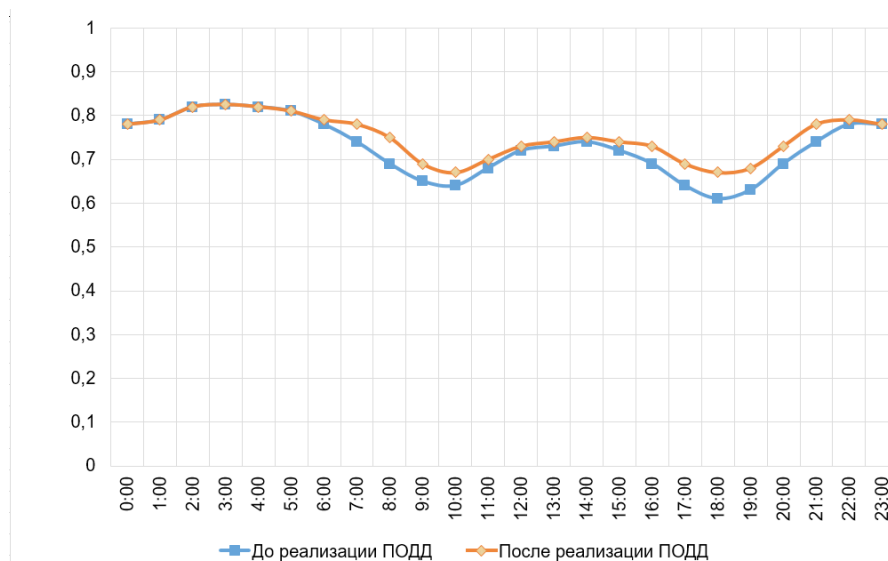


Рис. 2. График изменения индекса уравнищенности ISU до и после реализации мероприятий по организации дорожного движения

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

Таким образом, применение предложенной модели обеспечивает возможность перехода от реактивного к проактивному управлению: временные ряды ISU сигнализируют о деградации раньше, чем проявляются критические заторы, что открывает окно для своевременных мероприятий. В то же время следует отметить ограничения модели. Во-первых, точность ISU зависит от полноты и актуальности входных данных: неполная телеметрия, задержки обновления и разнородность источников могут вносить систематические смещения в нормированные оценки объектов и связей. Во-вторых, выбор весов для критериев и структурных элементов сети отражает локальные приоритеты и может требовать перекалибровки при переносе методики в другие города или при изменении транспортной политики. В-третьих, текущая версия не учитывает поведенческие адаптации водителей в ответ на информационные воздействия и редкие,

но значимые события (крупные перекрытия, погодные аномалии, культурно-массовые мероприятия), что может приводить к временной недооценке рисков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложена системная модель дорожно-транспортной инфраструктуры, позволяющая оценить интегральный показатель, отражающий гармоничность состояния объектов, процессов и явлений дорожно-транспортной инфраструктуры в различных условиях. Выполнена реализация предложенной модели в составе ГИС транспортного назначения на примере г. Сургута (ХМАО).

Направления дальнейших исследований связаны с совершенствованием средств мониторинга данных оперативной обстановки транспортных систем в целях повышения оперативности формирования индекса системной уравнищенности.

Список источников

1. Патраков П. А. Мониторинг инфраструктурных объектов с использованием информационных технологий // Вестник науки. 2025. Т. 2, № 5. С. 880–885.
2. Рахмангулов А. Н., Копылова О. А. Обзор методов и алгоритмов Big Data для решения задач

References

1. Patrakov P. A. Monitoring of infrastructure using information technology. *Vestnik nauki*. 2025;2(5):880–885. (In Russ.).
2. Rakhmangulov A., Kopylova O. Overview of Big Data methods and algorithms for solving problems of forecasting traffic flow parameters and

- прогнозирования параметров транспортных потоков и проектирования логистических систем // Недропользование и транспортные системы. 2024. Т. 14, № 2. С. 4–13.
3. Солдатенко И. А. Разработка интегральных показателей развития транспортной системы мегаполиса // Транспортное дело России. 2021. № 2. С. 163–167.
 4. Мхитарян С. В., Мусатова Ж. Б., Муртузалиева Т. В. и др. Методика оценки транспортной доступности капитальных объектов мегаполиса на основе геоинформационных данных // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2021. Т. 12, № 4. С. 400–415.
 5. Данович Л. М., Наумова Н. А. Прогнозирование исходных данных в динамическом режиме для модели распределения транспортных потоков по сети // Фундаментальные исследования. 2016. № 9–2. С. 238–242.
 6. Patel R. Application and future prospects of geographic information system (GIS) in intelligent transportation // Transactions on Computational and Scientific Methods. 2025. Vol. 5, no. 3.
 7. Abdullah A. F. Big data analytics for enhanced traffic flow optimization in urban transportation networks // Journal of Applied Cybersecurity Analytics, Intelligence, and Decision-Making Systems. 2024. Vol. 14, no. 12. P. 45–53.
 8. Li W., Batty M., Goodchild M. F. Real-time GIS for smart cities // International Journal of Geographical Information Science. 2020. Vol. 34, no. 2. P. 311–324.
 9. Дышленко С. Г. Применение географических информационных систем в интеллектуальных транспортных системах // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6, № 3. С. 32–37.
 10. Горбунов Р. Н., Пиров Ж. Т., Михайлов А. Ю. Оценка уровня обслуживания на основе критериев надежности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 10. С. 188–194.
 11. Патраков П. А. Информационные технологии в мониторинге транспортной инфраструктуры: современные решения и перспективы развития // Вестник науки. 2025. Т. 2, № 5. С. 862–867.
 12. Sun W., Bocchini P., Davison B. D. Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: The state of the art // Sustainable and Resilient Infrastructure. 2020. Vol. 5, no. 3. P. 168–199.
 13. Yuan H., Yang B. System dynamics approach for evaluating the interconnection performance of cross-border transport infrastructure // Journal of Management in Engineering. 2022. Vol. 38, no. 3.
 14. Ang K. L.-M., Seng J. K. P., Ngharamike E. et al. Emerging technologies for smart cities' transportation: Geo-information, data analytics and machine learning approaches // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. Vol. 11, no. 2.
 15. Ye X., Li S., Das S. et al. Enhancing routes selection with real-time weather data integration in spatial designing transportation and logistics systems. *Sub-surface Management and Transportation Systems*. 2024;14(2):4–13. (In Russ.).
 3. Soldatenko I. Creation of integral indicators of the megalopolis transport system development. *Transport Business in Russia*. 2021;(2):163–167. (In Russ.).
 4. Mkhitaryan S. V., Musatova Zh. B., Murtuzaliev T. V. et al. Methodology for assessing the transport accessibility of capital objects in a megacity based on geoinformation data. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2021;12(4):400–415. (In Russ.).
 5. Danovich L. M., Naumova N. A. Prediction of basic data for the model of distribution of network traffic flow in dynamic mode. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2016;(9–2):238–242. (In Russ.).
 6. Patel R. Application and future prospects of geographic information system (GIS) in intelligent transportation. *Transactions on Computational and Scientific Methods*. 2025;5(3).
 7. Abdullah A. F. Big data analytics for enhanced traffic flow optimization in urban transportation networks. *Journal of Applied Cybersecurity Analytics, Intelligence, and Decision-Making Systems*. 2024;14(12):45–53.
 8. Li W., Batty M., Goodchild M. F. Real-time GIS for smart cities. *International Journal of Geographical Information Science*. 2020;34(2):311–324.
 9. Dyshlenko S. G. Application of geographical information systems in intelligent transport systems. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog*. 2022;6(3):32–37. (In Russ.).
 10. Gorbunov R. N., Pirov Zh. T., Mikhailov A. Yu. Reliability-based assessment of service level. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(10):188–194. (In Russ.).
 11. Patrakov P. A. Information technologies in monitoring of transport infrastructure: Modern solutions and development prospects. *Vestnik nauki*. 2025;2(5):862–867. (In Russ.).
 12. Sun W., Bocchini P., Davison B. D. Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: The state of the art. *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2020;5(3):168–199.
 13. Yuan H., Yang B. System dynamics approach for evaluating the interconnection performance of cross-border transport infrastructure. *Journal of Management in Engineering*. 2022;38(3).
 14. Ang K. L.-M., Seng J. K. P., Ngharamike E. et al. Emerging technologies for smart cities' transportation: Geo-information, data analytics and machine learning approaches. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022;11(2).
 15. Ye X., Li S., Das S. et al. Enhancing routes selection with real-time weather data integration in spatial decision support systems. *Spatial Information Research*. 2024;32(4):373–381.
 16. Golovnin O. K., Chekina E. V., Ivanova D. M. Integrated monitoring of transport system performance

decision support systems // Spatial Information Research. 2024. Vol. 32, no. 4. P. 373–381.

16. Головнин О. К., Чекина Е. В., Иванова Д. М. Интегральный мониторинг показателей функционирования транспортных систем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2026. Т. 14, № 1.

Информация об авторах

О. К. Головнин – доктор технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-1418-2226>,
golovnin@bk.ru

Е. В. Чекина – ассистент;
<https://orcid.org/0000-0002-1345-2562>,
ev-chekina@yandex.ru✉

М. В. Шестакова – магистрант;
<https://orcid.org/0009-0007-1350-9112>,
mariaromanenko42494@gmail.com

Е. А. Тюлюнова – магистрант;
<https://orcid.org/0009-0003-4325-4297>,
etuylyunovagmail.com@mail.ru

indicators. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(1). (In Russ.).

About the authors

O. K. Golovnin – Doctor of Sciences (Engineering),
Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-1418-2226>,
golovnin@bk.ru

E. V. Chekina – Assistant Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-1345-2562>,
ev-chekina@yandex.ru✉

M. V. Shestakova – Master's Degree Student;
<https://orcid.org/0009-0007-1350-9112>,
mariaromanenko42494@gmail.com

E. A. Tyulyunova – Master's Degree Student;
<https://orcid.org/0009-0003-4325-4297>,
etuylyunovagmail.com@mail.ru

Научная статья

УДК 004.421.2+519.6-37

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-9>



Распределение защитников по целям с использованием «жадного» алгоритма на основе модели сканирующей системы на плоскости

Александр Анатольевич Дубанов

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Россия

Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача оперативного распределения ограниченного контингента защитников (мобильных агентов) между динамически изменяющимся множеством целей на плоскости. В условиях, когда количество объектов, требующих обслуживания или защиты, постоянно меняется (появляются новые или исчезают существующие цели), а ресурсы строго лимитированы, критически важным становится выбор оптимальной стратегии назначения. Для решения этой проблемы автором разработана имитационная модель сканирующей системы, которая осуществляет мониторинг пространственного положения целей в реальном времени.

Основой предложенного подхода является использование «жадного» алгоритма (greedy algorithm), который на каждом шаге моделирования принимает локально оптимальное решение о назначении защитника на наиболее приоритетную цель. Научная новизна работы заключается в органичной интеграции этого алгоритма с динамической матрицей стоимостей. Данная матрица не является статичной, а пересчитывается для каждой итерации с учетом текущих координат целей, их важности и доступности, что позволяет системе адаптироваться к изменениям обстановки. Существенным вкладом в развитие темы также является создание комплексной визуализационной системы. В отличие от существующих аналогов, она позволяет одновременно отображать не только пространственное распределение участников (защитников и целей), но и текущее состояние матрицы стоимостей, а также визуализировать логику принятия решений по назначению.

Практическая значимость проведенного исследования выходит далеко за рамки сугубо оборонительных задач. Разработанный вычислительный метод может быть эффективно применен в гражданских секторах, таких как логистика (для распределения ограниченного парка курьеров по поступающим заказам), управление группами мобильных роботов (организация патрулирования или взаимодействия), а также в системах мониторинга и оповещения, где необходимо оперативно реагировать на инциденты. Таким образом, работа представляет собой готовый прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений для широкого класса задач распределения ресурсов в нестационарной среде.

Ключевые слова: жадный алгоритм, распределение ресурсов, динамическая модель, матрица стоимостей, визуализация, сканирующая система, MATLAB

Для цитирования: Дубанов А. А. Распределение защитников по целям с использованием «жадного» алгоритма на основе модели сканирующей системы на плоскости // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 82–91. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-9>.

Original article

Distribution of defenders among targets using greedy algorithm based on model of scanning system on plane

Alexander A. Dubanov

Buryat State University named after D. Banzarov, Ulan-Ude, Russia

Abstract. The article examines the pressing problem of rapidly distributing a limited contingent of defenders (mobile agents) among a dynamically changing set of targets on a plane. In conditions where the number of objects requiring maintenance or protection is constantly changing (new targets appear or existing ones disappear), and resources are strictly limited, choosing an optimal assignment strategy becomes critical. To address this problem, the author develops a simulation model of a scanning system that monitors the spatial position of targets in real time.

The proposed approach is based on the use of a greedy algorithm, which makes a locally optimal decision at each simulation step regarding the assignment of a defender to the highest-priority target. The scientific novelty of this work lies in the seamless integration of this algorithm with a dynamic cost matrix. This matrix is not static, but is recalculated for each iteration, taking into account the current coordinates of targets, their importance, and availability, allowing the system to adapt to changing circumstances. A significant contribution to the development of this topic is the creation of a comprehensive visualization system. Unlike existing analogs, it allows for the simultaneous display of not only the spatial distribution of participants (defenders and targets), but also the current state of the cost matrix, as well as visualization of the decision-making logic for assignment.

The practical significance of this research extends far beyond purely defensive tasks. The developed computational method can be effectively applied in civilian sectors, such as logistics (for distributing a limited number of couriers to incoming orders), managing groups of mobile robots (organizing patrols or interactions), and in monitoring and alerting systems where rapid response to incidents is required. Thus, the work represents a ready-made prototype of an intelligent decision support system for a wide range of resource allocation problems in a non-stationary environment.

Keywords: greedy algorithm, resource allocation, dynamic model, cost matrix, visualization, scanning system, MATLAB

For citation: Dubanov A. A. Distribution of defenders among targets using greedy algorithm based on model of scanning system on plane. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):82–91. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-9>.

ВВЕДЕНИЕ

Распределение ограниченных ресурсов между множеством целей в динамически изменяющейся среде представляет собой актуальную задачу в различных прикладных областях, таких как логистика, управление транспортными потоками, распределение вычислительных ресурсов и координация групп роботов [1, 2]. Эффективное решение подобных задач требует не только точности назначения, но и высокой скорости принятия решений, а также наглядного представления процесса.

Одним из наиболее распространенных подходов к решению задач распределения является применение «жадных» алгоритмов, которые на каждом шаге выбирают локально оптимальное решение [3, 4]. Хотя такие алгоритмы не всегда гарантируют глобальный оптимум, они обладают низкой вычислительной

сложностью и простотой реализации, что делает их применимыми в системах реального времени [5].

В задачах динамического распределения ресурсов, где цели непрерывно перемещаются и изменяют свои параметры, важную роль играет возможность визуализации процесса в реальном времени [6]. Это позволяет не только контролировать корректность работы алгоритмов, но и анализировать их поведение в различных сценариях. Современные подходы к распределению ресурсов часто сочетают алгоритмические методы с интерактивными системами визуализации [7, 8].

Моделирование движения целей со случайными траекториями представляет отдельный интерес, так как позволяет исследовать устойчивость алгоритмов распределения к неопределенности [9]. В работах [10, 11]

рассматриваются различные подходы к моделированию случайных траекторий в задачах мониторинга и сопровождения.

Для задач распределения с ограничениями по расстоянию (когда защитники могут взаимодействовать только с целями в определенном радиусе) эффективным подходом является использование матриц стоимостей с бесконечными значениями для недостижимых пар [12]. Это позволяет формализовать ограничения и интегрировать их в алгоритмы оптимизации.

В данной работе представлена модель сканирующей системы на плоскости, которая отслеживает перемещение целей, вычисляет динамическую матрицу стоимостей и распределяет защитников по целям с использованием жадного алгоритма. Разработанная система включает комплексную визуализацию процесса и позволяет исследовать влияние различных параметров на эффективность распределения. Особенностью предлагаемого подхода является интеграция алгоритма распределения с полномасштабной системой моделирования и визуализации, что представляет интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения [13–15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи

Пусть в двумерной области размером 200×200 единиц расположена сканирующая система (радар) с радиусом действия 100 единиц. В области появляются и движутся цели (цели) различных классов: дроны, самолеты, ракеты. Каждый класс характеризуется скоростью движения, приоритетом и вероятностью появления. Также в области размещены защитники в количестве 10 единиц, расположенные в круге радиусом 75 единиц с центром в позиции сканирующей системы. Каждый защитник имеет ограниченный радиус действия (80 единиц).

Необходимо в реальном времени распределить защитников по видимым целям таким

образом, чтобы минимизировать суммарное расстояние между назначенными парами «защитник – цель», при этом каждый защитник может быть назначен не более чем на одну цель, а каждая цель – не более чем на одного защитника. Цель считается видимой, если она находится в радиусе действия сканирующей системы.

Пусть нам известно:

- позиции защитников: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$, $p_i \in \mathbb{R}^2$;
- позиции целей: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_M\}$, $t_j \in \mathbb{R}^2$;
- радиус действия защитников: R_d ;
- матрица стоимостей: $C \in \mathbb{R}^{N \times M}$, где
$$c_{ij} = \begin{cases} \|p_i - t_j\|, & \text{если } \|p_i - t_j\| \leq R_d \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}$$

Найти биективное соответствие $A : P \rightarrow T \cup \{0\}$, максимизирующее количество назначений и минимизирующее суммарную стоимость выбранных пар, где $A(i) = j$ означает назначение i -го защитника на j -й цель, а $A(i) = 0$ – отсутствие назначения.

2. Методика решения

Общая архитектура системы состоит из двух основных компонентов:

- Основная программа моделирования (*Radar_with_Defenders_Greedy.m*) [16] – реализует динамическую модель среды, управление целями, вычисление матриц стоимостей, визуализацию и вызов алгоритма распределения.

- Функция «жадного» распределения (*Greedy_Pursuit.m*) [17] – реализует собственный алгоритм назначения защитников на цели на основе матрицы стоимостей.

Функция *Greedy_Pursuit.m* реализует классический «жадный» алгоритм для задачи назначения. Алгоритм работает следующим образом:

- создается список всех возможных пар «защитник – цель» с указанием стоимости;
- сортируются по возрастанию стоимости;
- последовательно просматриваются отсортированные пары; если защитник и цель в паре еще не заняты, они связываются;

– алгоритм завершается, когда все защитники или все цели назначены.

Блок-схема «жадного» алгоритма, реализованного в функции **Greedy_Pursuit.m** (рис. 1) (отметим, что при вызове функции **Greedy_Pursuit.m** из основной программы роли «преследователей» заменяются ролями «защитников»):

Основная программа реализует пошаговую симуляцию на 100 шагов. На каждом шаге выполняются следующие действия:

– каждая цель перемещается согласно текущему вектору скорости; с заданной вероятностью (0,3) направление и скорость случайно изменяются;

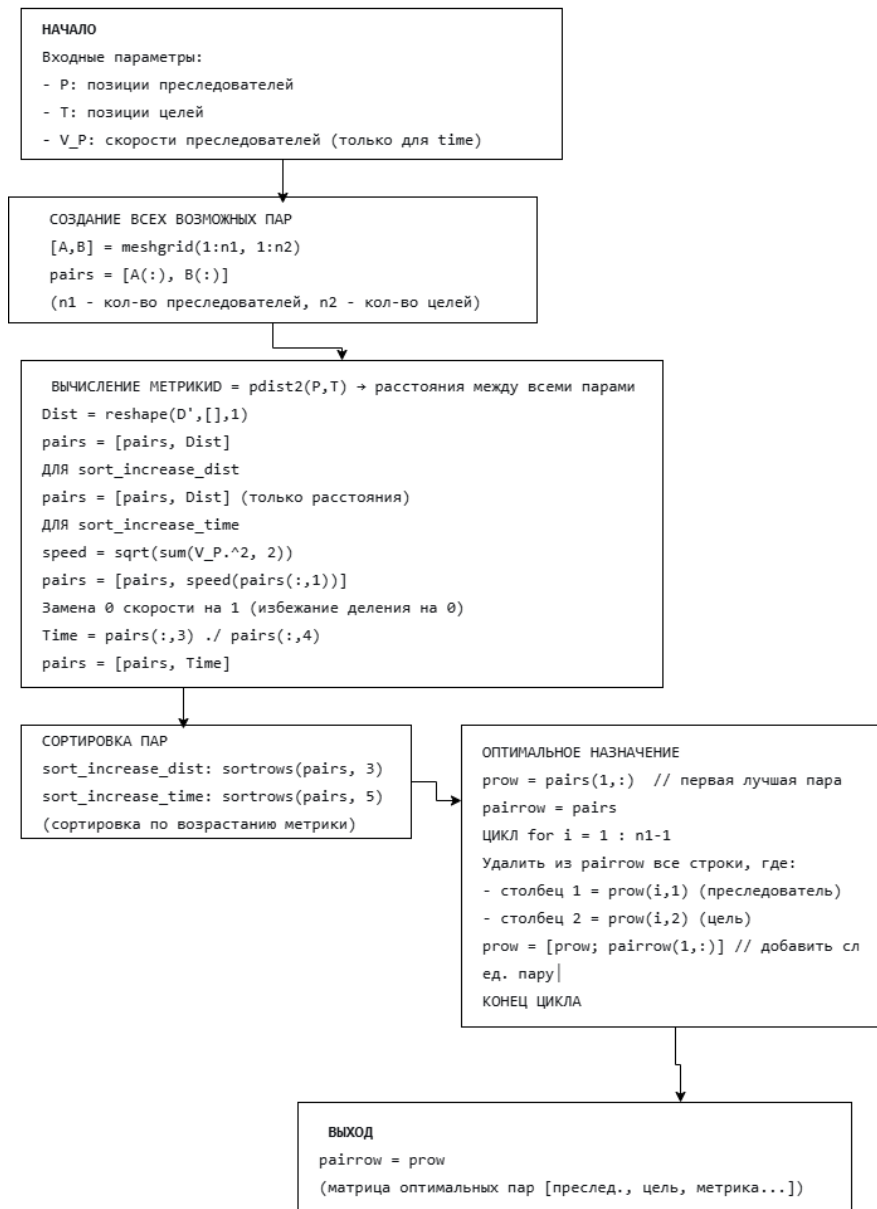


Рис. 1. Блок-схема алгоритма **Greedy_Pursuit.m**

Примечание: составлено автором.

– с вероятностью 0,1 появляется новый цель на границе области; класс цели выбирается случайно с учетом заданных вероятностей;

– для каждой цели вычисляется расстояние до сканирующей системы и стоимость,

зависящая от расстояния и приоритета класса;

– цели, находящиеся вне радиуса действия сканирующей системы, исключаются из рассмотрения;

– строится матрица $N \times M$, где элемент (i, j) равен расстоянию между i -м защитником и j -й целью, если цель находится в радиусе действия защитника, и ∞ в противном случае;

– функция ***Greedy_Pursuit.m*** вызывается с полученной матрицей стоимостей.

Обновляются четыре окна отображения:

– основное окно: показывает позиции сканирующей системы, защитников, целей, траектории движения и линии назначений;

– окно матрицы стоимостей сканирующей системы: табличное представление данных;

– окно матрицы расстояний «защитник – цель»: таблица с расстояниями и выделенными назначениями;

– окно назначения защитников на соответственные цели.

На каждом шаге сохраняются матрицы стоимостей, результаты обнаружения и назначений.

На рис. 2 представлена блок-схема основной программы распределения защитников по целям:

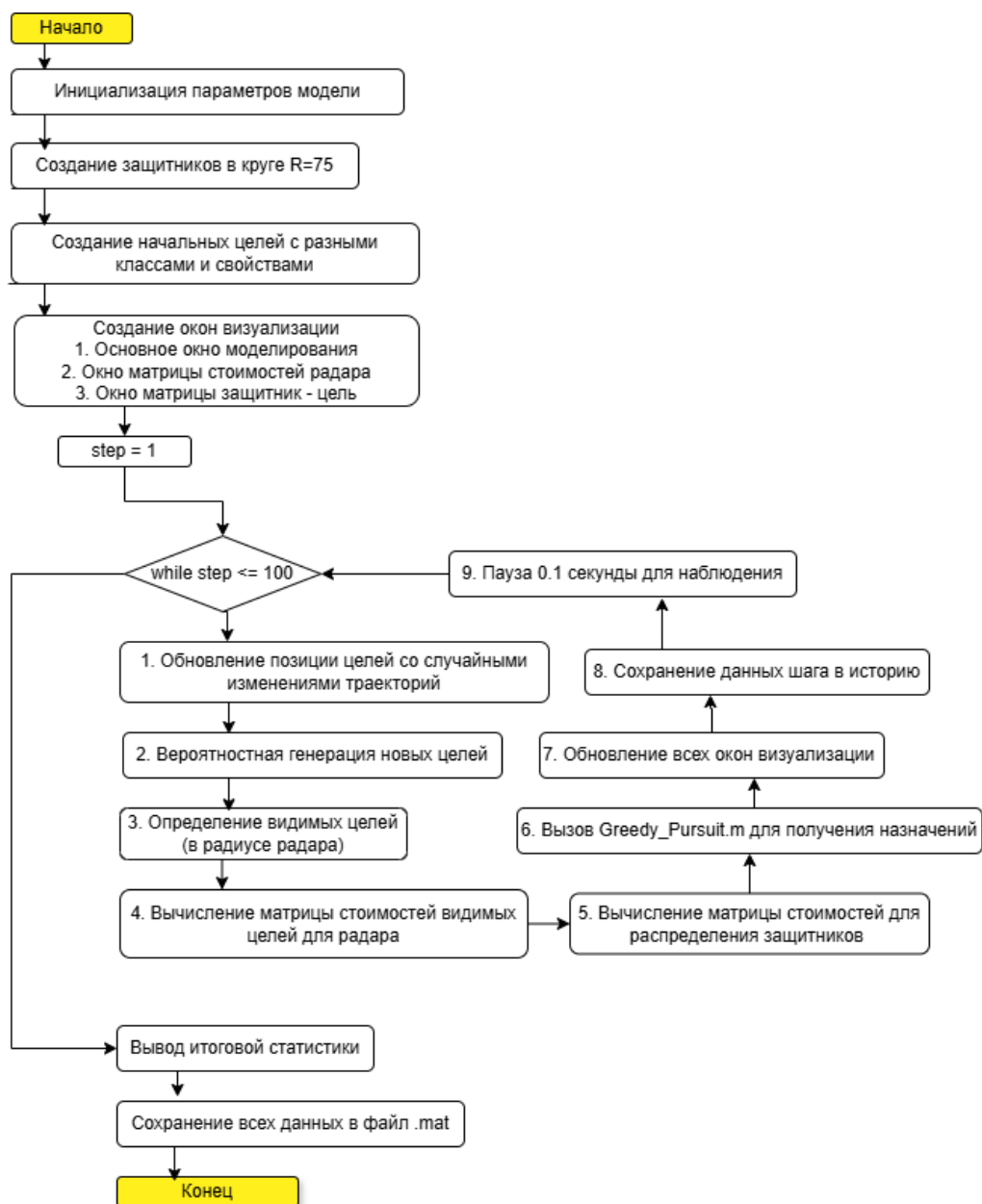


Рис. 2. Основная программа распределения защитников по целям

Примечание: составлено автором.

Система включает четыре независимых окна визуализации. Основное окно моделирования отображает пространственное расположение

всех целей, траектории движения, зоны действия сканирующей системы и защитников, а также линии назначений (рис. 3).

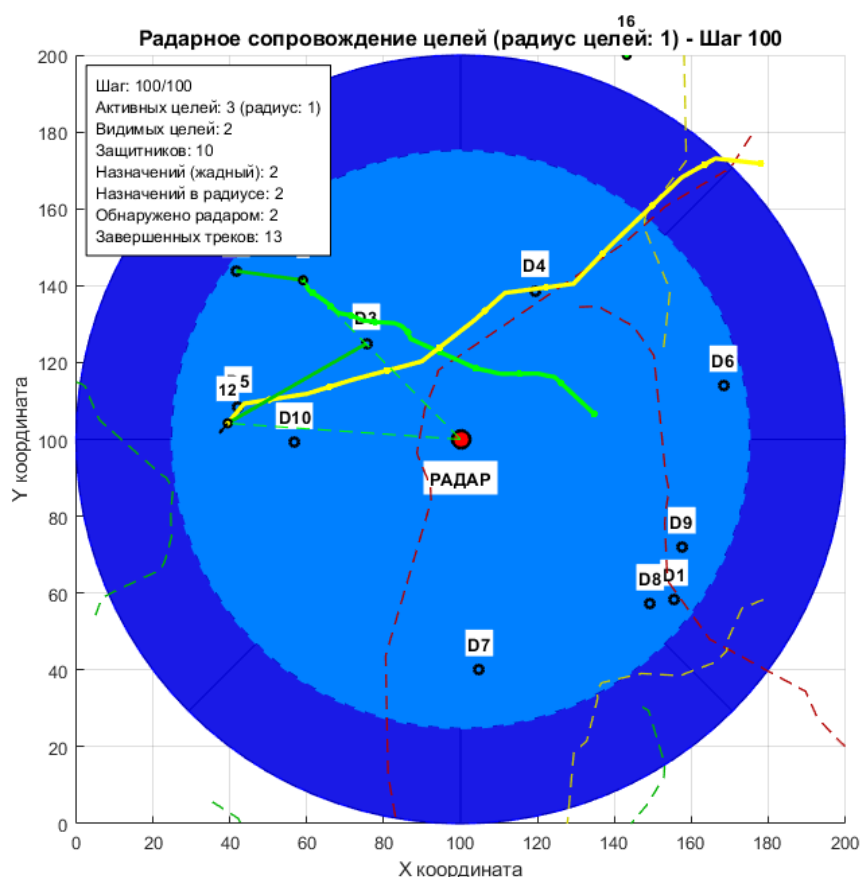


Рис. 3. Визуализация модели радара на плоскости

Примечание: составлено автором.

Окно матрицы стоимостей сканирующей системы представляет данные в табличном виде (ID цели, класс, координаты, расстояние, стоимость) (рис. 4).

ID	Класс	X	Y	Расстояние	Стоимость
7	drone	59.0441	141.4096	58.2421	2.5755
12	aircraft	39.4464	104.1892	60.6984	3.2950
16	drone	143.2255	200	108.9424	0

Рис. 4. Динамическая матрица стоимостей радара

Примечание: составлено автором.

Окно матрицы расстояний «защитник – цель» показывает расстояния между всеми защитниками и видимыми целями, с цветовым кодированием и выделением назначенных пар (рис. 5).

Защ\Цели	Цель7	Цель12
Защ\Цели	Цель7	Цель12
D1	127.4	124.8
D2	17.6*	39.7
D3	23.3	41.6*
D4	60.4	87.1
D5	36.9	5.2
D6	112.7	129.3
D7	111.3	91.7
D8	123.5	119.5
D9	120.5	122.4
D10	42.3	18.0

Рис. 5. Динамическая матрица стоимостей «защитник – цель»

Примечание: составлено автором.

Окно распределения защитников по целям в соответствии с «жадным» алгоритмом (рис. 6).

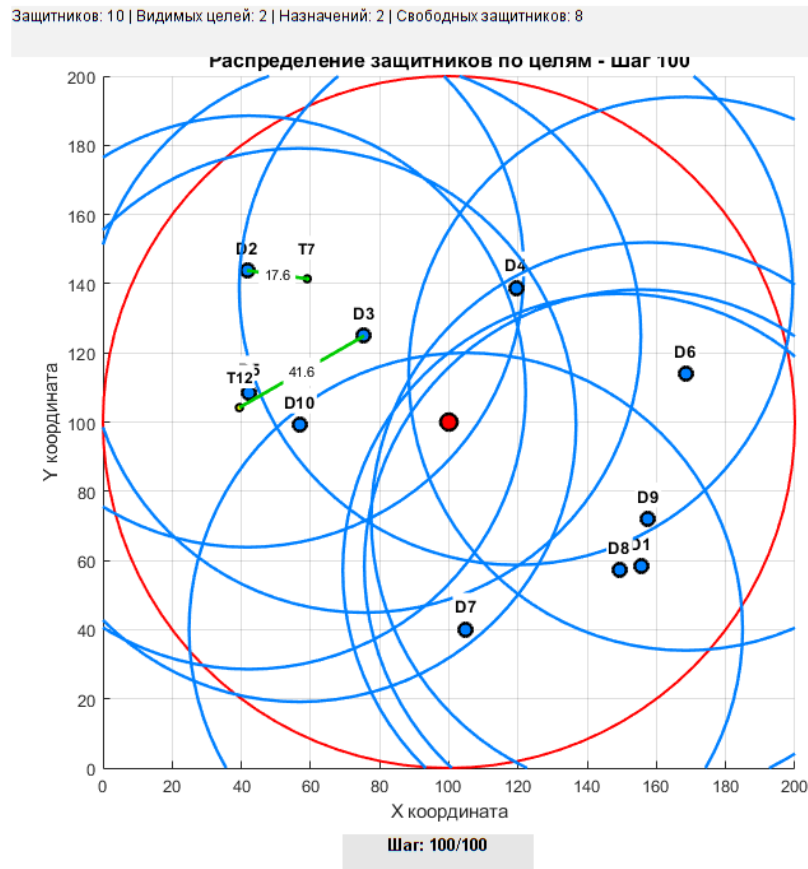


Рис. 6. Результаты распределения защитников по целям

Примечание: составлено автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении вычислительного эксперимента использовались следующие параметры: размер области: 200×200 единиц, радиус действия сканирующей системы: 100 единиц, количество защитников: 10, радиус действия защитников: 80 единиц, максимальное количество целей: 15, начальное количество целей: 8, количество шагов моделирования: 100, радиус отображения целей: 1 единица (параметр, легко изменяемый).

Модель успешно работает в реальном времени, обеспечивая:

- плавное движение целей со случайными изменениями траекторий;
- динамическое обновление матриц стоимостей на каждом шаге;
- корректное распределение защитников по целям с использованием «жадного» алгоритма;

– наглядную визуализацию всех аспектов процесса в четырех синхронизированных окнах.

На каждом шаге система назначает в среднем 5–7 защитников на цели (в зависимости от количества видимых целей). Время выполнения одного шага моделирования (включая визуализацию) составляет менее 0,2 секунды на стандартном ПК, что подтверждает применимость подхода для систем, работающих в режиме, близком к реальному времени.

Жадный алгоритм обеспечивает приемлемое качество распределения при минимальных вычислительных затратах. В среднем суммарное расстояние назначенных пар составляет 70–80 % от теоретического минимума, полученного путем полного перебора на небольшом наборе тестовых данных. Это подтверждает практическую применимость алгоритма в динамических условиях, где важна скорость принятия решений.

Основное преимущество реализованного подхода – его интерактивность и наглядность. Исследователь может в реальном времени наблюдать, как изменение параметров (радиуса целей, количества защитников, вероятностных характеристик) влияет на процесс распределения.

Результаты работы представленной модели можно проиллюстрировать следующими анимированными изображениями:

- модель работы радара на плоскости с обнаружением целей и сохранением треков [18];
- динамическая матрица стоимостей радара [19];
- динамическая матрица стоимостей «защитник – цель» [20];
- результат распределения защитников по целям [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью данной работы была реализация «жадного» алгоритма с использованием радара, запоминающего треки динамических целей. Возможность запоминания треков позволяет вводить для целей идентификационные номера.

В работе представлена комплексная модель распределения защитников по целям на основе «жадного» алгоритма, интегрированная с системой сканирования на плоскости. *Научная новизна заключается в создании динамической системы, которая:*

- объединяет моделирование движения целей, вычисление адаптивной матрицы стоимостей и жадный алгоритм распределения.
- предоставляет многооконную визуализацию, позволяющую одновременно наблюдать

пространственное распределение, численные данные и результаты назначения.

- позволяет исследовать влияние различных параметров на процесс распределения в интерактивном режиме.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанной модели в различных прикладных областях:

- логистика: распределение транспортных средств по заказам;
- управление роботизированными системами: координация группы дронов для мониторинга;
- распределение вычислительных ресурсов в облачных системах;
- системы видеонаблюдения и мониторинга.

Дальнейшее развитие модели может включать:

- реализацию более сложных алгоритмов распределения (венгерский алгоритм, генетические алгоритмы) для сравнения эффективности;
- учет дополнительных факторов: энергопотребление защитников, время выполнения задач, приоритеты целей;
- расширение до трехмерного пространства;
- интеграцию с системами машинного обучения для прогнозирования движения целей.

Представленная модель служит эффективным инструментом как для исследований в области алгоритмов оптимизации, так и для практического применения в задачах динамического распределения ресурсов.

Список источников

1. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L. et al. Introduction to algorithms. 3rd ed. Cambridge, MA : The MIT Press, 2009. 1292 p.
2. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. Combinatorial optimization: Algorithms and complexity. Mineola, NY : Dover Publications, 1998. 528 p.
3. Bertsekas D. P. Network optimization: Continuous and discrete models. Belmont, MA : Athena Scientific, 1998. 593 p.

References

1. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L. et al. Introduction to algorithms. 3rd ed. Cambridge, MA: The MIT Press; 2009. 1292 p.
2. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. Combinatorial optimization: Algorithms and complexity. Mineola, NY: Dover Publications; 1998. 528 p.
3. Bertsekas D. P. Network optimization: Continuous and discrete models. Belmont, MA: Athena Scientific; 1998. 593 p.

4. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem // *Naval Research Logistics Quarterly*. 1955. Vol. 2, no. 1–2. P. 83–97.
5. Burkard R., Dell’Amico M., Martello S. Assignment problems. Philadelphia, PA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. 382 p.
6. Zavlanos M. M., Spesivtsev L., Pappas G. J. A distributed auction algorithm for the assignment problem // *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, December 9–11, 2008, Cancun, Mexico. Piscataway, NJ : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. P. 1212–1217.
7. Choi H. L., Brunet L., How J. P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation // *IEEE Transactions on Robotics*. 2009. Vol. 25, no. 4. P. 912–926.
8. Michael N., Zavlanos M. M., Kumar V. et al. Distributed multi-robot task assignment and formation control // *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 19–23, 2008, Pasadena. New York, NY : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. P. 128–133.
9. Enright J. J., Frazzoli E., Pavone M. et al. UAV routing and coordination in stochastic, dynamic environments // *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles* / K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos, eds. Dordrecht : Springer, 2015. P. 2079–2109. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_28.
10. Beard R. W., McLain T. W., Nelson D. B. et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs // *Proceedings of the IEEE*. 2006. Vol. 94, no. 7. P. 1306–1324.
11. Savla K., Frazzoli E., Bullo F. Traveling salesperson problems for the Dubins vehicle // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008. Vol. 53, no. 6. P. 1378–1391.
12. Otte M., Correll N. Any-com multi-robot path-planning with dynamic teams: Multi-robot coordination under communication constraints // *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2014. Vol. 79. P. 743–757.
13. Khamis A., Hussein A., Elmogy A. Multi-robot task allocation: A review of the state-of-the-art // *Cooperative Robots and Sensor Networks* / A. Koubâa, J. R. Martínez-de Dios, eds. Cham : Springer, 2015. P. 31–51.
14. Gerkey B. P., Mataric M. J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems // *The International Journal of Robotics Research*. 2004. Vol. 23, no. 9. P. 939–954.
15. Liu L., Shell D. A. Large-scale multi-robot task allocation via dynamic partitioning and distribution // *Autonomous Robots*. 2012. Vol. 33, no. 3. P. 291–307.
16. Программа распределения защитников по целям при моделировании радара на плоскости на основе «жадного» алгоритма. URL: https://github.com/dubanovaalex67-eng/Modeling/blob/main/Radar_with_Defenders_Greedy.m (дата обращения: 7.02.2026).
4. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1955;2(1–2):83–97.
5. Burkard R., Dell’Amico M., Martello S. Assignment problems. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2009. 382 p.
6. Zavlanos M. M., Spesivtsev L., Pappas G. J. A distributed auction algorithm for the assignment problem. In: *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, December 9–11, 2008, Cancun, Mexico. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2008. p. 1212–1217.
7. Choi H. L., Brunet L., How J. P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation. *IEEE Transactions on Robotics*. 2009;25(4):912–926.
8. Michael N., Zavlanos M. M., Kumar V. et al. Distributed multi-robot task assignment and formation control. In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 19–23, 2008, Pasadena. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2008. p. 128–133.
9. Enright J. J., Frazzoli E., Pavone M. et al. UAV routing and coordination in stochastic, dynamic environments. In: K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos, eds. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht: Springer; 2015. p. 2079–2109. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_28.
10. Beard R. W., McLain T. W., Nelson D. B. et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs. *Proceedings of the IEEE*. 2006;94(7):1306–1324.
11. Savla K., Frazzoli E., Bullo F. Traveling salesperson problems for the Dubins vehicle. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008;53(6):1378–1391.
12. Otte M., Correll N. Any-com multi-robot path-planning with dynamic teams: Multi-robot coordination under communication constraints. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2014;79:743–757.
13. Khamis A., Hussein A., Elmogy A. Multi-robot task allocation: A review of the state-of-the-art. In: A. Koubâa, J. R. Martínez-de Dios, eds. *Cooperative Robots and Sensor Networks*. Cham: Springer; 2015. p. 31–51.
14. Gerkey B. P., Mataric M. J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *The International Journal of Robotics Research*. 2004;23(9):939–954.
15. Liu L., Shell D. A. Large-scale multi-robot task allocation via dynamic partitioning and distribution. *Autonomous Robots*. 2012;33(3):291–307.
16. Программа распределения защитников по целям при моделировании радара на плоскости на основе «жадного» алгоритма. URL: https://github.com/dubanovaalex67-eng/Modeling/blob/main/Radar_with_Defenders_Greedy.m (accessed: 7.02.2026). (In Russ.).
17. Программа-функция “zhadnogo” алгоритма. URL: <https://github.com/dubanovaalex67-eng/Modeling/>

17. Программа-функция «жадного» алгоритма. URL: https://github.com/dubanovalex67-eng/Modeling/blob/main/Greedy_Pursuit.m (дата обращения: 7.02.2026).
18. Видео, результат моделирования работы радара на плоскости. URL: <https://vimeo.com/1162478327?share=copy&fl=sv&fe=ci> (дата обращения: 7.02.2026).
19. Видео, динамическая матрица стоимостей радара. URL: <https://vimeo.com/1162481636?share=copy&fl=sv&fe=ci> (дата обращения: 7.02.2026).
20. Видео, динамическая матрица стоимостей «защитник – цель». URL: <https://vimeo.com/1162480737?share=copy&fl=sv&fe=ci> (дата обращения: 7.02.2026).
21. Видео, результат распределения защитников по целям. URL: <https://vimeo.com/1162481876?share=copy&fl=sv&fe=ci> (дата обращения: 7.02.2026).
- blob/main/Greedy_Pursuit.m (accessed: 7.02.2026). (In Russ.).
18. Video, rezultat modelirovaniya raboty radara na ploskosti. URL: <https://vimeo.com/1162478327?share=copy&fl=sv&fe=ci> (accessed: 7.02.2026). (In Russ.).
19. Video, dinamicheskaya matritsa stoimostey radara. URL: <https://vimeo.com/1162481636?share=copy&fl=sv&fe=ci> (accessed: 7.02.2026). (In Russ.).
20. Video, dinamicheskaya matritsa stoimostey “zashchitnik – tsel”. URL: <https://vimeo.com/1162480737?share=copy&fl=sv&fe=ci> (accessed: 7.02.2026). (In Russ.).
21. Video, rezultat raspredeleniya zashchitnikov po tsel'ям. URL: <https://vimeo.com/1162481876?share=copy&fl=sv&fe=ci> (accessed: 7.02.2026). (In Russ.).

Информация об авторе

А. А. Дубанов – кандидат технических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-1855-2562>,
dubanov.alex.67@gmail.com

About the author

A. A. Dubanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;
<https://orcid.org/0000-0002-1855-2562>,
dubanov.alex.67@gmail.com

Научная статья

УДК 681.5.01:004.896

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-10>



Нейросетевое оценивание состояния и оптимизационный синтез распределенного управления роем мобильных роботов в условиях неопределенности

**Сергей Евгеньевич Кондратьев[✉], Николай Вадимович Казюра,
Виктор Николаевич Мещеряков**

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача распределенного управления группой мобильных роботов, осуществляющих коллективное движение в трехмерной среде с препятствиями при ограниченном обмене информацией между агентами. Актуальность обусловлена необходимостью координации роя в условиях эпизодической доступности данных о состоянии соседей. Целью исследования является разработка распределенного регулятора, реализующего правила коллективного движения и обеспечивающего безопасность перемещения при неполной наблюдаемости. Предложен метод, объединяющий обучаемый оценщик состояния на основе полносвязной нейронной сети, аппроксимирующий фильтр частиц с одновременной оценкой неопределенности, и оптимизационный регулятор на основе функций барьерного управления и функций управления Ляпунова. По результатам моделирования установлено, что нейросетевой оценщик обеспечивает точность, сопоставимую с классическими методами фильтрации, при вычислительных затратах на один-два порядка ниже. Взвешенный центроид, учитывающий надежность оценок, уменьшает ошибку координации. Результаты применимы при проектировании систем управления многороботными группами.

Ключевые слова: распределенное управление, рой мобильных роботов, оценивание состояния, нейронные сети, функции барьерного управления, функции управления Ляпунова, коллективное движение, фильтр частиц, оценка неопределенности

Для цитирования: Кондратьев С. Е., Казюра Н. В., Мещеряков В. Н. Нейросетевое оценивание состояния и оптимизационный синтез распределенного управления роем мобильных роботов в условиях неопределенности // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 92–101. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-10>.

Original article

Neural state estimation and optimization synthesis of flocking control for mobile robots swarm under uncertainty

Sergei E. Kondratev[✉], Nikolay V. Kazyura, Victor N. Meshcheryakov
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. The paper addresses the flocking control problem for groups of mobile robots collectively moving in a three-dimensional environment with obstacles under limited communication between agents. The research relevance lies in the need for swarm coordination given intermittent interaction between an agent and those inside its communication range, i.e. neighbors. In this article, the goal is to create a flocking controller that adheres to collective motion principles while maintaining safety in conditions of limited visibility. The authors propose a method that integrates a learned state estimator based on a fully connected neural network, approximating the particle filter with simultaneous uncertainty evaluation, and an optimization regulator with a control barrier function and a control-Lyapunov function. The simulation reveals that the neural network estimator ensures accuracy comparable to traditional filtration techniques

at a computational cost one to two orders of magnitude lower. In addition, the weighted centroid, which considers estimation reliability, reduces the possibility of coordination errors. Results can be applied in designing multi-robot group control systems.

Keywords: flocking control, mobile robots swarm, state estimation, neural networks, control barrier function, control-Lyapunov function, collective motion, particle filter, uncertainty evaluation

For citation: Kondratev S. E., Kazyura N. V., Meshcheryakov V. N. Neural state estimation and optimization synthesis of flocking control for mobile robots swarm under uncertainty. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):92–101. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-10>.

ВВЕДЕНИЕ

Рост интереса к совместной работе много-роботных систем обусловил расширение их применения в задачах слежения [1], разведки [2], сельского хозяйства [3]. Распределенные решения исключают центральный контроллер, уменьшают вычислительную нагрузку и устраняют единую точку отказа, однако требуют согласованной координации агентов на основе межагентного обмена данными. Ошибки измерений и задержки связи ограничивают применимость традиционных методов [4]. Байесовские оценщики [5] плохо масштабируются при множественных целях. Сверхширокополосные датчики [6] и методы визуальной локализации [7] решают задачу обнаружения, но не координации.

Роевание – эмерджентное поведение больших согласованно движущихся групп [8]. Правила Рейнольдса [9] определяют три локальных правила: *сплоченность* (стремление к центру группы), *выравнивание* (согласование направления с соседями), *разделение* (предотвращение столкновений). Эти принципы широко используются в многороботных системах [10, 11]. В [12] предложен потенциальный подход для трехмерного случая без гарантий минимальной дистанции; в [13] задача решена обучением с подкреплением без гарантий безопасности.

Функции барьерного управления (далее – ФБУ) – скалярные функции, нулевое надмножество которых задает границу безопасной области; выполнение условия неотрицательности производной Ли ФБУ гарантирует прямую инвариантность безопасного множества и предотвращение столкновений. Функции

управления Ляпунова (далее – ФУЛ) – положительно определенные скалярные функции, убывание которых вдоль траекторий обеспечивает асимптотическую стабилизацию к желаемому состоянию [14, 15]. ФБУ и ФУЛ объединяются в единую задачу квадратичного программирования с приоритетом безопасности [15, 16]. Однако большинство работ предполагает устойчивый обмен данными между роботами.

В данной работе допускается потеря контакта с частью соседей, а возрастающая неопределенность их состояний явно учитывается в координации. Вклад работы состоит в следующем. (1) Разработан обучаемый оценщик состояния и неопределенности – полносвязная нейронная сеть (28 входов, 512 скрытых нейронов, 14 выходов, PyTorch), аппроксимирующая фильтр частиц ($N_p = 500$) с вычислительными затратами 0,089–0,120 мс (против 12–127 мс у фильтра частиц при N от 10 до 100). (2) Разработана распределенная стратегия роевания на основе ФБУ–ФУЛ, в которой центроид группы вычисляется с весами $\lambda_j = 1 / \text{tr}(\Sigma_j)$, обратно пропорциональными следу ковариационной матрицы, что снижает ошибку координации приблизительно в 1,5 раза по сравнению с невзвешенным центроидом при $N = 40$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. Рассматривается N мобильных роботов в трехмерной среде с N_{obs} препятствиями (вертикальными столбами). Состояние робота: вектор $\chi = [\mathbf{p}; \theta] \in \mathbb{R}^4$, где $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z]^T \in \mathbb{R}^3$ – положение, скаляр $\theta \in [0, 2\pi)$ – направление в плоскости xy .

Управление: вектор $\mathbf{u} = [\mathbf{v}; \omega] \in \mathbb{R}^4$ (линейная скорость $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$, угловая скорость – скаляр ω). Динамика – простой интегратор (частный случай управление-аффинной формы (3) при $\mathbf{f} = \mathbf{0}$, $\mathbf{g} = \mathbf{I}$):

$$\dot{\chi} = \mathbf{u}. \quad (1)$$

Информация от робота j доступна роботу i с вероятностью:

$$\varphi(d_{ij}) = \begin{cases} \varphi_{\max}(1 - d_{ij} / R_s), & d_{ij} \leq R_s, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где скаляр $d_{ij} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|$ – евклидово расстояние (норма разности векторов положений); скаляр $R_s > 0$ – дальность обнаружения; скаляр $\varphi_{\max} \in [0, 1]$ – максимальная вероятность. Использование $\varphi_{\max} < 1$ моделирует перекрытие прямой видимости (экранирование) и пропуски обнаружений. Полученная информация: $\mathbf{r}_j = \chi_j + \mathbf{p}$, где $\mathbf{p} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma_M)$ – вектор гауссова шума, $\Sigma_M \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ – ковариационная матрица.

Цель – синтезировать распределенный регулятор $\mathbf{u}_i(\chi_i, \{\hat{\chi}_j, \Sigma_j\}_{j \in D_i})$, реализующий правила Рейнольдса при неопределенности в оценках состояния соседей, с обеспечением безопасности перемещения (предотвращения столкновений).

Основные определения. Липшицева непрерывность: функция $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ липшицево непрерывна, если $\exists L > 0: \|f(\mathbf{x}) - f(\mathbf{y})\| \leq L\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| \forall \mathbf{x}, \mathbf{y}$. Производная Ли: $L_f h = (\partial h / \partial \chi) f(\chi)$ – скорость изменения скалярной функции h вдоль векторного поля f . Множество функций класса $\mathcal{K}$: функция $\alpha: [0, a) \rightarrow [0, \infty)$ класса $\mathcal{K}$ строго возрастает и $\alpha(0) = 0$; расширенное множество функций класса $\mathcal{K}_\infty$ при $\alpha: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Фильтр Калмана: рекурсивный алгоритм оптимальной линейной фильтрации, минимизирующий среднеквадратичную ошибку оценки состояния. Фильтр частиц: последовательный метод Монте-Карло для байесовского оценивания нелинейных систем, аппроксимирующий апостериорное распределение набором взвешенных выборок. Правила Рейнольдса:

три локальных правила коллективного движения – сплоченность (стремление к центру масс соседей), выравнивание (согласование скорости и направления), разделение (уклонение от столкновений).

ФБУ и ФУЛ. Для нелинейной системы, аффинной по управлению (управление-аффинной системы)

$$\dot{\chi} = f(\chi) + g(\chi) \mathbf{u}, \quad (3)$$

где $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ и $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ – липшицево непрерывные функции (вектор-функция свободной динамики и матричная функция входа соответственно; правая часть (3) линейна по управлению, но нелинейна по состоянию), $\chi \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния, $\mathbf{u} \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m$ – вектор управления, скалярная функция $b: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ является ФБУ, если для безопасного множества $\mathcal{C} = \{\chi: b(\chi) \geq 0\}$ существует $\alpha \in \mathcal{K}_\infty$:

$$\sup_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} [L_f b(\chi) + L_g b(\chi) \mathbf{u} + \alpha(b(\chi))] \geq 0. \quad (4)$$

Любой липшицев регулятор, удовлетворяющий (4), делает $\mathcal{C}$ прямо инвариантным [15, 16], то есть если начальное состояние безопасно, то система остается безопасной при всех последующих моментах времени. В формуле (4) скаляры $L_f b$ и вектор-строка $L_g b$ – производные Ли функции b по $\mathbf{f}$ и $\mathbf{g}$ соответственно. Аналогично $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ является ФУЛ, если существует $\zeta \in \mathcal{K}_\infty$:

$$\inf_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} [L_f V(\chi) + L_g V(\chi) \mathbf{u} + \zeta(V(\chi))] \leq 0, \quad (5)$$

обеспечивающая стабилизацию к χ^* . ФУЛ является обобщением классической функции Ляпунова на системы с управлением; выполнение условия (5) обеспечивает асимптотическую сходимость состояния к целевому. ФБУ и ФУЛ объединяются в задачу квадратичного программирования (КП) с приоритетом безопасности [16].

Нейросетевой оценщик состояния. Данные собраны запуском фильтра частиц, реализованного на Python (NumPy) ($N_{ep} = 1000$ эпизодов, $N_p = 1000$ частиц, $N_s = 1000$ шагов,

$\Sigma_M = \sigma_M \mathbf{I}$, вероятность обнаружения 25 %). К ковариационным матрицам применено разложение Холецкого $\Sigma = L_\Sigma L_\Sigma^T$ для обеспечения положительной определенности. Вектор признаков $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{28}$ включает предыдущую оценку $\hat{\chi}(t-1)$, элементы разложения Холецкого ковариации, текущее измерение $\mathbf{r}(t)$ и элементы разложения ковариации измерений. Вектор целей $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{14}$ – обновленная оценка и ковариация.

Архитектура – полносвязная сеть: 28 входов, скрытый слой (512 нейронов, функция активации ReLU), 14 выходов (линейная активация). Реализация – PyTorch. Обучение: оптимизатор Adam (скорость обучения $\eta = 10^{-3}$), 100 эпох, среднеквадратичная ошибка. Потери: $l_T = 2,357 \cdot 10^{-3}$ (обучение), $l_i = 2,170 \cdot 10^{-3}$ (тест) – переобучение отсутствует.

Синтез управления. Множество соседей робота i обозначено $\mathcal{N}_i$. *Разделение.* ФБУ:

$$b_{sep}(\mathbf{p}_j^i) = \|\mathbf{p}_j^i\|^2 - D_s^2, \forall j \in \mathcal{N}_i, \quad (6)$$

где $\mathbf{p}_j^i \in \mathbb{R}^2$ – вектор положения робота j в системе координат робота i , скаляр $D_s > 0$ – безопасное расстояние. При $\alpha_{sep} = \gamma_{sep} b_{sep}^3$ ($\gamma_{sep} > 0$) условие (4) дает:

$$2(\mathbf{p}_j^i)^T \mathbf{v} + \gamma_{sep} b_{sep}^3 \geq 0. \quad (7)$$

Избежание препятствий (по координатам x, y ; координата z не участвует, поскольку препятствия – вертикальные столбы с осью вдоль z и столкновение определяется расстоянием в плоскости xy):

$$b_{obs}(\mathbf{p}_{obs}^i) = \|\mathbf{p}_{obs}^i\|^2 - D_s^2, \quad 2(\mathbf{p}_{obs}^i)^T [\mathbf{v}_x; \mathbf{v}_y] + \gamma_{obs} b_{obs}^3 \geq 0, \quad (8)$$

где $\mathbf{p}_{obs}^i \in \mathbb{R}^2$ – вектор положения препятствия. *Сплоченность.* Центроид для робота i :

$$\chi_C^i = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} \chi_j. \quad (9)$$

ФБУ сплоченности (по двумерным координатам $\hat{\chi}_C^i = [p_{Cx}; p_{Cy}] \in \mathbb{R}$, скаляр $R_f > 0$ – радиус):

$$b_{coh} = R_f^2 - \|\hat{\chi}_C^i\|^2; \quad (10)$$

$$-2(\hat{\chi}_C^i)^T [\mathbf{v}_x; \mathbf{v}_y] + \gamma_{coh} b_{coh}^3 + \delta_{coh} \geq 0, \quad (11)$$

где скаляр $\delta_{coh} \geq 0$ – переменная ослабления, допускающая временный выход за пределы безопасного множества (обход препятствий). Выбор $\alpha_{coh} = \gamma_{coh} b_{coh}^3$ делает b_{coh} одновременно ФУЛ.

Выравнивание по высоте (ФУЛ, p_{Cz} – скаляр, z – координата центроида):

$$V_z = (p_z - p_{Cz})^2, \quad 2(p_{Cz} - p_z)v_z - \gamma_z V_z + \delta_z \leq 0. \quad (12)$$

Функция $V_z \geq 0$ и $V_z = 0$ тогда и только тогда, когда $z_i = p_{Cz}$. Условие ФУЛ (5) обеспечивает монотонное убывание V_z вдоль траекторий, т.е. сходимость высоты робота к среднему уровню группы.

Выравнивание по ориентации. (ФУЛ, θ_C – скаляр, направление центроида):

$$V_\theta = (\theta - \theta_C)^2, \quad 2(\theta_C - \theta)\omega - \gamma_\theta V_\theta + \delta_\theta \leq 0. \quad (13)$$

Аналогично (12), функция $V_\theta \geq 0$ и $V_\theta = 0$ при $\theta_i = \theta_C$. Полученные ФУЛ (12) и (13) квадратичны по отклонению от целевого значения и удовлетворяют условию (5) при наличии допустимого управления [15].

Учет неопределенности. Истинные χ_j недоступны; используются оценка $\hat{\chi}_j$ (вектор) и ковариационная матрица $\Sigma_j \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ от нейросетевого оценщика. Скалярный вес надежности:

$$\lambda_j = 1 / \text{tr}(\Sigma_j), \quad (14)$$

где $\text{tr}(\cdot)$ – след матрицы; $\lambda_j > 0$, поскольку Σ_j положительно определена. Взвешенный центроид:

$$\hat{\chi}_C^i = \sum_{j \neq i} \lambda_j \hat{\chi}_j / \sum_{j \neq i} \lambda_j. \quad (15)$$

Для сравнения, невзвешенный центроид использует равные веса: $\hat{\chi}_C^{\text{eq}} = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} \hat{\chi}_j$ (формула (9) с заменой истинных состояний

на оценки). Взвешенный центроид (15) придает большее значение оценкам с малой ковариацией (надежным) и подавляет вклад зашумленных оценок, стабилизируя координационные сигналы.

Задача квадратичного программирования. Оптимальное $\mathbf{u}$ вычисляется из задачи КП, минимально модифицирующей желаемое $\mathbf{u}^* = [\mathbf{v}^*; \omega^*]$, где $\mathbf{v}^* = k_p(\mathbf{p}^* - \mathbf{p}_i)$ (скаляр $k_p > 0$ – коэффициент усиления, $\mathbf{p}^*$ – точка встречи), $\omega^* = \text{atan2}(v_y^i, v_x^i) - \theta_i$:

$$\min_{\mathbf{u}, \delta} \frac{1}{2} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}^*\|^2 + \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\delta}, \quad (16)$$

при ограничениях (7), (8), (11)–(13), $\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max}$, где $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^3$ – вектор весов ослабления, $\boldsymbol{\delta} = [\delta_{coh}; \delta_z; \delta_\theta]$ – вектор переменных ослабления. Задача (16) является выпуклой КП и решается за полиномиальное время

(библиотека CVXPY). Приоритет безопасности обеспечивается тем, что ограничения ФБУ разделения (7) и избежания препятствий (8) не содержат переменных ослабления и выполняются строго.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование проводилось на языке Python 3.10 (библиотеки NumPy, PyTorch, CVXPY, Matplotlib) для материальных точек в кубической среде ($W = 20$ м). Параметры: $\varphi_{\max} = 0,9$; $R_s = 5,0$ м; $\Sigma_M = 0,05 \cdot \mathbf{I}$; $D_s = 2,0$ м; $\gamma_{sep} = \gamma_{obs} = \gamma_{coh} = 0,1$; $\gamma_z = \gamma_\theta = 0,5$; $N = \{10, 20, 30, 40\}$.

Оценка нейросетевого оценщика. Сравнение проведено для $N = \{10, 20, 30, 50, 100\}$ при $\varphi = 50$ %. Оцененные положения и 95 %-ные доверительные эллипсы (рис. 1) показывают, что нейронная сеть дает результаты, практически идентичные фильтру

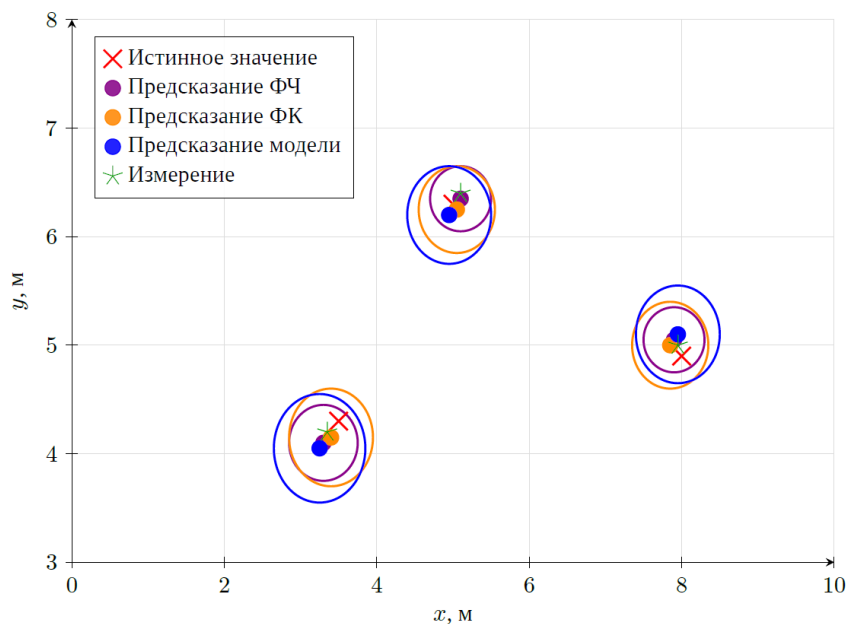


Рис. 1. Сравнение предсказаний фильтра частиц, фильтра Калмана и нейросетевой модели с истинными значениями и измерениями

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

частиц и фильтру Калмана. Средние ошибки отслеживания (рис. 2) подтверждают сопоставимую точность. Ключевое преимущество – вычислительная эффективность (табл. 1): нейросетевой метод требует 0,089–0,120 мс, фильтр частиц – 12–127 мс, фильтр Калмана – 0,106–0,841 мс. При $N = 100$

выигрыш составляет 1 427 раз по сравнению с фильтром частиц и 9,4 раза по сравнению с фильтром Калмана. Нейросетевой оценщик масштабируется за счет параллельной пакетной обработки (batch inference) в PyTorch: все N оценок вычисляются за одно прямое прохождение сети.

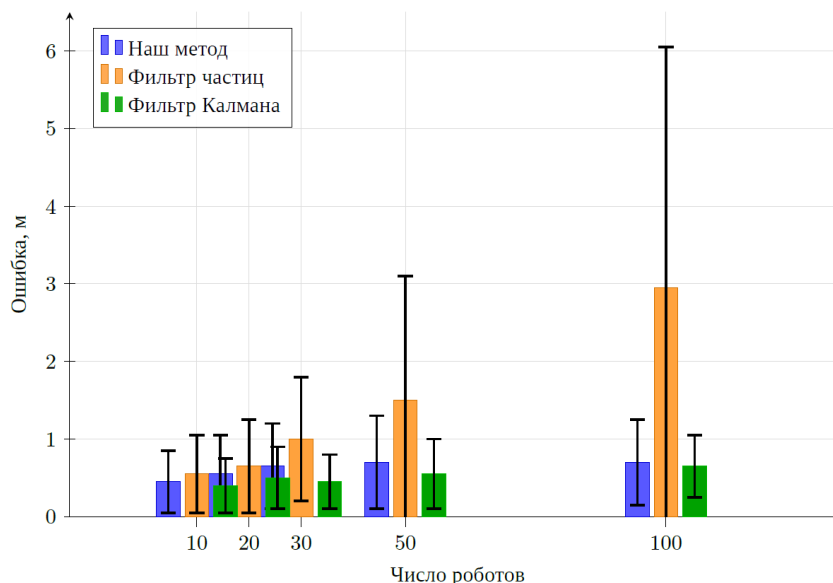


Рис. 2. Зависимость ошибки локализации от числа роботов для трех методов
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 1

Сравнение времени вычислений различных оценщиков состояния

N	Предложенный метод, мс	Фильтр частиц, мс	Фильтр Калмана, мс
10	0,109	12	0,106
20	0,096	34	0,217
30	0,12	43	0,29
50	0,114	65	0,438
100	0,089	127	0,841

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

Результаты роевого управления. Команда из $N = 30$ роботов (рис. 3) из случайного начального состояния последовательно проходит фазы: движение к цели, выравнивание по направлению, формирование строя, достижение цели с обходом препятствий. Координата p_z (рис. 4) сходится к единому уровню, формируя плоскую конфигурацию, что подтверждает работоспособность ФУЛ

(12). Расстояние «центроид – цель» (рис. 5) стабилизируется: менее 1 м для $N = 10$, порядка 2 м для $N = 40$. Нарушений безопасного расстояния D_s не зафиксировано ни в одном из экспериментов, что подтверждает корректность ограничений ФБУ (7) и (8).

Эффект учета неопределенности. Взвешенный центроид (15) обеспечивает меньшую ошибку по сравнению

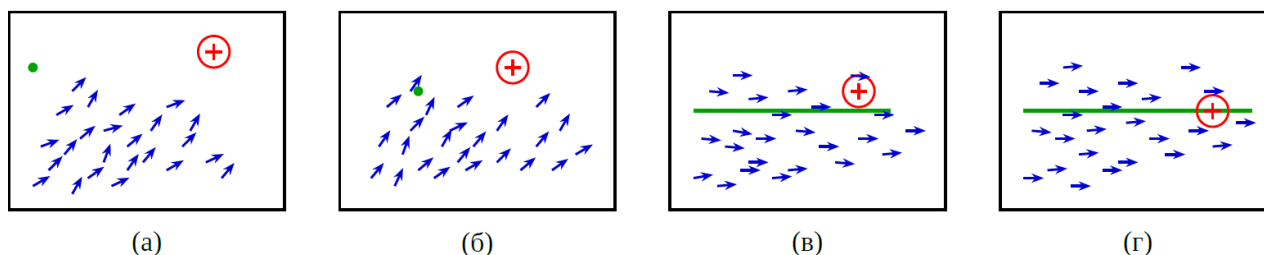


Рис. 3. Эволюция роя роботов: (а) начальное расположение; (б) перемещение к цели; (в) формирование строя; (г) достижение цели

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

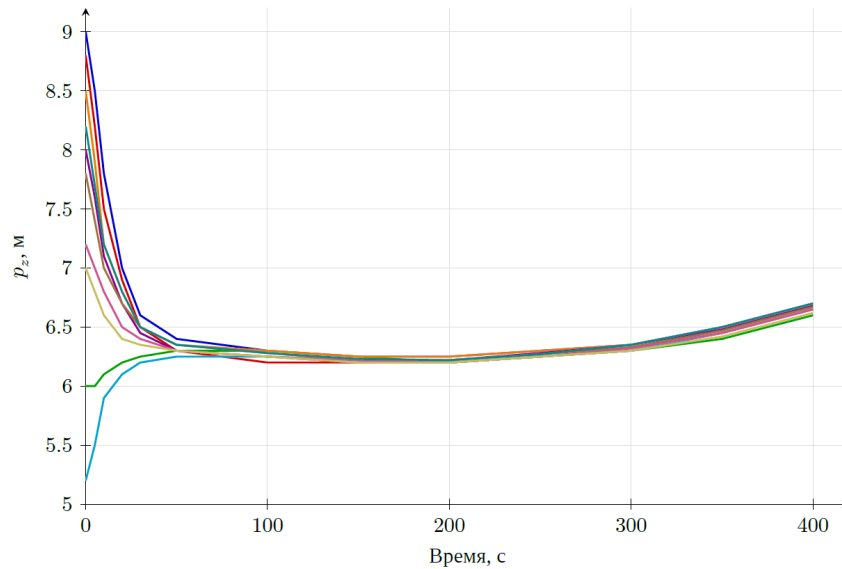


Рис. 4. Динамика сходимости координаты p_z для различных начальных условий
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

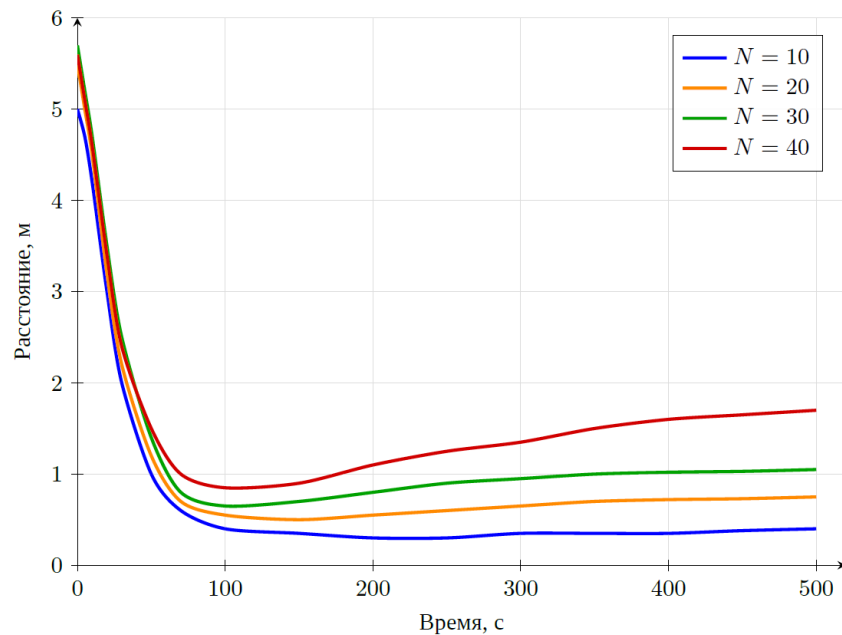


Рис. 5. Зависимость расстояния до цели от времени при различном числе роботов N
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

с невзвешенным (рис. 6): для $N=40$ снижение приблизительно в 1,5 раза. Эффект обусловлен тем, что взвешенный центроид (15) подавляет вклад оценок с большой ковариацией (то есть ненадежных), в то время как невзвешенный подход (формула (9) с оценками вместо истинных состояний) учитывает все оценки одинаково. С ростом числа агентов доля ненадежных оценок возрастает, и выигрыш от взвешивания увеличивается.

Сопоставление с аналогами. Большинство распределенных методов [4, 6] предполагают устойчивый обмен данными с вычислительно затратными байесовскими оценщиками (~10–100 мс на шаг). Потенциальные подходы [14] не гарантируют минимальной дистанции: отсутствует формальное доказательство прямой инвариантности безопасного множества. Методы обучения с подкреплением [10] не дают формальных гарантий

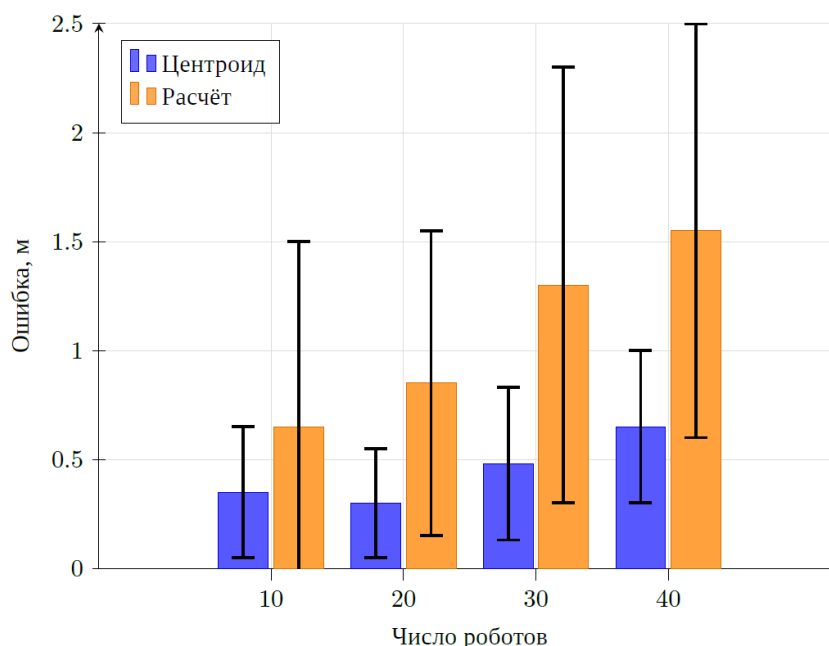


Рис. 6. Сравнение ошибки локализации методами центроида и расчета в зависимости от числа роботов
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

безопасности, поскольку обученная политика может нарушить ограничения в нетипичных ситуациях. Предлагаемый подход объединяет формальные гарантии безопасности (ФБУ обеспечивают прямую инвариантность безопасного множества) с обучаемым оценщиком (0,089–0,120 мс на шаг). Ограничения работы: использована модель материальных точек без учета задержек в канале связи, ограничений на управление и динамики исполнительных механизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования установлено следующее.

1. Нейросетевой оценщик обеспечивает точность, сопоставимую с фильтром частиц ($l_T = 2,357 \cdot 10^{-3}$, $l_l = 2,170 \cdot 10^{-3}$), при вычислительных затратах на один-два порядка ниже (0,089–0,120 мс против 12–127 мс при N от 10 до 100). Масштабируемость обеспечивается параллельной пакетной обработкой (batch inference) в PyTorch.

2. Оптимизационный регулятор на основе ФБУ–ФУЛ, реализованный как задача КП (решатель CVXPY), обеспечивает одновременное выполнение правил Рейнольдса в трехмерной среде: разделение (ФБУ (6)–(7),

$D_s = 2$ м – ни одного нарушения), сплоченность (ФБУ/ФУЛ (10)–(11), удержание центроида вблизи цели) и выравнивание (ФУЛ (12)–(13), сходимость высот и ориентаций). Нарушений безопасного расстояния не зафиксировано.

3. Взвешенный центроид (15), использующий веса $\lambda_j = 1 / \text{tr}(\Sigma_j)$, уменьшает ошибку координации по сравнению с невзвешенным подходом в ~1,5 раза при $N = 40$. Эффект усиливается с ростом числа агентов.

4. При увеличении команды от 10 до 40 роботов установившееся расстояние до цели возрастает с менее 1 м до ~2 м; система сохраняет устойчивость и способность к обходу препятствий.

Направления дальнейших исследований: (1) модуль предсказания движения соседей на основе рекуррентных нейронных сетей; (2) учет реалистичной динамики (модель БПЛА с шестью степенями свободы, задержки в канале связи, ограничения на управление); (3) натурные эксперименты на платформе ROS 2; (4) сравнение с альтернативными методами (обучение с подкреплением [10], графовые безопасные регуляторы [12]) при идентичных условиях моделирования.

Список источников

1. Bartolomei L., Teixeira L., Chli M. Fast multi-UAV decentralized exploration of forests // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023. Vol. 8, no. 9. P. 5576–5583. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3296037>.
2. Ali Z. A., Alkhamash E. H., Hasan R. State-of-the-art flocking strategies for the collective motion of multi-robots // *Machines*. 2024. Vol. 12, no. 10. <https://doi.org/10.3390/machines12100739>.
3. Kim J., Kim S., Ju C. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 105100–105115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>.
4. Shao X., Zhang J., Zhang W. Distributed cooperative surrounding control for mobile robots with uncertainties and aperiodic sampling // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, no. 10. P. 18951–18961. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3189201>.
5. Brunacci V., De Angelis A., Costante G. et al. Development and analysis of a UWB relative localization system // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. P. 1–12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3265107>.
6. Walter V., Staub N., Franchi A. et al. UVDAR System for visual relative localization with application to leader–follower formations of multirotor UAVs // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Vol. 4, no. 3. P. 2637–2644. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2901683>.
7. Salimpour S., Morón P. T., Yu X. et al. Exploiting redundancy for UWB anomaly detection in infrastructure-free multi-robot relative localization // *Frontiers in Robotics and AI*. 2023. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1190296>.
8. Li B., Wen S., Yan Z. et al. A survey on the control Lyapunov function and control barrier function for nonlinear-affine control systems // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2023. Vol. 10, no. 3. P. 584–602. <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123075>.
9. Duan H., Huo M., Fan Y. From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation // *National Science Review*. 2023. Vol. 10, no. 5. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad040>.
10. Long K., Dhiman V., Leok M. et al. Safe control synthesis with uncertain dynamics and constraints // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022. Vol. 7, no. 3. P. 7295–7302. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3182544>.
11. Zhang S., So O., Garg K. et al. GCBF+: A neural graph control barrier function framework for distributed safe multiagent control // *IEEE Transactions on Robotics*. 2025. Vol. 41. P. 1533–1552. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3530348>.
12. Nguyen L. V. Swarm intelligence-based multi-robotics: A comprehensive review // *AppliedMath*. 2024.

References

1. Bartolomei L., Teixeira L., Chli M. Fast multi-UAV decentralized exploration of forests. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023;8(9):5576–5583. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3296037>.
2. Ali Z. A., Alkhamash E. H., Hasan R. State-of-the-art flocking strategies for the collective motion of multi-robots. *Machines*. 2024;12(10). <https://doi.org/10.3390/machines12100739>.
3. Kim J., Kim S., Ju C. et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*. 2019;7:105100–105115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>.
4. Shao X., Zhang J., Zhang W. Distributed cooperative surrounding control for mobile robots with uncertainties and aperiodic sampling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022;23(10):18951–18961. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3189201>.
5. Brunacci V., De Angelis A., Costante G. et al. Development and analysis of a UWB relative localization system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023;72:1–12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3305661>.
6. Walter V., Staub N., Franchi A. et al. UVDAR system for visual relative localization with application to leader–follower formations of multirotor UAVs. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4(3):2637–2644. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2901683>.
7. Salimpour S., Morón P. T., Yu X. et al. Exploiting redundancy for UWB anomaly detection in infrastructure-free multi-robot relative localization. *Frontiers in Robotics and AI*. 2023;10. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1190296>.
8. Li B., Wen S., Yan Z. et al. A survey on the control Lyapunov function and control barrier function for nonlinear-affine control systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2023;10(3):584–602. <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123075>.
9. Duan H., Huo M., Fan Y. From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation. *National Science Review*. 2023;10(5). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad040>.
10. Long K., Dhiman V., Leok M. et al. Safe control synthesis with uncertain dynamics and constraints. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022;7(3):7295–7302. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3182544>.
11. Zhang S., So O., Garg K. et al. GCBF+: A neural graph control barrier function framework for distributed safe multiagent control. *IEEE Transactions on Robotics*. 2025;41:1533–1552. <https://doi.org/10.1109/TRO.2025.3530348>.
12. Nguyen L. V. Swarm intelligence-based multi-robotics: A comprehensive review. *Applied Math*. 2024;4(4):1192–1210. <https://doi.org/10.3390/applied-math4040064>.
13. Dawson C., Gao S., Fan C. Safe control with learned certificates: A survey of neural Lyapunov, barrier, and

- Vol. 4, no. 4. P. 1192–1210. <https://doi.org/10.3390/appliedmath4040064>.
13. Dawson C., Gao S., Fan C. Safe Control with learned certificates: A survey of neural Lyapunov, barrier, and contraction methods for robotics and control // *IEEE Transactions on Robotics*. 2023. Vol. 39, no. 3. P. 1749–1767. <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3232544>.
 14. Ge R., Lee M., Radhakrishnan V. et al. Vision-based relative detection and tracking for teams of micro aerial vehicles // *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 23–27, 2022, Kyoto, Japan. New York, NY : Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2022. P. 380–387. <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981115>.
 15. Ávila-Martínez E. J., Barajas-Ramírez J. G. Flocking motion in swarms with limited sensing radius and heterogeneous input constraints // *Journal of the Franklin Institute*. 2021. Vol. 358, no. 4. P. 2346–2366. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2021.01.022>.
 16. Zhu P., Dai W., Yao W. et al. Multi-robot flocking control based on deep reinforcement learning // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 150397–150406. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016951>.
 - contraction methods for robotics and control. *IEEE Transactions on Robotics*. 2023;39(3):1749–1767. <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3232542>.
 14. Ge R., Lee M., Radhakrishnan V. et al. Vision-based relative detection and tracking for teams of micro aerial vehicles. In: *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 23–27, 2022, Kyoto, Japan. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2022. p. 380–387. <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981115>.
 15. Ávila-Martínez E. J., Barajas-Ramírez J. G. Flocking motion in swarms with limited sensing radius and heterogeneous input constraints. *Journal of the Franklin Institute*. 2021;358(4):2346–2366. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2021.01.022>.
 16. Zhu P., Dai W., Yao W. et al. Multi-robot flocking control based on deep reinforcement learning. *IEEE Access*. 2020;8:150397–150406. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016951>.

Информация об авторах

С. Е. Кондратьев – аспирант;

<https://orcid.org/0000-0002-7028-9407>,
razthepsycho@yandex.ru✉

Н. В. Казюра – магистр;

<https://orcid.org/0009-0002-3274-0444>,
nikolai.cazyura@yandex.ru

В. Н. Мещеряков – доктор технических наук, профессор;

<https://orcid.org/0000-0003-2887-3703>,
mesherek@yandex.ru

About the authors

S. E. Kondratev – Postgraduate;

<https://orcid.org/0000-0002-7028-9407>,
razthepsycho@yandex.ru✉

N. V. Kazyura – Master;

<https://orcid.org/0009-0002-3274-0444>,
nikolai.cazyura@yandex.ru

V. N. Meshcheryakov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor;

<https://orcid.org/0000-0003-2887-3703>,
mesherek@yandex.ru

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 04.09.2026.