

Труды НИИСИ

SRISA PROCEEDINGS

Москва, 2026



Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ)

ТРУДЫ НИИСИ
SRISA PROCEEDINGS

ТОМ 16 № 1

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ:**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

МОСКВА
2026

Учредитель и издатель

Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ)

«Труды НИИСИ» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям и отраслям наук:

- 1.2.1. «Искусственный интеллект и машинное обучение» (физико-математические науки);
- 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (физико-математические и технические науки);
- 2.3.2. «Вычислительные системы и их элементы» (технические науки);
- 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки);
- 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей» (физико-математические и технические науки).

Направления исследований, по которым журнал публикует оригинальные статьи определены, но не ограничены следующим перечнем: системный анализ; математика; математическое и компьютерное моделирование; задачи автоматизации и управления; обработка сигналов; компьютерное зрение и обработка изображений; распознавание образов; статистика; технологии искусственного интеллекта; информационные технологии; информационная безопасность; вычислительные системы и их элементы; микро- и нанoeлектроника; высокопроизводительные вычисления; вопросы численного анализа; нейроморфные и мягкие вычисления; оптико-нейронные технологии; история науки, техники и персоналий. Журнал предназначен для научных сотрудников, инженеров и аспирантов, работающих в указанных направлениях исследований.

Миссия журнала — развитие перечисленных научных направлений в России и за рубежом, включая широкое освещение результатов исследований и обеспечение высококвалифицированных кадров печатными площадями, обеспечение высокого качества исследований путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения научных результатов и воспитания молодого поколения ученых-исследователей.

Политика журнала ориентирована на пропаганду передовых научно-технических идей и решений в рамках развития важнейших наукоемких технологий и участия в реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. До 2025 года журнал издавался в печатном виде с названием «Труды НИИСИ РАН» (ISSN 2225-7349). В настоящее время сетевому рецензируемому научному журналу «Труды НИИСИ» присвоен ISSN 3033-6422.

Главный редактор

Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор,
научный руководитель НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва

Заместители главного редактора

Крыжановский Борис Владимирович, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник центра оптико-нейронных технологий НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва

Шабанов Борис Михайлович, чл.-корр. РАН, д.т.н., доцент, руководитель отделения суперкомпьютерных систем и параллельных вычислений НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Члены редакционной коллегии

Аветисян Арутюн Ишханович, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, директор ИСП РАН, Москва

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор,
вице-президент РАН, Москва

Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор,
научный руководитель МСЦ — филиала НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор,
президент РТУ МИРЭА, Москва

Бланк Владимир Давыдович, д.ф.-м.н., профессор,
и.о. директора НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ, Троицк

Галкин Валерий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор,
 директор Сургутского филиала НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Сургут
Куклин Владимир Жанович, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории автоматизации
 и управления технологическими процессами НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Леонов Александр Георгиевич, д.п.н., к.ф.-м.н., доцент,
 ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительных методов
 механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Михайлюк Михаил Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник отдела
 программных средств визуализации НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Олейник Андрей Владимирович, д.т.н., профессор,
 заместитель директора по стратегическому развитию ИКТИ РАН, Москва
Пархоменко Юрий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель и профессор кафедры
 материаловедения полупроводников и диэлектриков НИТУ МИСиС, Москва
Редько Владимир Георгиевич, д.ф.-м.н., с.н.с., главный научный сотрудник центра оптико-
 нейронных технологий НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Смирнов Николай Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией волновых
 процессов механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Сотников Александр Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. отделения суперкомпьютерных
 систем и параллельных вычислений НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Шелепин Николай Алексеевич, д.т.н., профессор,
 руководитель научного направления «Микроэлектроника» ИНМЭ РАН, Москва
Александров Ислам Александрович, к.т.н., доцент, заместитель директора по научной и
 методической работе НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Аряшев Сергей Иванович, к.т.н., заместитель директора по микроэлектронике и
 вычислительным системам НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Годунов Александр Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с., заведующий отделом системного
 программирования НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Грюнталь Андрей Игоревич, к.ф.-м.н., заведующий отделом математического обеспечения
 НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Карандашев Яков Михайлович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник центра оптико-нейронных
 технологий НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Кушиниренко Анатолий Георгиевич, к.ф.-м.н., доцент,
 заведующий отделом учебной информатики НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Мамросенко Кирилл Анатольевич, к.т.н., доцент, в.н.с., руководитель центра визуализации и
 спутниковых информационных технологий НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Муранов Александр Николаевич, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией автоматизации и
 управления технологическими процессами НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Петров Константин Александрович, к.т.н., старший научный сотрудник отдела архитектур
 высокопроизводительных микропроцессоров НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Семенов Илья Витальевич, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела вычислительной
 математики НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва
Цимбалов Андрей Сергеевич, к.т.н., заместитель директора по микротехнологии
 НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, Москва

Founder and Publisher

Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Center "Kurchatov Institute" (NRC "Kurchatov Institute" - SRISA)

SRISA Proceedings is a peer-reviewed journal that covers the following key areas of research:

- Artificial intelligence and machine learning
- System analysis, control, information processing, statistics
- Computing systems and their components
- Automation and control in manufacturing
- Mathematical and software support for computing systems, complexes and computer networks.

We publish original articles on topics including, but not limited to: system analysis; mathematics; computer simulation; automation and control; signal processing; computer vision and image processing;

pattern recognition; statistics; artificial intelligence; information technologies; cybersecurity; computing systems and their components; micro- and nanoelectronics; high-performance computing; numerical analysis; neuromorphic and soft computing; optoneural technologies; and the history of science, technology, and researchers. Our readers include researchers, engineers, and doctoral students.

Our mission is to advance these research areas in Russia and worldwide by publishing significant results and offering leading professionals a platform to share their work. We are committed to maintaining high research standards through professional and public review while fostering the next generation of researchers.

The journal's policy is to promote advanced research and innovative solutions, foster the development of high-tech fields, and contribute to key national priorities in science and technology. Until 2025, the journal was published in print as Trudy NIISI RAN (Proceedings of SRISA, Russian Academy of Sciences), ISSN 2225-7349. Currently, SRISA Proceedings online peer-reviewed journal has been assigned ISSN 3033-6422.

Chief Editor

Vladimir B. Betelin, member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Academic Director, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Deputy Chief Editor

Boris V. Kryzhanovsky, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys&Math), Chief Researcher, Center for Optic-Neural Technologies, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Boris M. Shabanov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Department of Supercomputer Systems and Parallel Computing, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow.

Editorial Board

Arutyun I. Avetisyan, member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Director of the Institute for System Programming, Russian Academy of Sciences, Moscow

Vladislav Ya. Panchenko, member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Vice-President of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Gennady I. Savin, member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, JSC, a Branch of the NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Alexander S. Sigov, member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., President of the MIREA - Russian Technological University, Moscow

Vladimir D. Blank, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Acting Director, National Research Center Kurchatov Institute – Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Troitsk

Valery A. Galkin, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Director, Surgut Branch of the NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Surgut

Vladimir Zh. Kuklin, Doctor of Science (Engineering), Assoc. Prof., Leading Researcher, Manufacturing Automation and Control Laboratory, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Alexander G. Leonov, Doctor of Science (Education), PhD (Phys&Math), Assoc. Prof., Leading Researcher of the Computational Methods Laboratory, School of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Mikhail V. Mikhailyuk, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Chief Researcher, Visualization Software Department, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Andrey V. Oleinik, Doctor of Science (Engineering), Prof., Deputy Director for Strategic Development, Institute for Design-Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Yuri N. Parkhomenko, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Scientific Supervisor and Prof., Department of Materials Science for Semiconductors and Dielectrics, MISiS, Moscow

Vladimir G. Redko, Doctor of Science (Phys&Math), Senior Researcher, Chief Researcher, Center for Optic-Neural Technologies, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Nikolay N. Smirnov, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Head of the Wave Processes Laboratory, School of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Alexander N. Sotnikov, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., Head of the Department of Supercomputer Systems and Parallel Computing, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Nikolay A. Shelepin, Doctor of Science (Engineering), Prof., Microelectronics Research Advisor,
Institute of Nanotechnology of Microelectronics, Russian Academy of Sciences, Moscow

Islam A. Alexandrov, PhD (Engineering), Assoc. Prof., Deputy Director for Research and Education,
NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Sergei I. Aryashev, PhD (Engineering), Deputy Director for Microelectronics and Computer Systems,
NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Alexander N. Godunov, PhD (Phys&Math), Senior Researcher, Head of the Department of
System Programming, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Andrei I. Griuntal, PhD (Phys&Math), Head of the Mathematics Department,
NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Yakov M. Karandashev, PhD (Phys&Math), Leading Researcher, Center for Optic-Neural Technologies,
NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Anatoly G. Kushnirenko, PhD (Phys&Math), Assoc. Prof., Head of IT for Education Department,
NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Kirill A. Mamrosenko, PhD (Engineering), Assoc. Prof., Leading Researcher, Head of the Center for Vis-
ualization and Satellite Information Technologies, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Alexander N. Muranov, PhD (Engineering), Assoc. Prof., Head of the Manufacturing Automation and
Control Laboratory, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Konstantin A. Petrov, PhD (Engineering), Senior Researcher, High Performance
Microprocessor Architectures Department, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Ilya V. Semenov, PhD (Phys&Math), Leading Researcher,
Department of Computational Mathematics, NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Andrey I. Tsimbalov, PhD (Engineering), Deputy Director for Microtechnology,
NRC "Kurchatov Institute" - SRISA, Moscow

Научный редактор номера / Scientific editor of the issue:
Михайлюк М.В. / Mikhailyuk M.V.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ	
<i>Р. М. Рагимов, С. Г. Еловой.</i> Интерактивное ИИ-приложение для игрового изучения информатики	8
<i>В. Г. Редько.</i> Формирование и использование знаний в коллективе агентов	13
II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА	
<i>Е. В. Страинов, Л. А. Финагин.</i> Управление виртуальной моделью мобильного робота с адаптацией на основе информации о виртуальной среде.	19
III. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ	
<i>Ю. Б. Рогаткин.</i> КМОП-зарядочувствительный усилитель для пиксельного детектора	26
<i>Н. В. Масальский.</i> Моделирование подвижности в тонких кремниевых GAA нанотранзисторах	31
<i>N. V. Masalsky.</i> Simulation of carrier mobility in Silicon Gate-All-Around (GAA) Nanotransistors	37
<i>Т. Р. Деничиков, К. А. Петров.</i> Бесшовная архитектура узла динамической фазовой перестройки тактовых трактов в высокоскоростных интерфейсах физического уровня DDR.....	42
IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ	
<i>С. Н. Яцук, С. Г. Еловой.</i> Аналитическая платформа для оценки эффективности разработки GITALPНАА.....	49
V. ПРОЧЕЕ	
<i>А. И. Аханкина, Г. О. Райко, М. В. Райко, У. М. Солопова.</i> Особенности организации двухнедельного курса по обучению программированию с использованием среды «ПиктоМир» в разновозрастных группах	53

CONTENT

I. ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING	
<i>R. M. Ragimov, S. G. Elovoy.</i> Interactive AI-based application for game-based learning of computer science.....	8
<i>V. G. Red'ko.</i> Generation and use of knowledge in a collective of agents.....	13
II. SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, INFORMATION PROCESSING, STATISTICS	
<i>E. V. Strashnov, L. A. Finagin.</i> Control of a virtual model's mobile robot with adaptation based on information about the virtual environment.....	19
III. COMPUTING SYSTEMS AND HARDWARE COMPONENTS	
<i>Y. B. Rogatkin.</i> CMOS charge-sensitive amplifier for pixel detector.....	26
<i>N. V. Masalsky.</i> Simulation of carrier mobility in silicon Gate-All-Around (GAA) nanotransistors [<i>Original article in Rus.</i>].....	31
<i>N. V. Masalsky.</i> Simulation of carrier mobility in silicon Gate-All-Around (GAA) nanotransistors.....	37
<i>T. R. Denschikov, K. A. Petrov.</i> Glitch-free dynamic phase retuning unit in high-speed DDR PHY clocking circuits.....	42
IV. MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUPPORT FOR COMPUTING SYSTEMS, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS	
<i>S. N. Yatsuk, S. G. Elovoy.</i> GITALPHA, an analytical platform for evaluating the effectiveness of development.....	49
V. MISCELLANEOUS	
<i>A. I. Akhankina, G. O. Raiko, M. V. Raiko, U. M. Solopova.</i> Features of organizing a two-week course on teaching programming using the «PictoMir» digital learning environment in mixed-age groups.....	53

УДК 004.45

Интерактивное ИИ-приложение для игрового изучения информатики

Р. М. Рагимов¹, С. Г. Еловой²¹ БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут, Россия, ragimov_rm@edu.surgu.ru;²Сургутский филиал НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Сургут, Россия, s.elovoy@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка игрового приложения, призванного повысить эффективность обучения информатике посредством геймификации и методов искусственного интеллекта. Приложение адаптирует образовательный процесс под индивидуальные особенности учащихся, используя интеллектуальный анализ данных об их успехах. Ожидается, что предложенный подход усилит мотивацию и успеваемость студентов за счет персонализированного игрового взаимодействия.

Ключевые слова: геймификация, обучение информатике, искусственный интеллект, адаптивное обучение, образовательные технологии

1. Введение

Современная система образования активно ищет новые подходы к повышению мотивации и успеваемости учащихся, особенно в сфере обучения информатике. Одним из перспективных направлений является геймификация – применение игровых элементов в учебном процессе. Исследования показывают, что геймификация позволяет активизировать когнитивные и эмоциональные процессы обучающихся, повышая их мотивацию, вовлечённость и концентрацию внимания [1, 3].

Так, внедрение игровых механик (уровни, баллы, награды, рейтинги и др.) формирует у студентов чувство прогресса и способствует положительному отношению к обучению. Практика использования популярных образовательных платформ (Duolingo, Quizizz, Kahoot! и др.) демонстрирует рост вовлечённости учащихся на 30–40% по сравнению с традиционными методами обучения [3]. Геймификация становится одним из ключевых трендов модернизации образования благодаря способности индивидуализировать учебный процесс и повышать усвоение знаний [1].

2. Цель работы

Обосновать и описать концепцию игрового приложения с поддержкой ИИ для подкрепления обучения информатике. Ниже проведён анализ существующих решений, сформулирована постановка задачи, описаны архитектура предлагаемого приложения и процесс его работы, а также ожидаемые

результаты от внедрения такой системы.

3. Анализ Аналогов

Интеграция игровых методов и ИИ уже реализуется в ряде образовательных проектов. Зарубежные платформы, такие как Duolingo и Kahoot!, успешно используют геймификацию: они внедряют уровни, награды, соревнование между учащимися, что стимулирует регулярные занятия и повышает мотивацию. Например, по данным исследований, использование Kahoot! увеличивает вовлечённость студентов на ~35% и улучшает запоминание материала на ~20% за счёт элементов соревнования [3]. Duolingo демонстрирует эффективность системы поощрений: достижение пользователем серии ежедневных уроков значительно повышает долгосрочную активность обучения [3]. Эти примеры подтверждают, что игровые механики способны превращать процесс закрепления материала в увлекательное занятие, насыщенное положительными эмоциями.

Помимо геймифицированных платформ, заметное развитие получили адаптивные обучающие системы. Так, Подколзин предложил интеллектуальную систему адаптивного обучения на основе нейронных сетей для вузов [4]. Данная система анализирует успехи студентов и прогнозирует их результаты, адаптируя содержание курса под их потребности. Экспериментальное внедрение в пяти университетах показало значительный эффект: успеваемость в экспериментальной группе выросла на 18%,

вовлечённость в учебный процесс – на 25%, при одновременном снижении нагрузки на преподавателей на 15% [4].

4. Постановка задачи

Проблема: традиционные методы обучения нередко недостаточно мотивируют учащихся и не учитывают индивидуальные различия в уровне подготовки. В результате у одних возникает скука от чрезмерно простого материала, у других – фрустрация из-за сложности, что снижает эффективность обучения. Необходимы инструменты, которые бы подкрепляли обучение посредством адаптации содержания под каждого ученика и поддерживали высокий уровень мотивации.

Гипотеза решения: сочетание геймификации с искусственным интеллектом позволит создать среду, в которой ученик, изучающий информатику, будет активно вовлечён в обучение и получать материал, оптимально соответствующий его уровню. Игровое приложение с поддержкой ИИ должно предоставлять:

Адаптивность: автоматическую подстройку сложности заданий и подсказок на основе результатов учащегося (реализуется через алгоритмы машинного обучения).

Мотивацию: игровые задания, награды и

конкурсы, превращающие практику по информатике в увлекательный процесс соперничества и достижений.

Наглядную обратную связь: мгновенные подсказки и разбор ошибок от интеллектуальной системы, действующей как виртуальный наставник.

Цель разработки: создать прототип игрового приложения, интегрирующего адаптивную систему обучения информатике с игровыми механиками. Приложение должно помочь школьникам закреплять знания по информатике в форме игры.

Задачи исследования: (1) разработать архитектуру приложения, включающего модули геймификации и ИИ; (2) смоделировать функциональность системы с помощью диаграмм; (3) определить ожидаемые образовательные эффекты от внедрения приложения.

5. Описание архитектуры и процесса

Для моделирования информационных потоков и логики обработки данных в игровом приложении были построены диаграммы потоков данных (DFD) в нотации Гейна–Сарсона на трёх уровнях декомпозиции.

Контекстная DFD (уровень 0) представлена на рисунке 1.

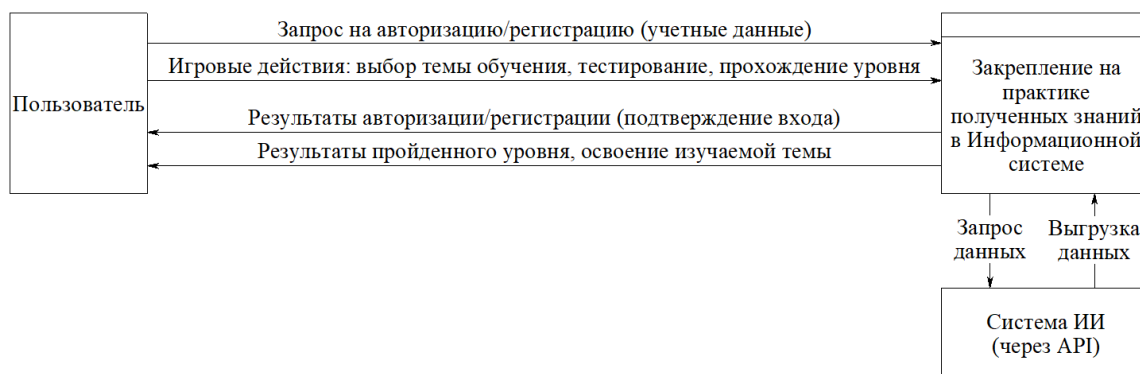


Рис. 1. DFD Диаграмма (уровень 0)

Она отображает внешние взаимодействия системы: пользователь взаимодействует с игровым приложением через регистрацию, выбор темы и прохождение уровня, а также получает результаты обучения. Дополнительно приложение обменивается данными с внешним модулем искусственного интеллекта (ИИ) через API, запрашивая адаптированные задания и выгружая результаты. На этой диаграмме приложение выступает как единый процесс,

принимающий входы от пользователя и ИИ, обрабатывающий их и возвращающий соответствующие выходные данные.

На рисунке 2 представлена DFD уровня 1 - декомпозиция основных процессов приложения.

Выделены ключевые блоки:

- 1 — авторизация пользователя;
- 2 — выбор темы;
- 3 — первичное тестирование;
- 4 — определение уровня знаний;

5 — формирование заданий;
 6 — обмен с внешним ИИ-сервисом;
 7 — выполнение заданий;
 8 — обновление профиля и завершение уровня.

Каждый процесс получает и передаёт данные через потоки, включая взаимодействие с хранилищами: результатов, тем обучения, статистики по пройденным темам и запросов для ИИ. Например,

модуль 4 получает результаты теста и на их основе определяет текущий уровень знаний, который используется в модуле 5 для формирования персонализированных заданий. Задания передаются пользователю через блок 7, где они выполняются, и далее данные поступают обратно в систему. Диаграмма показывает замкнутую логику, в которой пользовательский прогресс влияет на адаптацию контента.

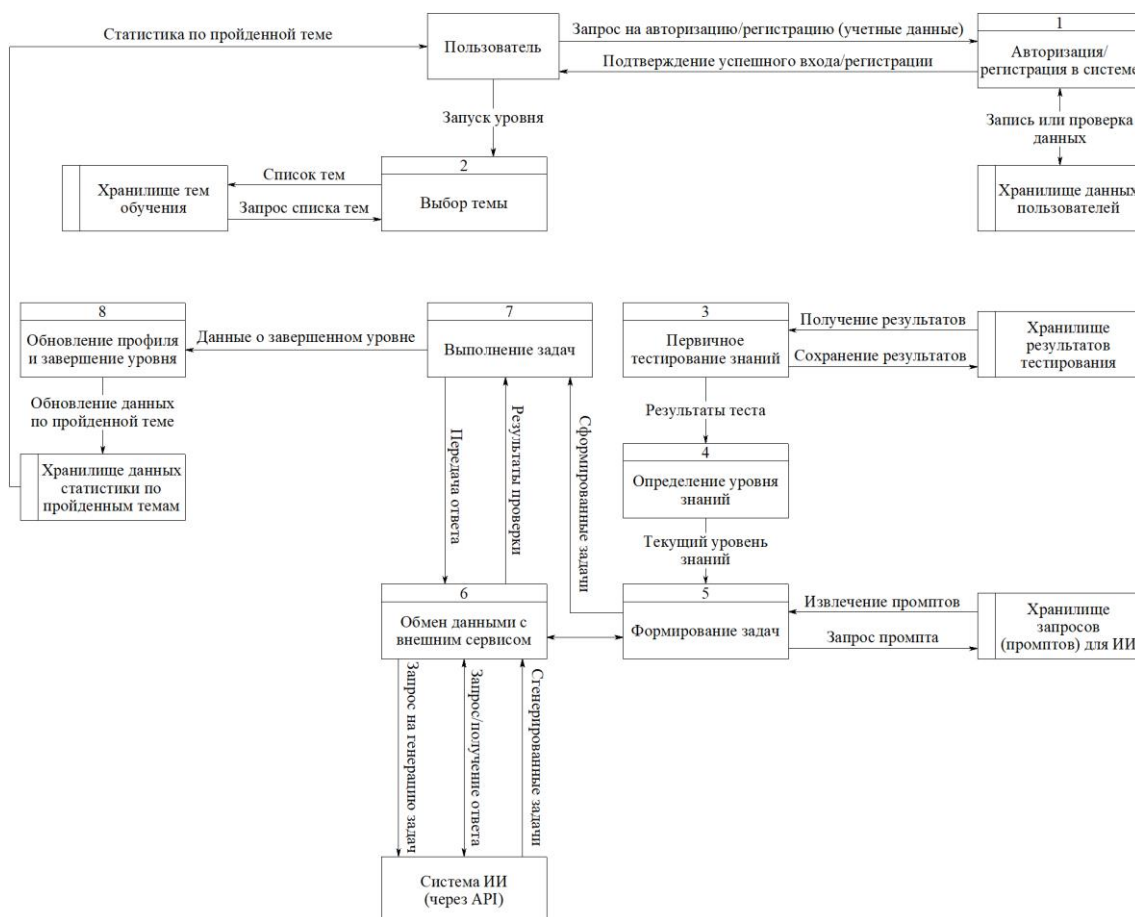


Рис. 2. Декомпозиция основных процессов

Более детально процесс выполнения задач декомпозирован в DFD уровня 2, представленный на рисунке 3. Здесь процессы обозначены индексами 7.1–7.4:

7.1 — обмен данными с ИИ-сервисом (запрос генерации задания, получение задач);
 7.2 — отображение заданий через игровой интерфейс;
 7.3 — проверка ответа;
 7.4 — завершение уровня.

Пользователь вводит ответ, который

направляется в блок 7.3. Там он сопоставляется с эталонным решением, полученным от ИИ. В случае верного ответа осуществляется переход к блоку 7.4, где фиксируется завершение уровня и формируется обратная связь. Данная диаграмма показывает логику замкнутого цикла «задание – решение – проверка – результат», в котором ИИ активно участвует в выборе и проверке материала.

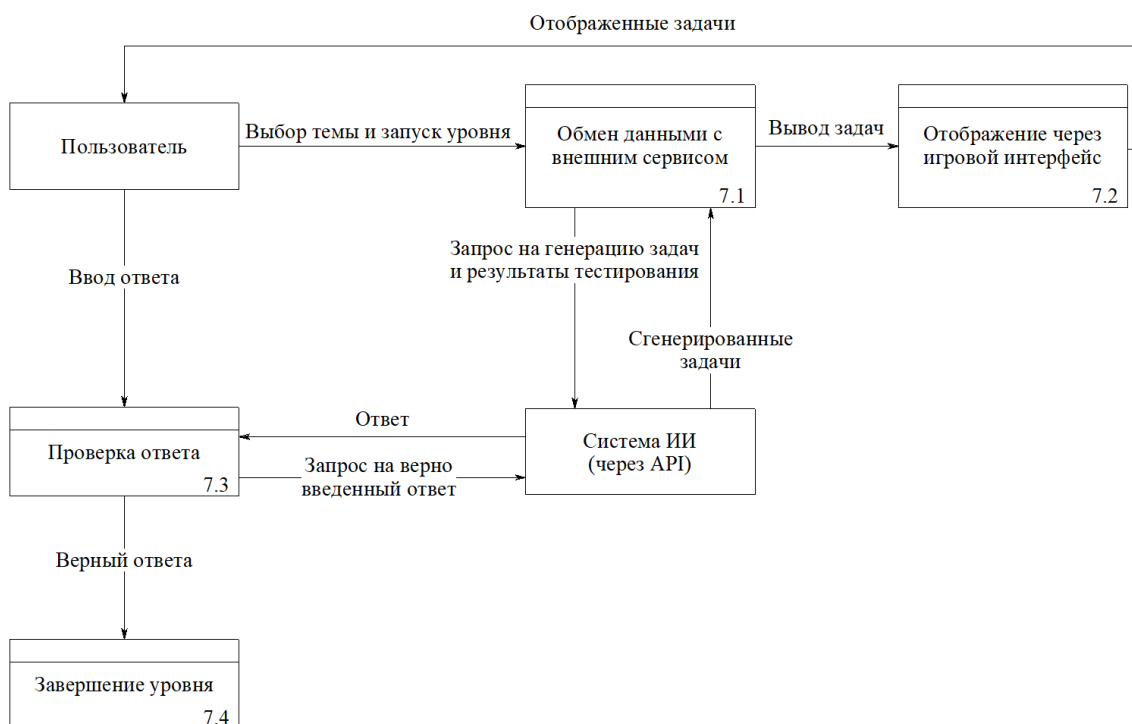


Рис. 3. Декомпозиция процесса (выполнение задач)

6. Заключение

В работе представлена концепция игрового приложения для поддержки обучения информатике, сочетающего механизмы геймификации с адаптивными алгоритмами искусственного интеллекта. Проведённый анализ подтвердил актуальность выбранного подхода:

геймификация существенно повышает мотивацию и вовлечённость обучающихся, а применение ИИ обеспечивает персонализацию обучения и рост результатов. Разработана функциональная модель системы (DFD), наглядно демонстрирующая архитектуру решения и взаимодействие компонентов.

Interactive AI-based application for game-based learning of computer science

R. M. Ragimov, S. G. Elovoj

Abstract. The article discusses the development of a game-based application aimed at enhancing the effectiveness of computer science learning through gamification and artificial intelligence methods. The application adapts the educational process to individual learner characteristics by intelligently analyzing performance data. This approach is expected to boost student motivation and achievement through personalized game-based interaction.

Keywords: gamification, computer science education, artificial intelligence, adaptive learning, educational technology

Литература

1. Иванова Н.А., Мисникова А.С. Использование геймификации при обучении программированию // Сборник трудов конф. «Цифровая трансформация образования». Брянск, 2024. С. 45-50.
2. Кузьмин Н.Н., Глазунова И.Н., Чистякова Н.А. Внедрение искусственного интеллекта в образование Плюсы и Минусы // Управление образованием: теория и практика. 2024. Т. 14, № 3-1. С. 130–138.
3. Медведев А.А., Гольшева Е.Н. Геймификация в обучении: как игровые технологии меняют образование // Мировая наука. 2025. № 6(99). С. 28–31.
4. Подколзин М.М. Интеллектуальная система адаптивного обучения на основе нейронных сетей для персонализации образовательных траекторий студентов российских вузов // Информатика и образование. 2024. Т. 39, № 6. С. 81–90.
5. Шарифбаева Х.Я., Абдурашидова М.Ж. Применение ИИ для персонализации обучения студентов вузов // Universum: технические науки. 2024. № 11(128). [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.128.11.18692> (дата обращения 05.12.2025).
6. Marengo A., Pagano A., Lund B., Santamato V. Research AI: integrating AI and gamification in higher education for e-learning optimization and soft skills assessment through a cross-study synthesis // Frontiers in Computer Science. 2025. Vol. 7. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.3389/fcomp.2025.1587040> (дата обращения 05.12.2025).
7. Tan L.Y., Hu S., Yeo D.J., Cheong K.H. Artificial intelligence-enabled adaptive learning platforms: A review // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2025. Vol. 9. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100429> (дата обращения 03.12.2025).

Поступила в редакцию / Received: 15.12.2025.

Поступила после рецензирования / Revised: 22.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 23.03.2026.

УДК 004.81

Формирование и использование знаний в коллективе агентов

В. Г. Редько

НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, vcredko@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе построена и проанализирована компьютерная модель формирования и использования информации в коллективе агентов. Модель основана на изложенных в книге Л. Либенберга «Происхождение науки» наблюдениях упорной охоты на антилоп на жаре в пустыне Калахари (Южная Африка). В модели рассматривается поведение группы агентов-охотников, преследующих агента-антилопу. Охота ведётся без оружия до изнеможения антилопы или охотников. Охотники обмениваются знаниями и информацией о своём нахождении и нахождении антилопы. За счёт такого обмена информацией охота коллектива охотников становится более успешной. Опытные охотники могут формировать и использовать простые гипотезы о нахождении антилопы и о своих целенаправленных действиях. Использование таких гипотез приводит к увеличению успешности охоты. Формирование и использование этих гипотез может рассматриваться как зарождение предшественников процессов научного познания. В модели продемонстрирована эффективность обмена информацией и формирования гипотез в коллективе агентов-охотников.

Ключевые слова: предшественники научного познания, агенты-охотники, агенты-антилопы, обмен информацией между агентами, формирование и проверка простых гипотез

1. Введение

Существует интересная проблема: почему формальное мышление, используемое в математике, применимо к реальной природе [1, 2]? С этой проблемой связан вопрос: как произошло наше мышление, используемое в научном познании? Частичный ответ на этот вопрос даёт книга В.Ф. Турчина «Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции» [3], в которой рассматривается эволюция научного познания как развитие биокибернетической эволюции. В частности, в этой книге рассматривается примитивное мышление и начальные формы пред-научного познания в древнем мире (в Древнем Египте, в Вавилоне), когда уже возникли письменность, простейшая математика, простая астрономия. Хотя в книге [3] не рассматривались более ранние фазы познавательных процессов, предшествовавших методам, сформировавшимся в Древнем Египте, в Вавилоне.

Для рассмотрения более ранних форм познания стоит обратиться к книге Л. Либенберга «Происхождение науки... (The Origin of Science...)» [4], в которой характеризуются познавательные процессы охотников-слепопытов в пустыне Калахари (Южная Африка). Причём охотники, наблюдая следы антилоп и используя знания о поведении антилоп, делали предсказания о будущем

движении антилоп. Формирование и использование прогнозирующих гипотез охотниками в определённой степени аналогичного формированию и использованию гипотез в научном познании. Отметим, что согласно анализу, проведённому в книге [4], рассмотренные в ней формы охоты могли возникнуть около 2 млн лет назад.

В настоящей работе строится и анализируется компьютерная модель охотников, преследующих антилоп. При этом основное внимание будем уделять рассмотрению коллектива охотников, преследующих совместно одну антилопу и обменивающихся информацией между собой.

2. Модель

Строим модель, рассматривая случай упорной охоты (persistence hunting), охарактеризованный в книге [4]. В случае такой охоты охотники длительное время без оружия преследуют антилопу на жаре до изнеможения антилопы или охотников. Рассматриваем двумерный клеточный мир, аналогичный пустыне Калахари: в основном мир песчаный, только в некоторых клетках имеются деревья, в тени которых антилопа или охотник могут отдыхать. Размер мира равен 200 на 1000 клеток ($N_x = 200$, $N_y = 1000$). Число клеток с деревьями составляет примерно 10% от общего числа клеток.

Рассматриваем два вида агентов: агент-

антилопа и агенты-охотники. Каждый агент имеет свой ресурс. Ресурс расходуется при перемещении агентов, также ресурс расходуется при нагреве агента. Если антилопа находится в тени дерева, то её ресурс, требуемый на перемещение и защиту от перегрева, немного пополняется. Время t дискретно: $t = 1, 2, \dots$

Охота происходит в течение ряда этапов. В начале каждого этапа формируется своё случайное распределение деревьев по клеткам мира. Ресурс каждого агента в начале этапа достаточно большой. Если ресурс агента (за счёт перемещения и расходов, связанных с нагревом) уменьшился до нуля, то такой агент считается истощённым и погибает. Имеется определённая дистанция взаимного видения D_V антилопы и охотника, если расстояние между антилопой и охотником меньше D_V , то они видят друг друга.

Охарактеризуем действия агентов. Действия антилопы таковы.

1А. Если расстояние между антилопой и охотниками меньше D_V , то антилопа уходит от группы охотников.

2А. Если антилопа не выполняет указанное действие, и её ресурс R_A мал $R_A < R_{AC}$ (R_{AC} – некоторое критическое значение ресурса для антилопы), то антилопа, уходя от охотников, движется к ближайшему дереву, чтобы немного пополнить свой ресурс в тени дерева. Если $R_A > R_{AC}$, то антилопа, грубо оценивая местонахождение группы охотников, удаляется от этой группы.

Имеется некоторое небольшое критическое значение ресурса охотника R_{HC} . Если ресурс охотника R_H стал меньше этого критического значения, то охотник прекращает охоту, так как в противном случае он может погибнуть от истощения. Такая возможность прекращения охоты явно рассматривалась в одном из примеров упорной охоты в работе [4]. Если у охотника достаточно большой ресурс ($R_H > R_{HC}$), то он выполняет следующие действия.

1Н. Если охотник видит антилопу, то он движется прямо к ней.

2Н. Если охотник не видит антилопы, то он с вероятностью P_T находит след антилопы, по следу определяет направление её движения и движется к антилопе.

3Н. Если охотник не выполняет указанные два действия, то охотник, грубо определяя направление к антилопе, движется к ближайшему дереву в этом направлении, надеясь найти там антилопу.

Этап охоты продолжается некоторое время, пока он не закончится. Условия прекращения этапа таковы:

1) Если для всех охотников ресурс оказался

меньше критического ($R_H < R_{HC}$), т.е. все охотники прекращают охоту, то этап заканчивается. В таком случае считается, что этап был неуспешным.

2) Если хотя бы для одного охотника ресурс достаточно большой ($R_H > R_{HC}$), а ресурс антилопы упал до нуля (т.е. антилопа полностью истощилась), то этап прекращается и считается успешным.

3) Если хотя бы один охотник с достаточно большим ресурсом ($R_H > R_{HC}$) настиг антилопу (т.е. охотник и антилопа оказались в одной клетке), то этап прекращается и считается успешным.

После окончания этапа происходит переход к следующему этапу охоты.

Динамика проходимых расстояний и ресурсов таковы.

Расстояния $D_H(t)$, $D_A(t)$, проходимые охотником и антилопой в такт времени t , пропорциональны их ресурсам и равны

$$D_H(t) = k_{DH} R_H(t) \text{ и } D_A(t) = k_{DA} R_A(t),$$

соответственно. Здесь $R_H(t)$ и $R_A(t)$ – текущие ресурсы охотника и антилопы, k_{DH} и k_{DA} – соответствующие коэффициенты пропорциональности.

Расходы ресурса охотника и антилопы в данный такт времени t , во-первых, пропорциональны проходимым ими расстояниям $D_H(t)$ и $D_A(t)$, во-вторых, связаны с нагревом:

$$R_H(t+1) = R_H(t) - k_{RH} D_H(t) - r_{TH},$$

$$R_A(t+1) = R_A(t) - k_{RA} D_A(t) - r_{TA},$$

где k_{RH} и k_{RA} – соответствующие коэффициенты пропорциональности, используемые при учёте расходов ресурсов на движение, r_{TH} и r_{TA} – параметры, учитывающие расходы ресурсов, связанные с нагревом.

Считаем, что охотники могут вести поиск антилопы «широким фронтом». А именно, перед действием 3Н охотник меняет свою x -координату случайным образом на величину, равномерно распределённую в интервале $[-D_X/2, D_X/2]$, где D_X – амплитуда варьирования x -координаты охотника при таком поиске.

Дополнительно каждый охотник оценивал своё расстояние до антилопы и если это расстояние было меньше определённого значения D_S , то он сообщал это расстояние и координаты своей клетки всем другим охотникам. Все охотники получали эти сообщения и если расстояние до антилопы у получающего сообщения было больше, чем у посылающего сообщение, то получающий сообщение охотник перемещался в клетку охотника, передающего сообщение. Таким образом, за счёт передачи и получения таких сообщений и дополнительных перемещений все

охотники перемещались ближе к антилопе.

Отметим, что в книге [4] был охарактеризован пример охоты в небольшом коллективе охотников, аналогичный рассмотренному в настоящей модели.

3. Результаты компьютерного моделирования

3.1. Параметры моделирования

Основные параметры моделирования таковы.

Число охотников в группе $N_H=10$ или $N_H=1$.

Размер мира (в числе клеток): $N_X = 200$, $N_Y = 1000$.

Сторону одной клетки считаем равной 1 (для учёта расстояний в мире).

Ресурсы охотника и антилопы в начале каждого этапа достаточно большие:

$$R_{H0} = R_{A0} = 1.$$

Ресурсы истощения для охотника и антилопы равны 0: $R_{Hmin} = R_{Amin} = 0$.

Коэффициенты пропорциональности, определяющие расстояния, проходимые охотником и антилопой в зависимости от ресурса, равны $k_{DH} = 2$, $k_{DA} = 4$.

Коэффициенты пропорциональности, используемые при учёте расходов ресурсов на движение для охотника и антилопы, равны $k_{RH} = 0.01$, $k_{RA} = 0.02$.

Параметры, учитывающие расходы ресурсов, связанные с нагревом, равны $r_{TH} = 0.01$, $r_{TA} = 0.02$.

Критический уровень ресурса для антилопы, обуславливающий перегрев $R_{AC} = 0.2$.

Добавка к ресурсу антилопы за один такт времени при нахождении её в тени дерева $\delta R_A = 0.02$.

Критический уровень ресурса для охотника $R_{HC} = 0.2$.

Вероятность нахождения охотником следа удалённой антилопы $P_T = 0.3$.

Расстояние видимости между охотником и антилопой составляло $D_V = 5$.

Амплитуда случайного варьирования x -координаты охотника перед действием ЗН составляла $D_X = 10$.

Максимальное расстояние до антилопы для охотника, подающего сигнал другим охотникам о том, что антилопа находится поблизости от него, равно $D_S = 5$.

Некоторые из этих параметров для разных вариантов расчётов могли быть варьированы.

Параметры k_{DH} , k_{DA} , k_{RH} , k_{RA} , r_{TH} , r_{TA} учитывают то, что в начале этапа антилопа движется быстрее охотника, но больше его расходует свой ресурс. Это согласуется с охарактеризованными в [4] наблюдениями.

Как правило, результаты моделирования усреднялись по 10000 (для одного охотника) или по 3000 различным расчётам (для группы охотников). Для группы охотников число различных расчётов было уменьшено из-за ограничения компьютерной памяти.

В начале каждого этапа все охотники помещались в клетку с координатами $I_X = 99$, $I_Y = 49$, а антилопа помещалась в клетку с координатами $I_X = 99$, $I_Y = 52$. В результате такого помещения антилопа сначала убегала от охотников, увеличивая свою y -координату, и охотники, преследуя антилопу, тоже сначала увеличивали свои y -координаты. В дальнейшем также происходило перемещение охотников и антилопы преимущественно вдоль y -координаты. Так как мир «растянут» вдоль y -направления ($N_X = 200$, $N_Y = 1000$), то ни охотники, ни антилопа не выходили за пределы мира.

Отметим, что амплитуда D_X случайного изменения x -координаты охотником перед выполнении действия ЗН довольно большая $D_X = 10$, но так как такое изменение происходит как в положительную, так и отрицательную стороны, то эти изменения не приводили к выходу охотников за пределы рассматриваемого мира.

3.2. Случай одного охотника

Сначала рассмотрим результаты, полученные в случае одного охотника ($N_H = 1$). Качество охоты оценивалось долями успешных и неуспешных этапов охоты. Усреднённые по 10000 различным расчётам эти доли составили: доля успешных этапов охоты $P_S = 0.45$, доля неуспешных этапов охоты $P_{US} = 0.55$. То есть в рассматриваемом случае число успешных этапов охоты было близко к числу неуспешных этапов.

Усреднённые зависимости ресурсов охотника и антилопы от времени представлены на рис. 1.

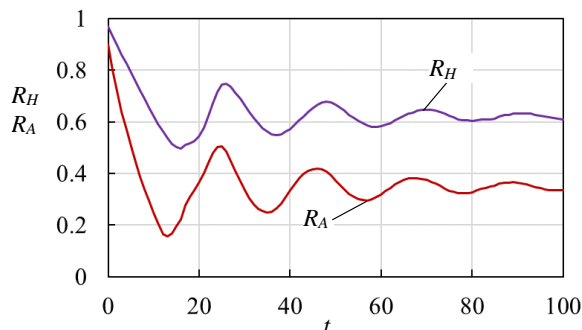


Рис. 1. Зависимости ресурса охотника R_H и антилопы R_A от времени t . Усреднено по 10000 различным расчётам

Отметим, что в настоящей модели рассматривалось общее время для последовательных этапов охоты, т.е. как только один этап заканчивался в момент времени t_E , рассматривался следующий этап, который начинался с момента времени $t_E + 1$. Именно такое общее время для всех последовательных этапов охоты рассматривалось при получении зависимостей переменных от времени t .

Видно (рис. 1), что сначала имеются колебания ресурсов, а затем ресурсы приходят к определённым устойчивым значениям. Хотя начальные ресурсы охотника и антилопы одинаковы (равны 1), в дальнейшем ресурсы охотника превышают ресурсы антилопы. Начальные колебания ресурсов связаны с чередованием этапов охоты (в начале этапа ресурсы равны 1, а затем убывают). В среднем длительность этапа составляла около 20.5 тактов времени.

На рис. 2 представлена зависимость расстояния от охотника до антилопы от времени.

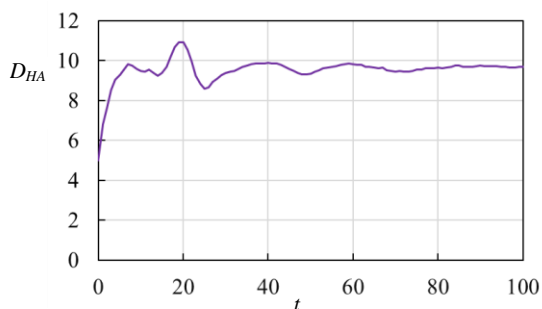


Рис. 2. Зависимость расстояния от охотника до антилопы D_{HA} от времени t . Усреднено по 10000 различным расчётам

3.3. Случай группы охотников

Рассмотрим коллектив взаимодействующих между собой охотников. Охотники могут помогать друг другу, обмениваясь информацией. Число охотников равно 10.

Как сказано выше, если охотник видит недалеко от себя антилопу, то он сообщает это другим охотникам, а также сообщает свои координаты, а другие охотники, находящиеся дальше сообщаемого от антилопы, приходят к нему, т.е. приближаются к антилопе. За счёт такого использования обмена информацией число успешных этапов охоты возрастает. Усреднённые по 3000 различным расчётам доли успешных/неуспешных этапов в этом случае составили: доля успешных этапов охоты $P_S = 0.94$, доля неуспешных этапов охоты $P_{US} = 0.06$. То есть в рассматриваемом случае коллектива сотрудничающих охотников число успешных этапов охоты радикально возрастает по сравнению со случаем одного охотника.

Усреднённые зависимости ресурсов охотников (ресурсы усреднялись как по охотникам, так и по независимым расчётам) и антилопы представлены на рис. 3.

Сопоставляя рис. 1 и рис. 3, видим, что динамики ресурсов в случае одного охотника и группы охотников подобны друг другу. Только в случае группы охотников ресурсы и охотников, и антилопы немного выше, чем в случае одного охотника.

На рис. 4 представлена усреднённая по охотникам зависимость расстояния от охотников до антилопы. Рис. 2, 4 показывают, что в случае группы охотников расстояние между охотниками и антилопой становится меньше, чем аналогичное расстояние в случае отдельного охотника.

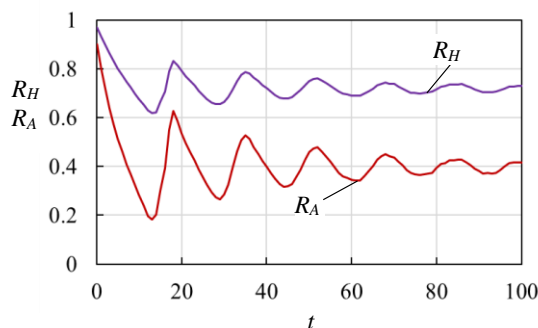


Рис. 3. Зависимости усреднённого ресурса охотников R_H и антилопы R_A от времени t . Усреднено по охотникам и по 3000 различным расчётам

В случае группы охотников средняя длительность этапа охоты составляла 16 тактов времени, т.е. меньше, чем для одного охотника.

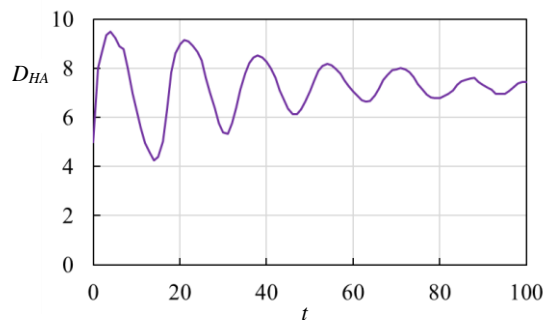


Рис. 4. Зависимость среднего расстояния от охотника до антилопы D_{HA} от времени t . Усреднено по охотникам и по 3000 различным расчётам

3.4. Дополнительные расчёты, обсуждение результатов

Приведённые результаты показывают, что в случае группы охотников охота имеет значительные преимущества по сравнению с одним охотником. Особенно чётко это видно по доле успешных этапов охоты. Для одного

охотника эта доля равна $P_S = 0.45$, для группы охотников эта доля равна $P_S = 0.94$. Конечно, это преимущество частично связано с обменом информацией между охотниками. Отметим, что в рамках настоящей модели для группы охотников был проведён дополнительный расчёт, в котором не было такого обмена между охотниками, в этом случае доля успешных этапов охоты резко уменьшалась (была равна $P_S = 0.72$). Но имеется и ещё один важный аспект: результаты приведенных расчётов получены в предположении, что вероятность нахождения охотником следа удалённой антилопы сравнительно невелика $P_T = 0.3$. За счёт этого охотник с достаточно большой вероятностью совершает действие ЗН, т.е. идёт к ближайшему дереву (в направлении, близком к направлению на антилопу в предыдущие моменты времени). При этом охотник не видит ни антилопы, ни следа антилопы, так как, если бы он видел антилопу или её след, то выполнил бы действие 1Н или 2Н.

Смысл действия ЗН можно интерпретировать следующим образом. Допустим, что охотник достаточно опытный и он довольно часто наблюдал, что антилопа может спастись от жары, находясь некоторое время в тени дерева. Тогда охотник может мысленно сформировать гипотезу: «если я пойду к дереву, то я могу встретить у дерева и антилопу». И он идёт к дереву и довольно часто это ему помогает. Конечно, эта гипотеза интуитивная и вероятностная, тем не менее, она полезная.

Для уточнения роли вероятности нахождения охотником следа удалённой антилопы были проведены два дополнительных варианта расчёта для увеличенной величины этой вероятности: для $P_T = 0.7$ и для $P_T = 1$. Для этих вариантов результаты моделирования усреднялись по 1000 различным расчётам (этого было достаточно для получения достаточно надёжных результатов).

Для $P_T = 0.7$ для одного охотника доли успешных и неуспешных этапов охоты составили: доля успешных этапов охоты $P_S = 0.83$, доля неуспешных этапов охоты $P_{US} = 0.17$. Для группы из 10 охотников эти доли составили: доля успешных этапов охоты $P_S = 0.96$, доля неуспешных этапов охоты $P_{US} = 0.04$. То есть, результаты для группы охотников практически не изменились, а для одного охотника для варианта $P_T = 0.7$ доля успешных этапов охоты резко возросла.

Для варианта $P_T = 1$ след антилопы всегда находился, поэтому действие ЗН вообще не выполнялось, и случайного изменения x - координаты охотниками перед выполнением действия ЗН не происходило, поэтому все

охотники перемещались одинаково и результаты для группы охотников совпали с результатами для одного охотника, причём доля успешных этапов охоты уменьшилась. А именно доля успешных этапов охоты составила $P_S = 0.61$, доля неуспешных этапов охоты была равна $P_{US} = 0.39$.

Также был проведён ещё один дополнительный расчёт для случая одного обучающего на собственном опыте охотника. Рассматривался вариант с вероятностью нахождения следа антилопы $P_T = 0.7$ и вводилась переменная вероятность P_3 выполнения действия ЗН, сначала эта вероятность была малой, но если охотник всё же выполнял действие ЗН и это действие приводило к успеху (приближение к антилопе), то вероятность P_3 выполнения действия ЗН возрастала. И окончательно, в результате обучения вероятность P_3 выполнения действия ЗН (если не выполнялись действия 1Н и 2Н) стала равной 1. То есть обучение приводило к изложенной в настоящей модели схеме применения действий 1Н, 2Н, ЗН.

Итак, результаты дополнительных расчётов подчёркивают важность действия ЗН. И ещё раз акцентируем внимание на интерпретации обоснования этого действия как формирования гипотезы «если пойти к дереву, то там можно встретить в тени антилопу, пополняющую свой ресурс». Выполнение этого действия приводит к увеличению шансов успеха охоты, и тем самым к проверке гипотезы. Формирование и проверка путём использования такой гипотезы в определённом смысле близки к формированию и проверке гипотез в научном познании.

4. Заключение

Таким образом, построена и исследована компьютерная модель формирования и использования знаний в коллективе агентов. Модель анализирует поведение охотников, преследующих антилопу в режиме упорной охоты, охарактеризованном в книге [4]. Особое внимание уделено взаимодействию между агентами-охотниками, обмену информацией между охотниками. При обмене информацией успешные охотники, приблизившиеся к антилопе, сообщают об этом другим охотникам и сообщают также свои координаты. После чего другие охотники перемещаются к этим успешным. Показано, что при таком обмене информацией, охота в коллективе охотников происходит значительно успешнее, чем в случае одного охотника.

Если охотник потерял антилопу из вида и потерял след антилопы, то он перемещается к

ближайшему дереву в том направлении, в котором была ранее антилопа. Такое действие можно интерпретировать как формирование опытным охотником следующей гипотезы «так как антилопа часто останавливается возле деревьев, чтобы отдохнуть и восстановить свой ресурс, следовательно, если я пойду к дереву, то я могу встретить у дерева и антилопу». Использование такой простой гипотезы довольно часто помогает охотнику.

Отметим, что формирование и использование таких гипотез рассматривалось в книге [4] как возникновение предпосылок научного познания. Полученные в настоящей

работе результаты согласуются с высказанными в [4] утверждениями о том, что гипотезы охотников аналогичны гипотезам научного познания.

Настоящая работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0001 «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений, реализуемых на отечественных вычислительных системах» (1023032100070-3-1.2.1).

Generation and Use of Knowledge in a Collective of Agents

V. G. Red'ko

Abstract. A computer model of generation and use of information in a collective of agents is constructed and analyzed in the current article. The model is based on observations of persistence hunting on antelope in the hot Kalahari Desert (South Africa), as described in L. Liebenberg's book "The Origin of Science". The model examines the behavior of a group of agents-hunters pursuing an antelope agent. The hunt is conducted unarmed until either the antelope or the hunters are exhausted. The hunters exchange information about their own location and that of the antelope. This information exchange increases the hunting success of the hunting collective. Experienced hunters can form and use simple hypotheses about the location of antelope and their goal-directed actions. The use of such hypotheses leads to increased hunting success. The formation and use of these hypotheses can be viewed as the origin of certain precursors to scientific cognitive processes. The model demonstrates the effectiveness of information exchange and hypothesis formation in a team of hunting agents.

Keywords: precursors of scientific cognition, hunting agents, antelope agents, information exchange between agents, formation and testing of simple hypotheses

Литература

1. И. Кант. Пролегомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука. Соч. в 6-ти томах. Т. 4, часть 1. М., Мысль, 1965. С. 67–210.
2. В.Г. Редько. Моделирование когнитивной эволюции: На пути к теории эволюционного происхождения мышления. Изд. 2, испр. и доп. М., ЛЕНАНД/URSS, 2019.
3. В.Ф. Турчин. Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. Изд. 2-е. М., ЭТС, 2000.
4. L. Liebenberg. The Origin of Science: The Evolutionary Roots of Scientific Reasoning and its Implications for Citizen Science. Cape Town, South Africa, CyberTracker, 2013.

Поступила в редакцию / Received: 11.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 18.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 23.03.2026.

УДК 004.942

Управление виртуальной моделью мобильного робота с адаптацией на основе информации о виртуальной среде

Е. В. Страшнов¹, Л. А. Финагин²¹НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия, strashnov_evlg@mail.ru;²НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия, antifin@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача разработки методов и алгоритмов управления мобильными роботами с адаптацией на основе информации о виртуальной среде. Реализация такого подхода приводится на примере движения виртуальной модели робота в объезд препятствий и захвата виртуального объекта его манипулятором. Предлагаемое решение включает применение датчиков сенсорного осязания, инверсной кинематики и ПД-регуляторов. Управление движением моделью виртуального робота осуществляется на основе показаний виртуальных датчиков положения и дальномеров, установленных на этой модели робота. В свою очередь, захват виртуального объекта манипулятором робота реализуется с использованием показаний датчиков положения, ориентации и силы, а также с применением метода поординатного спуска для решения задачи инверсной кинематики и ПД-регуляторов для обеспечения требуемого движения рабочего органа манипулятора. Апробация предлагаемых методов и алгоритмов была проведена в системе виртуального окружения VirSim, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, на примере управления виртуальной моделью гусеничного робота МФ-4.

Ключевые слова: мобильный робот, датчики, инверсная кинематика, метод поординатного спуска, ПД-регуляторы, системы виртуального окружения

1. Введение

Одно из направлений в робототехнике связано с выполнением работ в экстремальных условиях, опасных или вредных для непосредственного участия человека. Для этих целей могут применяться мобильные роботы колесного или гусеничного типа, оснащенные манипулятором для захвата и переноса объектов. Управление такими роботами может осуществляться человеком-оператором с помощью пульта или автоматически на основе заранее подготовленных программ. Особый интерес представляют системы управления [1, 2], в которых действия робота определяются на основе обратной связи с окружающей средой, которая может быть частично или полностью недетерминированной. Реализация такой обратной связи осуществляется с применением датчиков сенсорного осязания роботов, которые измеряют необходимую информацию о внешней среде. К основным датчикам относятся инерциальные датчики для вычисления пространственного положения роботов (гироскопы, акселерометры и магнитометры), датчики силомоментного осязания для измерения контактного взаимодействия робота с объектами

и дальномеры для определения расстояний до объектов. Создание систем управления роботами с применением обратной связи на основе показаний датчиков является важной и актуальной задачей.

Тестирование разрабатываемых методов и алгоритмов управления роботами актуально проводить на виртуальных моделях роботов в виртуальной среде. Это позволяет облегчить процесс создания и тестирования систем управления и в дальнейшем уменьшить риск поломки реальных роботов. В данной работе предлагаются методы и алгоритмы управления мобильными роботами, основанные на использовании показаний виртуальных датчиков [3, 4]. Моделирование движения мобильных роботов реализовано в системе виртуального окружения VirSim [5], разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ. В этом программном комплексе управление роботами осуществляется путем расчета функциональных схем, которые создаются в специальном редакторе [6]. Эти схемы состоят из набора связанных блоков различного типа (логические, математические и т.д.), включая блоки датчиков и исполнительных устройств. Апробация предлагаемых в статье методов и алгоритмов

проводилась в VirSim на примере движения виртуальной модели гусеничного робота МФ-4 в заданную позицию в объезд препятствий, перемещения рабочего органа его манипулятора в требуемое положение с заданной ориентацией и захвата объекта с его удержанием.

2. Движение виртуальной модели мобильного робота к цели в объезд препятствий

Рассматривается задача движения мобильного робота в горизонтальной плоскости при наличии препятствий. При этом предполагается, что препятствия на пути к цели являются выпуклыми и их можно объехать. Положение робота задается в мировой системе координат с помощью точки $P = (X, Y)$, а ориентация – направлением его продольной оси, задаваемым единичным вектором $\mathbf{n} = (n_x, n_y)^T$. Пусть известно текущее положение робота $P_c = (X_c, Y_c)$ с направлением продольной оси, задаваемым единичным вектором $\mathbf{n}_c = (n_{cx}, n_{cy})^T$. Тогда данная задача заключается в том, что требуется обеспечить движение робота в объезд препятствий в заданную целевую точку $P_d = (X_d, Y_d)$ и развернуть его по направлению $\mathbf{n}_d = (n_{dx}, n_{dy})^T$.

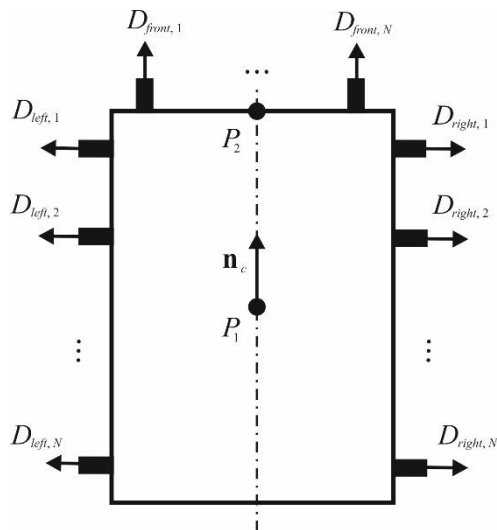


Рис. 1. Схематичное изображение датчиков на роботе

Для решения этой задачи предлагается использовать показания датчиков положения и дальномеров, установленных на роботе (см. рис. 1). Пусть один датчик положения расположен в центре робота и вычисляет координаты точки $P_1 = (X_1, Y_1)$,

а другой – на передней части робота и определяет координаты точки $P_2 = (X_2, Y_2)$. Тогда положение и вектор продольной оси робота вычисляются как

$$P_c = P_1, \quad \mathbf{n}_c = \overrightarrow{P_1 P_2} / \|\overrightarrow{P_1 P_2}\|. \quad (1)$$

Пусть дальномеры располагаются на левой, передней и правой стороне робота и измеряют расстояния до ближайшего объекта вдоль направления, перпендикулярного стороне робота. В этом случае расстояние до объекта выбирается как минимальное значение из показаний дальномеров по каждой стороне робота:

$$\begin{aligned} D_{left} &= \min(D_{left,1}, D_{left,2}, \dots, D_{left,N}); \\ D_{front} &= \min(D_{front,1}, D_{front,2}, \dots, D_{front,N}); \\ D_{right} &= \min(D_{right,1}, D_{right,2}, \dots, D_{right,N}). \end{aligned} \quad (2)$$

Управление движением мобильного робота осуществляется путем подачи напряжений на электродвигатели его ведущих колес. Для простоты будем считать, что у робота всего два ведущих колеса – левое и правое. Тогда на левое колесо подается напряжение U_L , а на правое колесо – напряжение U_R . Для движения робота вперед на оба колеса подаются напряжения $U_L = U_R = U_1$, для поворота по часовой стрелке – $U_L = U_2$ и $U_R = -U_2$, для поворота против часовой стрелки – $U_L = -U_2$ и $U_R = U_2$, где $U_1 > 0$ и $U_2 > 0$ – заданные значения напряжений.

Опишем сначала алгоритм движения мобильного робота в отсутствие препятствий. В этом случае выделяются три стадии движения робота: поворот по направлению к целевой точке P_d , его движение к ней и разворот по заданному направлению \mathbf{n}_d . В предлагаемом алгоритме сначала проверяется, что робот еще не достиг целевой точки, то есть выполнено условие $d = \|\overrightarrow{P_c P_d}\| > \varepsilon_1$, где $\varepsilon_1 > 0$ – заданное значение.

Тогда поворачиваем робот по направлению

$$\mathbf{n}_1 = (n_{1x}, n_{1y})^T = \overrightarrow{P_c P_d} / \|\overrightarrow{P_c P_d}\| \quad (3)$$

Для этого нужно совместить вектор оси робота \mathbf{n}_c с вектором \mathbf{n}_1 . Направление поворота зависит от величины проекции векторного произведения векторов \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_c на ось Z , которая перпендикулярна горизонтальной плоскости движения робота. Эта проекция вычисляется как

$$n_{1c,z} = (\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_c)_z = n_{1x} n_{cy} - n_{1y} n_{cx}. \quad (4)$$

Тогда, если $n_{1c,z} > \varepsilon_2$, то поворачиваем робот по часовой стрелке, если $n_{1c,z} < -\varepsilon_2$ – против

часовой стрелки, где $\varepsilon_2 > 0$ – заданное значение. В том случае, если векторы \mathbf{n}_c и \mathbf{n}_1 – противоположно направленные, что соответствует условиям $|n_{1c,z}| \leq \varepsilon_2$ и $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_c \leq -\sqrt{1-\varepsilon_2^2}$, то поворачиваем робот по часовой стрелке. После выполнения поворота осуществляем движение робота вперед к целевой точке P_d до тех пор, пока не будет выполнено условие $d \leq \varepsilon_1$. Затем поворачиваем его так, чтобы совместить векторы \mathbf{n}_c и \mathbf{n}_d .

При наличии препятствий движение робота корректируется так, чтобы их объехать. Для этого используются показания дальномеров (2), для которых зададим два пороговых значения: D_{close} – препятствие находится близко, D_{near} – очень близко. Если $D_{front} \leq D_{near}$, то поворачиваем робот по часовой стрелке, пока слева не обнаружится препятствие, что соответствует условию $D_{left} \leq D_{close}$. Далее робот движется вперед до тех пор, пока слева есть препятствие и не будет выполнено $D_{left} > D_{close}$. Затем робот снова осуществляет движение по направлению к цели. При наличии следующего препятствия алгоритм объезда препятствий повторяется. Данный алгоритм работает при допущении, что препятствия по направлению к цели являются выпуклыми и расположены на таком расстоянии друг от друга, что робот в состоянии их объехать.

Приведем полный алгоритм управления движением мобильного робота.

Задано: целевая точка $P_d = (X_d, Y_d)$ и единичный вектор \mathbf{n}_d .

1. Используем показания датчиков и определяем P_c , \mathbf{n}_c , D_{left} , D_{right} и D_{front} по формулам (1) и (2).

2. Вычисляем $d = \|\overline{P_c P_d}\|$.

3. Цикл, пока $d > \varepsilon_1$:

3.1. Если нет препятствий ($D_{left} > D_{near}$, $D_{front} > D_{near}$ и $D_{right} > D_{near}$), то

3.1.1. Вычисляем вектор \mathbf{n}_1 по формуле (3).

3.1.2. Определяем $n_{1c,z}$ по формуле (4).

3.1.3. Если $n_{1c,z} > \varepsilon_2$, то $U_L = U_2$ и $U_R = -U_2$.

3.1.4. Если $n_{1c,z} < -\varepsilon_2$, то $U_L = -U_2$ и $U_R = U_2$.

3.1.5. Если $|n_{1c,z}| \leq \varepsilon_2$ и $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_c \leq -\sqrt{1-\varepsilon_2^2}$,

то $U_L = U_2$ и $U_R = -U_2$.

3.1.6. Если $|n_{1c,z}| \leq \varepsilon_2$ и $\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_c \geq \sqrt{1-\varepsilon_2^2}$,

то $U_L = U_1$ и $U_R = U_1$.

3.2. Если обнаружено препятствие слева или справа от робота ($D_{left} \leq D_{near}$ или $D_{right} \leq D_{near}$), то движемся вперед $U_L = U_1$ и $U_R = U_1$.

3.3. Если препятствие находится впереди робота $D_{front} \leq D_{near}$, то поворачиваем робот по часовой стрелке:

3.3.1. Пока не будет выполнено $D_{left} \leq D_{close}$: $U_L = U_2$ и $U_R = -U_2$.

3.3.2. Пока не будет выполнено $D_{left} > D_{close}$, движемся вперед $U_L = U_1$ и $U_R = U_1$.

3.4. Выполняем пункты 1 и 2.

4. Вычисляем $n_{dc,z} = (\mathbf{n}_d \times \mathbf{n}_c)_z$ по формуле (4) подстановкой \mathbf{n}_d вместо \mathbf{n}_1 .

5. Если $n_{dc,z} > \varepsilon_2$, то $U_L = U_2$ и $U_R = -U_2$.

6. Если $n_{dc,z} < -\varepsilon_2$, то $U_L = -U_2$ и $U_R = U_2$.

7. Если $|n_{dc,z}| \leq \varepsilon_2$ и $\mathbf{n}_d \cdot \mathbf{n}_c \leq -\sqrt{1-\varepsilon_2^2}$, то $U_L = U_2$ и $U_R = -U_2$.

8. Выполняем пункт 1.

9. Повторяем пункты 4-8 до тех пор, пока не будут выполнены условия $|n_{dc,z}| \leq \varepsilon_2$ и $\mathbf{n}_d \cdot \mathbf{n}_c \geq \sqrt{1-\varepsilon_2^2}$.

3. Захват объекта манипулятором виртуальной модели робота

В этой задаче требуется захватить и перенести объект с помощью манипулятора мобильного робота. При этом предполагается, что рабочий орган (РО) манипулятора представляет собой механизм, содержащий две губки захватного устройства с плоскопараллельным движением и управляемый посредством одного двигателя [7]. Рассматриваемая задача включает в себя несколько стадий: подведение РО к объекту, захват этого объекта и его перенос в требуемую позицию. Для решения этой задачи задействованы метод расчета инверсной кинематики, ПД-регуляторы, а также показания датчиков положения, ориентации и силы. Для того, чтобы переместить и ориентировать РО в заданную систему координат необходимо решить задачу инверсной кинематики (рис. 2). Пусть целевое положение РО задается точкой

$P_d^{wo} = (X_d, Y_d, Z_d)$, а его ориентация – углами Эйлера φ_d , ψ_d и θ_d последовательных поворотов вокруг осей X , Y и Z относительно мировой системы координат, соответственно.

Управление РО робота осуществляется путем его совмещения с промежуточными системами координат $P_k X_k Y_k Z_k$, $k = \overline{1, M}$. Движение РО рассматривается вдоль прямой, соединяющей его начальное положение в точке $P_c^{wo} = (X_c, Y_c, Z_c)$ с точкой P_d^{wo} . На этой прямой выбираем промежуточные точки следующим образом

$$P_k = P_c^{wo} + k \Delta l \frac{\overline{P_c^{wo} P_d^{wo}}}{\| \overline{P_c^{wo} P_d^{wo}} \|}, \quad k = \overline{1, M}, \quad (5)$$

где M – количество точек, Δl – заданное расстояние между точками.

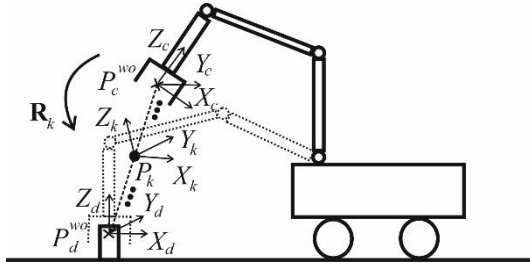


Рис. 2. Задача инверсной кинематики

Текущая ориентация РО задается системой координат $P_c^{wo} X_c Y_c Z_c$ с матрицей \mathbf{R}_c . Перевод РО в целевую систему координат $P_d^{wo} X_d Y_d Z_d$ реализуется посредством вычисления углов Эйлера φ , ψ и θ , задающих последовательные повороты сначала вокруг оси X на угол φ , затем вокруг оси Y на угол ψ и наконец вокруг оси Z на угол θ . Для задания промежуточных ориентаций РО рассмотрим матрицу

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_{Z_c}(\theta_k) \cdot \mathbf{R}_{Y_c}(\psi_k) \cdot \mathbf{R}_{X_c}(\varphi_k) \cdot \mathbf{R}_c, \quad (6)$$

где $\varphi_k = \begin{cases} k\varphi / k_1, & k < k_1 \\ \varphi, & k_1 \leq k \leq M \end{cases}$,

$$\psi_k = \begin{cases} 0, & k < k_1 \\ (k - k_1)\psi / (k_2 - k_1), & k_1 \leq k < k_2 \\ \psi, & k_2 \leq k \leq M \end{cases}$$

$$\theta_k = \begin{cases} 0, & k < k_2 \\ (k - k_2)\theta / (M - k_2), & k_2 \leq k \leq M \end{cases}$$

$$k = \overline{1, M}, \quad 0 < k_1 < k_2 < M.$$

В задаче инверсной кинематики требуется найти такие изменения углов Δq_i , $i = \overline{1, N}$ поворотов в сочленениях робота, чтобы перевести РО робота в систему координат

с положением P_k и матрицей \mathbf{R}_k , вычисляемые по формулам (5) и (6). Для решения этой задачи нами был задействован метод покоординатного спуска [8, 9], с реализацией которого разработан алгоритм [10, 11], основанный на применении ПД-регуляторов, а также показаний датчиков положения и ориентации. В рамках предложенного подхода с помощью ПД-регуляторов осуществляется расчет напряжений U_i , подаваемых на электродвигатели в сочленениях манипулятора для обеспечения требуемых углов поворотов Δq_i , $i = \overline{1, N}$. Датчики положения и ориентации предназначены для контроля достижения РО своих целевых координат. После того, как РО переведен в промежуточную систему координат $P_k X_k Y_k Z_k$, что соответствует выполнению условий $\| \overline{P_c^{wo} P_k} \| \leq \sigma_1$, $\| \mathbf{R}_c - \mathbf{R}_k \| \leq \sigma_2$, где σ_1 и σ_2 – заданные значения точности, осуществляется переход к следующей системе координат $P_{k+1} X_{k+1} Y_{k+1} Z_{k+1}$. И этот процесс продолжается до тех пор, пока РО не достигнет целевой системы координат $P_d^{wo} X_d Y_d Z_d$.

После этого осуществляется захват объекта с подачей напряжения на двигатель захватного устройства $U_{grasp} = U_* > 0$. Для измерения силы сжатия F применяется датчик силы, установленный непосредственно на губках РО. С помощью датчика силы осуществляется контроль над выполнением операции захвата объекта. Если датчик силы показывает значение $F \geq F_*$, то считается, что захват объекта выполнен, и можно переносить объект в новое положение, применяя алгоритм управления движением мобильного робота.

Приведем полный алгоритм управления манипулятором робота.

Задано: целевое положение РО $P_d^{wo} = (X_d, Y_d, Z_d)$ и его ориентация, задаваемая углами Эйлера φ_d , ψ_d и θ_d .

1. С помощью датчиков положения и ориентации определяем текущее положение РО $P_c^{wo} = (X_c, Y_c, Z_c)$ и углы Эйлера φ , ψ и θ для перевода РО в систему координат $P_d^{wo} X_d Y_d Z_d$

2. Инициализация $k = 1$.

3. Цикл, пока $\| \overline{P_c^{wo} P_d^{wo}} \| > \sigma_1$, $\| \mathbf{R}_c - \mathbf{R}_d \| > \sigma_2$:

3.1. Вычисляем точку P_k по формуле (5) и матрицу \mathbf{R}_k по формуле (6).

3.2. Решаем задачу инверсной кинематики: вычисляем углы Δq_i в сочленениях.

3.3. Применяя ПД-регуляторы, вычисляем напряжения U_i для полученных Δq_i .

3.4. Повторяем пункт 1.

3.5. Если $\|P_c^{wo} P_k\| \leq \sigma_1$, $\|R_c - R_k\| \leq \sigma_2$, то

$k = k + 1$.

4. Осуществляем захват объекта с подачей напряжения на двигатель захватного устройства $U_{grasp} = U_* > 0$.

5. Если $F \geq F_*$, то захват объекта выполнен. Переводим РО робота в новое положение P_d^{wo} и ориентируем его новыми углами Эйлера φ_d , Ψ_d и θ_d .

4. Управление роботом в системе виртуального окружения VirSim

Апробация предложенных в статье решений была проведена в системе виртуального окружения VirSim [5] на примере управления виртуальной моделью гусеничного робота МФ-4. Данный программный комплекс разработан в НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ и предназначен для моделирования движения сложных динамических систем и тренировки операторов по выполнению операций с помощью компьютерной симуляции. В рамках этого программного комплекса виртуальные модели роботов и окружающей обстановки создаются в системе компьютерного моделирования 3ds Max и затем экспортируются в подсистемы динамики и визуализации. Управление роботами в VirSim осуществляется с

помощью функциональных схем, которые создаются в специальном редакторе из набора соединенных линиями блоков различного типа, включая блоки датчиков и исполнительных устройств (двигатели манипулятора и ведущих колес робота). На каждом шаге моделирования в подсистеме управления программного комплекса VirSim выполняется расчет функциональных схем с целью вычисления управляющих сигналов – напряжений, подаваемых на электродвигатели робота. Эти управляющие сигналы используются в подсистеме динамики для расчета новых координат виртуальных объектов, включая их положение и ориентацию. Затем вычисленные координаты объектов передаются в подсистему визуализации, которая осуществляет высококачественный рендеринг виртуальной сцены в режиме реального времени.

Для мобильного робота МФ-4 была рассмотрена задача захвата и переноса радиоактивного контейнера внутри ангара, содержащем бочки, коробки, паллеты и т.д. В этой задаче робот должен подъехать к контейнеру в объезд препятствий, схватить его, затем перевезти к специальной урне и поместить его туда. В качестве пороговых значений расстояний для объезда препятствий были выбраны значения $D_{close} = 50$ см и $D_{near} = 25$ см.

Рассматриваемые задачи были реализованы с помощью разработанных в статье алгоритмов, которые представлены в виде функциональной схемы автоматического управления виртуальной моделью гусеничного робота МФ-4. На рис. 3 показан фрагмент такой схемы для управления движением робота в объезд препятствий.

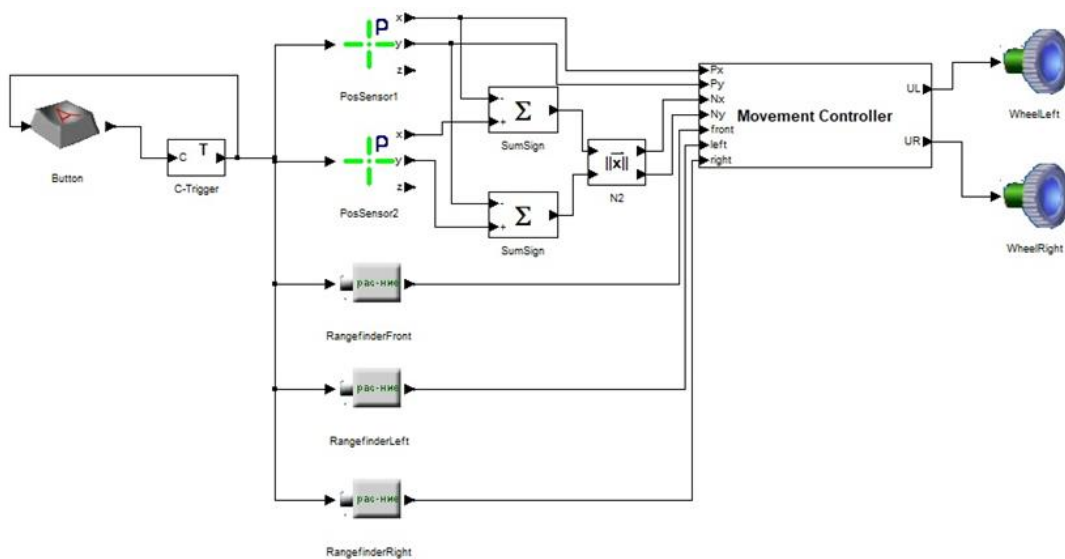


Рис. 3. Функциональная схема управления виртуальной моделью робота МФ-4

В этой схеме нажатием на кнопку виртуального пульта человек-оператор передает роботу задание, выполняемое роботом автоматически. Показания датчиков положений и дальномеров передаются в блок регулятора управления движения роботом, в котором

выбирается режим перемещения робота. Выходами этой схемы являются напряжения, подаваемые на двигатели ведущих колес робота.

На рисунках 4 и 5 показан результат выполнения задач объезда роботом препятствий и опускание радиоактивного контейнера в урну.



Рис. 4. Объезд препятствия виртуальной моделью робота МФ-4



Рис. 5. Опускание радиоактивного контейнера в урну манипулятором виртуальной модели робота МФ-4

5. Заключение

В работе предложены методы и алгоритмы управления виртуальными роботами, основанные на обратной связи с помощью датчиков сенсорного осязания. Рассмотрены задачи движения робота к цели в объезд препятствий и захват объекта с помощью манипулятора робота. В дальнейшем ожидается развитие

предложенных подходов с применением методов нечеткой логики для повышения качества движения роботов.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

Control of a Virtual Model's Mobile Robot with Adaptation Based on Information About the Virtual Environment

E. V. Strashnov, L. A. Finagin

Abstract. This paper considers the task of methods and algorithms development for control of mobile robots with adaptation based on information about the virtual environment. The implementation of this approach is shown using the example of a virtual robot model moving around obstacles and grasping a virtual object with its manipulator. Proposed solution includes the use of sensors, inverse kinematics and PD controllers. The virtual robot model movement control is based on the virtual position sensors readings and rangefinders mounted on this robot model. In turn, the grasping of an object by a manipulator of robot is implemented using position, orientation and force sensors, as well as using the coordinate descent method to solve the inverse kinematics problem and PD-regulators to provide the desired manipulator motion. The proposed methods and algorithms were tested in the VirSim virtual environment system, developed at the NRC «Kurchatov Institute» - SRISA, using the example for control of a virtual MF-4 tracked robot model.

Keywords: mobile robot, sensors, inverse kinematics, coordinate descent method, PD-regulators, virtual environment systems

Литература

1. Е. И. Юревич Основы робототехники. 3-е изд., пер. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2010, 360 с.
2. M. Spong and M. Vidyasagar. Robot dynamics and control. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
3. Е. В. Страшнов, И. Н. Мироненко. Имитационное моделирование инерциальных датчиков в системах виртуального окружения. «Успехи кибернетики», Т. 5 (2024), № 1, 24-33.
4. М. В. Михайлюк, Е. В. Страшнов, Д. М. Логинов. Моделирование датчиков в системах виртуального окружения. «Труды НИИСИ РАН», Т. 8 (2018), № 2, 70-76.
5. М. В. Михайлюк, А. В. Мальцев, П. Ю. Тимохин, Е. В. Страшнов, Б. И. Крючков, В. М. Усов. Система виртуального окружения VirSim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. «Пилотируемые полеты в космос». Т. 37 (2020), № 4, 72-95.
6. М. В. Михайлюк, М. А. Торгашев. Визуальный редактор и модуль расчета функциональных схем для имитационно-тренажерных комплексов. «Программные продукты и системы», 2014, № 4. 10-15.
7. М. А. Торгашев, Е. В. Страшнов. Моделирование динамики электроприводов виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах. «Мехатроника, автоматизация, управление», Т. 17 (2016), № 11, 762 – 768.
8. L. C. Wang, C. C. Chen. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators. “IEEE Transactions on Robotics and Automation”, V. 7 (1991), no. 4, 489-499.
9. B. Kenwright. Inverse kinematics – cyclic coordinate descent (ccd). “Journal of Graphics Tools”, V. 16 (2012), no. 4, 177-217.
10. Е. В. Страшнов, М. В. Михайлюк. Моделирование полуавтоматического режима управления манипуляционными роботами в системах виртуального окружения. «Вестник кибернетики», 2017, № 4, 191-198.
11. Е. В. Страшнов, М. А. Торгашев. Супервизорное управление антропоморфными роботами с применением инверсной кинематики. «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. Материалы IV Международной научно-практической конференции», 2017, Выпуск 4, Том 1, 186-190.

Поступила в редакцию / Received: 20.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 30.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 31.03.2026

УДК 621.375.4

КМОП-зарядочувствительный усилитель для пиксельного детектора

Ю. Б. Рогаткин

НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия, ryb@cs.niisi.ras.ru;

Аннотация. Разработан зарядочувствительный усилитель в архитектуре аналоговой части электроники для пиксельного детектора регистрации заряженных частиц. Разработанный зарядочувствительный усилитель позволяет снизить влияние тока утечки детектора, а также осуществлять регулировку соотношения заряда к выходному напряжению, установочного напряжения, рабочего тока и потребляемой мощности. Усилитель обладает низкими шумами и сверхнизкой мощностью потребления.

Ключевые слова: зарядочувствительный усилитель, пиксельный детектор

1. Введение

В последние два десятилетия получило широкое развитие область разработки передовых гибридных пиксельных детекторов, позволяющих точно обнаруживать отдельные рентгеновские фотоны или частицы в каждом конкретном случае [1]. Эти технологии находят широкое применение в различных научных областях, включая медицинскую визуализацию, рентгеновские камеры на синхротронах, анализ материалов на основе рентгеновских лучей, электронную микроскопию и другие. Результатом данных разработок является Medipix — семейство гибридных пиксельных детекторов для счёта фотонов и отслеживания частиц. Такие детекторы состоят из двух основных частей: полупроводникового детектора и считывающей микросхемы. Две части — отдельные компоненты, их можно разрабатывать и оптимизировать отдельно друг от друга. В основе Medipix1 заложен принцип архитектуры подсчета одиночных фотонов с шагом пикселя 170 мкм и возможностью получения рентгеновских изображений без помех благодаря использованию интерфейса обработки импульсов при установке порога обнаружения значительно выше уровня фонового шума [2]. Medipix2 показал возможность получения спектроскопических изображений с небольшим шагом пикселя в 55 мкм, используя двойные пороговые значения на пиксель [3]. В Medipix3 реализуется меж пиксельный алгоритм непосредственно на пикселе размером 55 мкм. Это позволило устранить искажение

энергетического спектра, вызванное диффузией заряда [6, 7]. Medipix4 позволяет обрабатывать специализированную интегральную схему с четырех сторон с минимальной мертвой зоной [8]. Падающая частица в активных пиксельных детекторах цифровых систем регистрации элементарных частиц индуцирует электрический заряд, величина которого описывает параметры частицы в детекторе. Поскольку электрический заряд, создаваемый одной частицей, относительно слаб, сигнал детектора сначала усиливается непосредственно в зоне облучения и только затем передается дальше. Поэтому одной из основных составляющих считывающей электроники, расположенной в непосредственной близости от детектора, является зарядочувствительный усилитель.

2. Зарядочувствительный усилитель

Разработанный зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) предназначен для архитектуры подсчета одиночных фотонов или частиц с шагом пикселя 75 мкм и построен на основе дифференциального интегрирующего усилителя с цепью отрицательной обратной связи для автоматической компенсации тока утечки детектора. Упрощенная принципиальная схема ЗЧУ представлена на рисунке 1. Имеется возможность подстройки коэффициента усиления зарядочувствительного усилителя путем подачи цифрового сигнала на вход “gain<1:0>”. Входы “vfbk”, “vbp2” и “vbn1” нужны для задания режима по постоянному

току. Вход подключения к детектору – “bump”, выход ЗЧУ – “vout_pr”. Принцип автоматической обратной связи для компенсации токов утечки детектора описан в работе [8]. Дифференциальный КМОП-усилитель на транзисторах T3 и T4 обеспечивает быстрый возврат к нулю через транзисторы обратной связи, а управляемые транзисторы T3 и T15 компенсирует утечку постоянного тока детектора. Преимущество такой конфигурации в том, что она позволяет компенсировать положительные токи постоянного тока (накопление дырок), превышающие $I_{T2}/2$, при этом отрицательные токи (накопление электронов) должны быть равны или меньше $I_{T2}/2$.

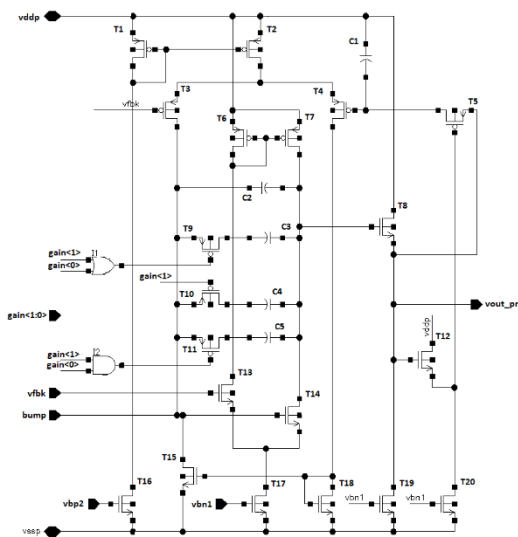


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема ЗЧУ

Изменение коэффициента усиления достигается путем включения дополнительных интегрирующих конденсаторов C3, C4 и C5 в цепь отрицательной обратной связи основного дифференциального усилителя на транзисторах T13 и T14.

Для исключения влияния импульсного выходного сигнала ЗЧУ на работу отрицательной обратной связи автоматической компенсации тока утечки детектора предусмотрен ФНЧ на транзисторе T5 и конденсаторе C1. Задание режима по постоянному току при работе ЗЧУ в составе пиксельной матрицы может обеспечиваться либо путем подачи сигналов с устанавливающих цифро-аналоговых преобразователей [9], либо с помощью специальной схемы задания режима как описано в работе [10].

3. Результаты расчетов и моделирования

ЗЧУ был спроектирован в рамках КМОП технологии с проектными нормами в несколько десятков нанометров. Вид топологии ЗЧУ представлен на рисунке 2. Размеры собственно ЗЧУ без учета конденсатора ФНЧ C1, который выполнен в верхних металлах и не препятствует размещению других элементов под ним, составляет $16 \text{ мкм} \times 14 \text{ мкм}$.

Ниже приведены результаты моделирования с учетом паразитных элементов экстрагированных из топологии ЗЧУ.

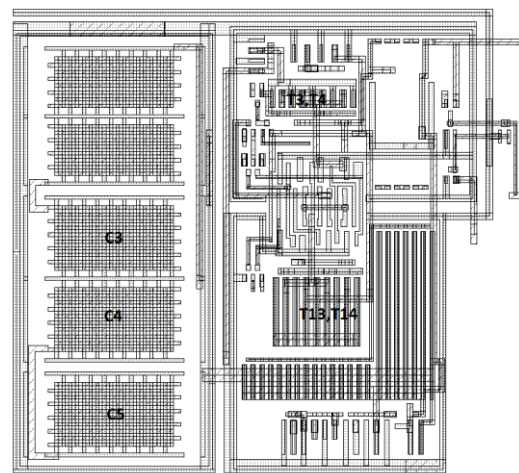


Рис. 2. Топология зарядочувствительного усилителя

3.1. Шумовые характеристики ЗЧУ

Одним из важных параметров ЗЧУ является эквивалентный заряд шума (ENC) на входе усилителя — это заряд сигнала, который создаёт на выходе амплитуду, равную среднеквадратичному шуму. Значение ENC зависит от емкости детектора C_{det} , от тока утечки детектора $I_{leakage}$, от емкости входного полевого транзистора C_{in} а также включает как тепловой, так и мерцающий шум. Необходимо обратить внимание на минимизацию емкости ЗЧУ и тока утечки детектора, поскольку ENC существенным образом зависит от этих параметров. Проблемы с током утечки становятся критическими, особенно после облучения, при котором ток утечки достигает нескольких наноампер. В данной работе ЗЧУ проектировался с возможностью работы от детекторов с током утечки от 0 до 50 нА. В этом диапазоне токов утечки и рациональном выборе параметров входного

транзистора при емкости детектора до 50 фФ расчетная плотность шумов не превышает 5,6 нВ²/Гц в полосе частот от 0 до 1кГц.

3.2. Влияние токов утечки на усилительные характеристики ЗЧУ

Обеспечена возможность работы ЗЧУ с детекторами, имеющими ток регистрации события как втекающего, так и вытекающего направления. На рисунке 3 представлены результаты моделирования зависимости выходного сигнала ЗЧУ от входного сигнала, пересчитанного в Кe⁻. При моделировании на вход ЗЧУ подавался прямоугольный сигнал тока длительностью 10 нс. Величине входного сигнала в 1 Кe⁻ соответствует ток амплитудой 16 нА. На рисунке 3 представлены зависимости для различных направлений тока детектора и различных величинах тока утечки.

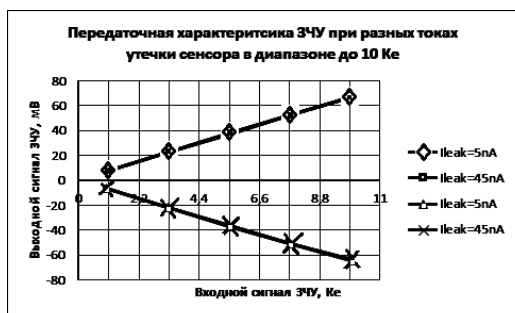


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ЗЧУ от входного заряда

Из анализа результатов, представленных на рисунке 3 видно, что изменение тока утечки детектора от 5 нА до 45 нА с одной стороны не влияет на усилительные свойства ЗЧУ, а с другой стороны - зависимости для различных направлений тока детектора отличаются только полярностью и имеют практически одинаковый вид.

3.3. Усилительные характеристики ЗЧУ

Разработанный ЗЧУ предназначен для работы в четырех диапазонах усиления при величине входного заряда до 10 Кe⁻, до 20 Кe⁻, до 30 Кe⁻ и до 40 Кe⁻. При максимальном усилении ЗЧУ ($gain<1:0>=11$) ток детектора изменялся от 16 нА, что соответствует входному заряду 1Кe⁻, до 160нА. Коэффициент усиления ЗЧУ при этом составил 6,71 мВ/Кe⁻. Моделировались передаточные характеристики ЗЧУ с различными величинами усиления при токе утечки детектора 5 нА, как наиболее характерном для современных детекторов. Результаты представлены на рисунке 4.

Значения коэффициентов усиления в разных диапазонах сведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон входного заряда, Кe ⁻	Значение кода $gain<1:0>$	Коэффициент усиления, мВ/Кe ⁻
до 10	1 1	6,71
до 20	1 0	3,44
до 30	0 1	2,31
до 40	0 0	1,74

В таблице 1 и далее при анализе данного материала следует учитывать особенности используемой при проектировании технологии. В качестве конденсаторов использовались металлические конденсаторы *strtmom*. Особенностью данных конденсаторов является наличие определенного дискрета в выборе величины емкости. Поскольку данные конденсаторы широко использовались и в ряде случаев определяли основные характеристики блоков аналоговой части пикселя, точно «выставить» требуемые величины параметров было весьма проблематично. Так из таблицы 2 видно, что коэффициент усиления меняется не совсем пропорционально диапазону входного заряда. Диапазон изменяется в 4 раза, а коэффициент усиления изменяется в 3,86 раза. Однако, данное обстоятельство может учитываться при работе с ИМС.

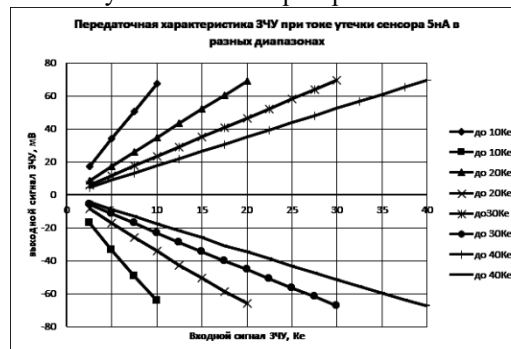


Рис. 4. Зависимости выходного сигнала ЗЧУ от входного заряда в разных диапазонах усиления

Расчетная нелинейность передаточной характеристики ЗЧУ в диапазоне до 10 Кe⁻ не превышает 0,7%, а в диапазоне до 40 Кe⁻ - 1,8%.

На рисунках 5 и 6 представлена форма выходного сигнала ЗЧУ при разных значениях входного сигнала.

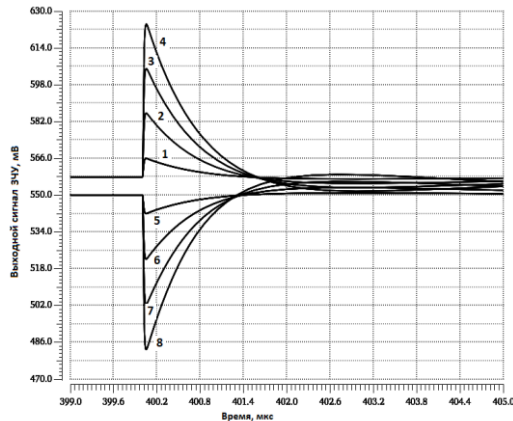


Рис.5. Выходной сигнал ЗЧУ при токе утечки детектора 5 нА: кривые 1-4 для вытекающего тока детектора, кривые 5-8 для втекающего; кривые 1,5 соответствуют току 19 нА, кривые 2,6 – 66 нА, кривые 3,7-113 нА и кривые 4,8-160 нА

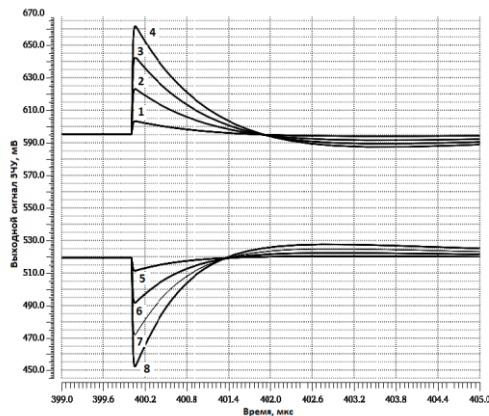


Рис. 6. Выходной сигнал ЗЧУ при токе утечки детектора 45 нА: кривые 1-4 для вытекающего тока детектора, кривые 5-8 для втекающего; кривые 1,5 соответствуют току 19 нА, кривые 2,6 – 66 нА, кривые 3,7-113 нА и кривые 4,8-160 нА

На рисунке 7 приведена форма выходного сигнала ЗЧУ в разных диапазонах усиления.

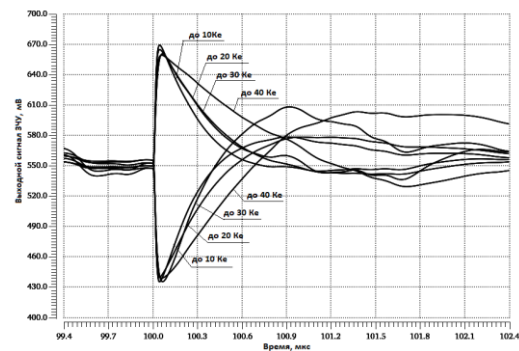


Рис7. Выходной сигнал ЗЧУ в разных диапазонах усиления

4. Заключение

Была разработана архитектура аналоговой электроники пиксельного детектора, позволяющая снизить ток утечки детектора и шумы ЗЧУ, а также регулировать соотношение заряда к выходному напряжению, установочное напряжение, рабочий ток и потребляемую мощность. Была разработана топология ЗЧУ по технологическим нормам в несколько десятков нанометров со схемой компенсации тока утечки, потребляющая сверхнизкую мощность около 1,5 мкВт. Другими основными параметрами ЗЧУ являются следующие: двуполярный выходной сигнал со временем достижения максимума около 20 нс и максимальном коэффициенте передачи 6,71 мВ/Ке⁻. Усредненная по диапазонам усиления нелинейность передаточной характеристики ЗЧУ не превышает 1,0%, а эквивалентный уровень шума в диапазоне до 10 Ке⁻ с емкостью детектора Cdet = 50 фФ составляет около 115 е⁻.

Работа выполнена в рамках темы № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов».

CMOS charge-sensitive amplifier for pixel Detector

Y. B. Rogatkin

Abstract. A charge-sensitive amplifier has been developed in the architecture of the analog part of electronics for a pixel detector for detecting charged particles. The developed charge-sensitive amplifier reduces the effect of the detector leakage current, as well as adjust the ratio of charge to output voltage, setting voltage, operating current and power consumption. The amplifier has low noise and ultra-low power consumption.

Keywords: charge-sensitive amplifier, pixel detector

Литература

1. E.H. Heijne, History and future of radiation imaging with single quantum processing pixel detectors, *Radiation Measurements* 140 (2021) 106436.
2. M. Campbell, E. Heijne, G. Meddeler, E. Pernigotti and W. Snoeys, A readout chip for a 64/spl times/64 pixel matrix with 15-bit single photon counting, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 45 (1998) 751.
3. X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo and E. Pernigotti, Medipix2: A 64-k pixel readout chip with 55-/spl mu/m square elements working in single photon counting mode, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 49 (2002) 2279.
4. M. Chmeissani, M. Maiorino, G. Blanchot, G. Pellegrini, J. Garcia, M. Lozano et al., Charge sharing measurements of pixilated cdte using medipix-ii chip, in *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510)*, vol. 1, pp. 787–791 Vol.1, 2004, DOI.
5. L. Tlustos, Performance and limitations of high granularity single photon processing X-ray imaging detectors: дис. ... канд.– Vienna, Tech. U., Atominst., 2005. .
6. R. Ballabriga, M. Campbell and X. Llopart, ASIC developments for radiation imaging applications: The medipix and timepix family, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 878 (2018) 10.
7. R. Ballabriga, M. Campbell, E.H.M. Heijne, X. Llopart and L. Tlustos, The medipix3 prototype, a pixel readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 54 (2007) 1824.
8. F. Kruppenacher, *Nucl. Instr. and Meth. A* 305 (1991) 527.
9. Design challenges of hybrid pixel detectors for spectral imaging. Xavier Llopart1, On behalf of the Medipix4. Collaboration. 1. EP Department, CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland.
10. Ю.Б.Рогаткин. Двухкаскадный операционный усилитель для аналого-цифрового преобразователя конвейерного типа. "Нано- и микросистемная техника" №4, 2025 г. с. 201-208.

Поступила в редакцию / Received: 17.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 28.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 31.03.2026.

УДК 621.382.323

Моделирование подвижности в тонких кремниевых GAA нанотранзисторах

Н. В. Масальский

НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, volkov@niisi.ras.ru

Аннотация. Обсуждается влияние механизмов рассеяния на подвижность носителей в рабочей области ультратонких кремниевых полевых GAA нанотранзисторов с цилиндрической геометрией. При помощи интегрирования инструментов численного моделирования и моделей механизмов рассеяния носителей численно исследовано комбинированное влияние механизмов на подвижность носителей. Статистическими методами получена оценка разброса подвижности в диапазоне диаметров канала нанотранзистора от 3 до 8 нм и температур от 200 до 400 К.

Ключевые слова: кремниевый gate-all-around (GAA) нанотранзистор, подвижность носителей, температурная вариативность, моделирование

1. Введение

Для того чтобы раскрыть технологический потенциал ультратонких кремниевых GAA нанотранзисторов существует острая необходимость в разработке надежных методов их исследования, которые основаны на глубоком понимании физики устройства. Одним из методов моделирования является сочетание квантового подхода (уравнение Шредингера) с полуклассическим уравнением переноса Больцмана что реализовано в наших предыдущих работах. В таком подходе учитываются наиболее важные механизмы рассеяния, включая рассеяние на фонах, шероховатости поверхности, рассеяние на ионизированных примесях и ловушках на границе раздела кремний-оксид кремния. Объединение всех механизмов рассеяния необходимо учитывать при моделировании практически значимых наноструктур, отвечающих современным технологическим возможностям [1].

Концепция GAA улучшает управление зарядом в рабочей области нанотранзистора, сводя к минимуму проявление короткоканальных эффектов (ККЭ), улучшает транспортные свойства и включает в себя возможность использования материалов и технологии для повышения производительности микросхем. Актуальность применения ультратонких кремниевых нанопроволочных GAA транзисторов определяется из-за их максимального предела масштабирования до 5 нм [2-5]. При моделировании и оптимизации данных устройств методы, включающие КМЭ в полуклассические транспортные подходы

[6-8], становятся очень привлекательными благодаря их более низкой вычислительной емкости по сравнению с чисто квантовыми транспортными и атомистическими подходами [9-11]. Актуальность самосогласованного полуклассического подхода вызвана необходимостью достоверного моделирования электронно-транспортных свойств устройств с поперечными размерами менее 10 нм [8].

В настоящей работе при помощи интегрирования инструментов численного моделирования и моделей механизмов рассеяния носителей для моделирования транспортных свойств ультратонких кремниевых GAA нанотранзисторов с цилиндрической геометрией исследуются физические эффекты, влияющих на подвижность носителей в рабочей области рассматриваемых наноструктур. Внимание на подвижность определяется тем, что этот параметр, имеющий электрическую природу, связанную с эффективностью транспорта носителей через транзистор.

2. Метод/Модель

В низкоразмерных системах носители заряда (электроны или дырки) не могут рассматриваться как точечные частицы. Поэтому в направлении перпендикулярном аксиальной оси транзистора из-за соотношения неопределенностей импульс локализованного носителя точно не определен. В результате его (носителя) энергия квантуется в отдельном поддиапазоне. При этом свойства отдельных процессов рассеяния зависят от степени перекрытия собственных функций носителей

в каждом поддиапазоне [12].

Расчет подвижности в тонких кремниевых полевых GAA нанотранзисторах можно провести квазианалитическим методом исходя из зонного рассмотрения. В данном случае независимо учитываются механизмы рассеяния электронов на (акустических и оптических) фононах, заряженной примеси, шероховатости и ловушках на поверхности Si-SiO₂, которые ограничивают подвижность носителей в канале транзистора. В данном случае для *i*-того механизма рассеяния и *k*-того поддиапазона подвижность рассчитывается по формуле:

$$\mu_{i,k} = \frac{2q\beta}{N_k m_k} \int \tau_{i,k}(E) g_k(E) (E - E_k) f_o(E) \times \\ \times (1 - f_o(E)) dE$$

где q – элементарный заряд, $\beta = (k_B T)^{-1}$, k_B – константа Больцмана, T – температура, m_k – эффективная масса носителя в *k*-том поддиапазоне, $\tau_{i,k}$ – время релаксации, g_k – одномерная плотность состояний, f_o – функция Ферми-Дирака, а N_k – "одномерная" концентрация электронов в *k*-м поддиапазоне, задаваемая формулой

$$N_k = N_{eff} \left[-\mathfrak{Z} \left\{ \frac{1}{2}, -\exp(\beta(E_F - E_k)) \right\} \right],$$

где N_{eff} – эффективная одномерная плотность состояний, \mathfrak{Z} – интеграл Ферми порядка 1/2, а E_F – уровень Ферми. Поскольку объединяются несколько механизмов рассеяния одновременно, общая подвижность для каждого поддиапазона должна включать совокупный их эффект, определяемый по известному правилу Маттиссена.

В альтернативном случае для эффективного исследования вариаций подвижности зарядов их перенос анализируется с использованием полуклассического подхода свойств, что требует решения транспортного уравнения Больцмана (ТУБ). Решение ТУБ основана на приближении времен релаксации, которое является фактически линеаризацией данного уравнения. Расчеты выполнены в приближении зонной структуры эллипсоидальных непараболических долин, переходы между двумя состояниями происходят мгновенно, что реализовано в наших предыдущих работах.

3. Результаты и обсуждение

Структура GAA нанотранзистора показана на рисунке 1. Он состоит из цилиндрической кремниевой нанопроволоки с ориентацией канала [100], окруженной тонким слоем диоксида кремния с эквивалентной толщиной

оксида 1 нм и утолщенными областями стока и истока. Первоначально диаметр канала транзистора составляет 5 нм. Конструкция нанотранзистора включает спейсеры (зазоры) между высоколегированными областями стока и истока и нелегированным каналом.

Длина спейсера фиксирована и составляет 5 нм, диаметр совпадает с диаметром рабочей области.

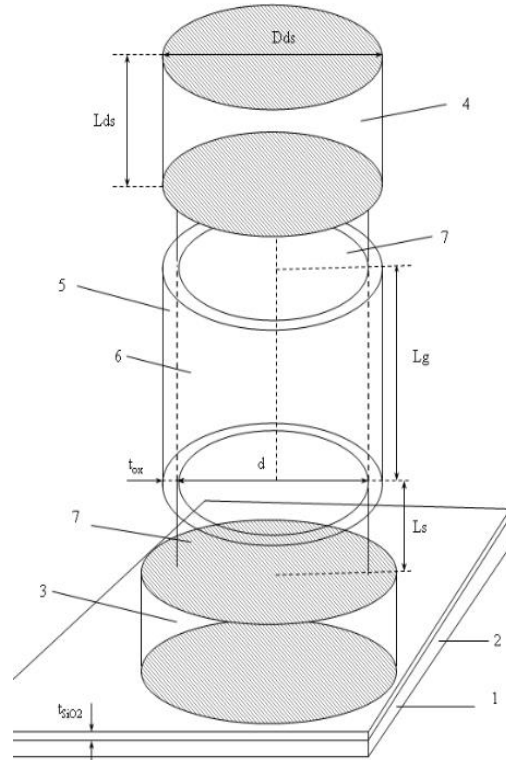


Рис. 1. Эскиз кремниевого цилиндрического GAA нанотранзистора, где 1 – кремниевая подложка, 2 – пленка оксида кремния, 3- исток, 4 - сток, 5- подзатворный диэлектрик, 6 – рабочая область подзатворный диэлектрик, Lds - длина стока/истока, Dds - диаметр стока/истока, d - диаметр рабочей области, Lg –длина рабочей области, Ls – длина спейсера

Такая конструкция упрощает технологию изготовления устройства избегая ограничения при формировании резких границ между стоком/истоком и рабочей областью (РО). Однако, это не снижает вероятности диффузии примесных атомов из высоколегированных областей в РО. В этом случае необходимо исследовать влияние заряженной примеси на характеристики GAA нанотранзистора. Все прототипы областей сток/исток имели одинаковые профили легирования с пиковым значением $N_{ds} 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ у внешнего края этих областей. При моделировании были рандомизированы только атомы мышьяка в соответствии с кинетическим методом

Монте-Карло [13, 14], которые размешены в канале в виде точечных потенциалов. Рассматриваются дальнедействующие и короткодействующие кулоновские потенциалы. Представленные расчеты выполнены для широкого диапазона эквивалентных ионизированных концентрации примесей (легирующих элементов) N_{di} варьируются от очень низких значений (10^{15} см^{-3}) до высоких значений (10^{18} см^{-3}). Плотность состояний на поверхности границе Si-SiO₂ варьируется в пределах $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Шероховатость поверхности РО задается параметрическим образом, где корреляционная длина составляет 5 нм, среднеквадратичное отклонение шероховатости варьируется от 0.2 до 0.5 нм. Подвижность вычислялась при управляющих напряжения на стоке U_{ds} 0.05 В и затворе U_{gs} 0.8 В.

На рисунке 2 показана зависимость подвижности электронов $\mu(N_{di})$, ограниченной только ионизированной примесью.

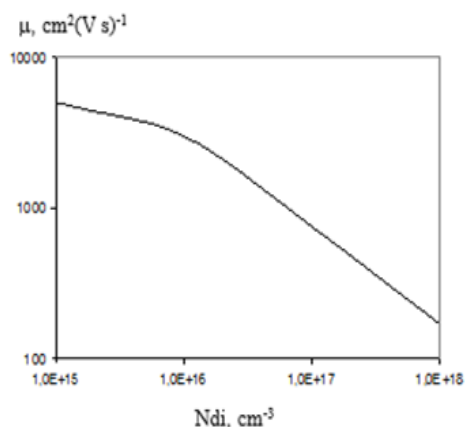


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей, ограниченной только уровнем ионизированной примеси в канале

При высоких уровнях N_{di} больше $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, с учётом того, что скорость рассеяния на заряженной примеси прямо пропорциональна ее плотности, зависимость подвижности снижается в соответствии с соотношением $\mu \sim 1/N_{di}$. Резкое падение подвижности при росте уровня N_{di} указывает на то, что при больших концентрациях вклад этого механизма будет определяющий.

На рисунке 3 ниже приведена зависимость подвижности от плотности ловушек N_f на границе кремний – оксид кремния с учетом влияния рассеяния на акустических и оптических фононах без вклада шероховатости и ионизированной примеси.

Следует учесть, что деградация подвижности

из-за фононов практически постоянная и не зависит от внешних факторов.

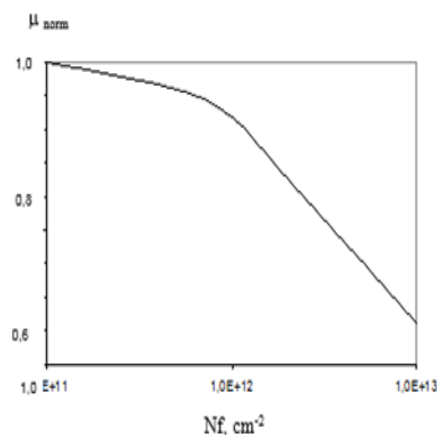


Рис. 3. Зависимость нормированной подвижности носителей от плотности ловушек на границе Si-SiO₂

При самой высокой плотности носителей подвижность, ограниченная фонон-электронными взаимодействиями, составляет $200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. При этом скорость рассеяния на акустических фононах выше, чем скорость рассеяния на оптических фононах, и следовательно, влияние первого механизма на подвижность будет гораздо более весомым. В соответствии с предыдущим случаем наблюдается монотонно снижение подвижности, но с меньшим эффектом. Такое поведение связано с высокими значениями электрического поля в перпендикулярном направлении.

Рисунок 4 иллюстрирует изменение подвижности в рабочей области в зависимости от диаметра поперечного сечения с учетом всех механизмов рассеяния при условии наихудшего случая по примесям и ловушкам и среднеквадратичному отклонению шероховатости.

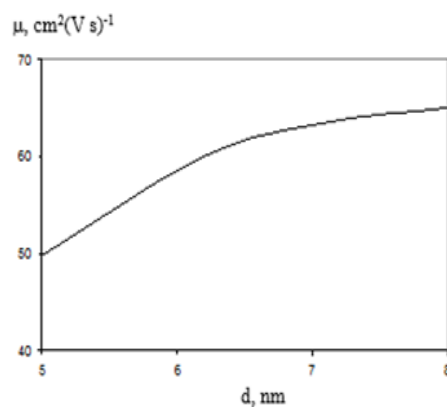


Рис. 4. Подвижность электронов в зависимости от диаметра, учитывая влияние комбинированных эффектов рассеяния

Влияние рассеяния на шероховатости поверхности при низкой плотности носителей невелико. Его интенсивность становится значительной при плотности носителей $3,25 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. И этот механизм становится доминирующим. При этом плотность носителей регулируется непосредственно путем изменения затворного напряжения U_{gs} . С ростом напряжения на затворе она (плотность) увеличивается. Все наши выводы справедливы для всех поддиапазонов в трех представляющих интерес долинах проводимости с учетом того, что в самом нижнем поддиапазоне, где расположено большинство электронов. По мере увеличения диаметра подвижность возрастает, что связано со снижением влияния инжектированной примеси из областей стока/истока в канал транзистора. Еще большего эффекта можно достичь, увеличив линейный размер спейсера.

Рисунок 5 иллюстрирует влияние параметра Δ на подвижность во всем диапазоне N_{di} при максимальном уровне ловушек.

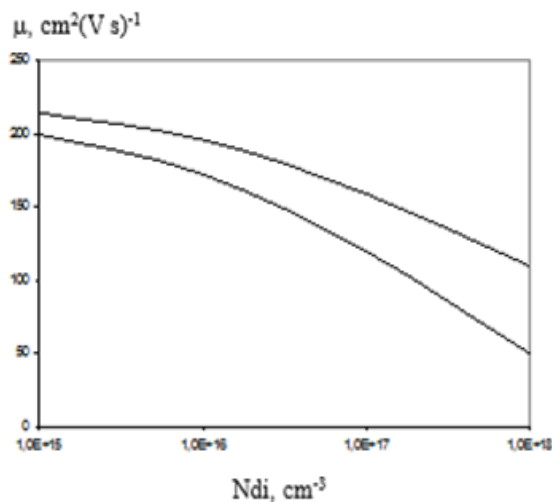


Рис. 5. Зависимость подвижности от уровня ионизированной примеси при разных Δ , где нижняя кривая $\Delta = 0.5 \text{ нм}$, верхняя кривая $\Delta = 0.2 \text{ нм}$

Данные результаты подчеркивают существенно негативное влияние инжектированной примеси на подвижность носителей. В наихудшем случае разница в процентном отношении составляет более 30%. Поэтому развитие технологических методов стоппирования диффузии примеси из областей стока/истока наряду с уменьшением шероховатости поверхности раздела Si-SiO₂ является актуальной задачей не только для ультратонких GAA, но и для FinFET транзисторов.

Одним из преимуществ кремниевых GAA нанотранзисторов является то, что они

функционируют при низком уровне легирования РО, что приводит к низкой статистической вариативности их электрофизических характеристик [15]. Следует отметить, что вклады вариативных механизмов определяют разброс значения подвижности. Шероховатость поверхности, самый значимый механизм ограничивающий подвижность и определяющий ее большую вариативность. Единственное преимущество он температурно инвариантен – то есть скорость рассеяния носителей не зависит от температуры. Поэтому и температурный разброс подвижности будет определяться только механизмами рассеяния на примеси и ловушками. Однако, уменьшение составляющих поля, перпендикулярных направлению переноса, может положительным образом ограничить влияние этих параметров на вариативность электрофизических характеристик транзистора.

На рисунке 6 представлены зависимости вариации подвижности $\sigma\mu$ (которые были определены выше) от диаметра РО.

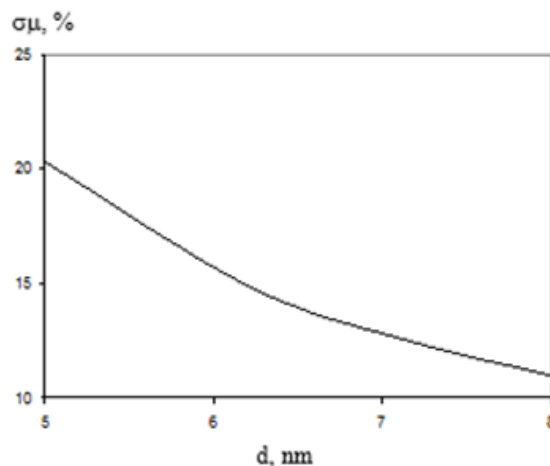


Рис. 6. Зависимость $\sigma\mu(d)$

Абсолютные значения вариаций подвижности возрастают по мере уменьшения диаметра d . Изменение величины стандартного отклонения в рассматриваемом диапазоне d составляет примерно 50%. Этот показатель также можно уменьшить при помощи увеличения линейного размера спейсера. Относительные вариации подвижности определяют тенденцию, которая характерна для относительных флуктуаций тока I_{ds} . Отметим, что их диапазон составляет примерно одинаковое значение в процентном выражении.

На рисунке 7 представлена температурная зависимость $\sigma\mu(T)$ в диапазоне температур 200...400 К, предполагая что транзистор

функционирует в обычном режиме в данном диапазоне температур.

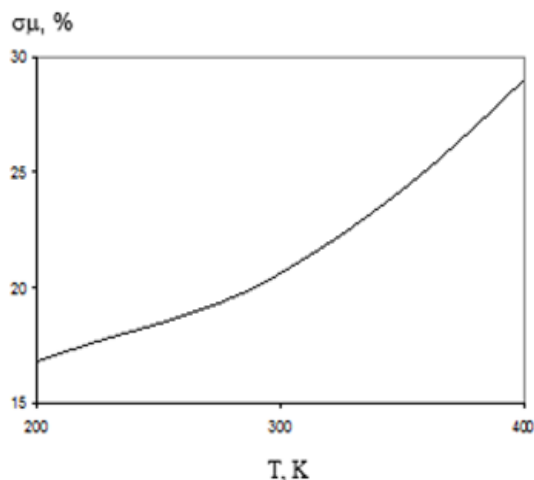


Рис. 7. Зависимость $\sigma\mu(T)$

Отметим, что зависимость $\sigma\mu(T)$ близка к параболической вида $\sigma\mu(T) \sim T^\gamma$, где $\gamma = 0.69$. Значение коэффициента γ определяется топологическими параметрами РО. На рисунке 8 в нормированных координатах относительно кривой, приведенной выше на рисунке 7 представлены зависимости $\sigma\mu_{norm}(T_{norm})$ для разных диаметров РО. В данном случае температурный диапазон 200...400 К нормируется от 0 до 1, нормированное значение параметра $\sigma\mu$ получается делением на величину $\sigma\mu(T = 400K)$ для $d=5$ нм.

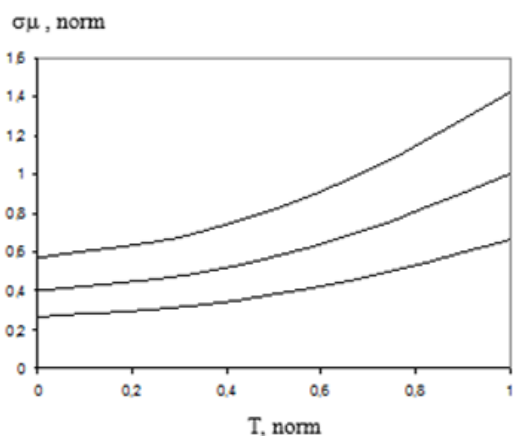


Рис. 8. Нормированная зависимость $\sigma\mu_{norm}(T_{norm})$ для разных диаметров, где верхняя кривая $d=3$ нм, средняя $d=5$ нм, нижняя $d=8$ нм

Отметим, что характер функции $\sigma\mu(T)$ сохраняется, но значение коэффициента γ для

каждого диаметра будет свое. Однако, оно не будет превышать 1.

Снижению величины $\sigma\mu(T)$ будет способствовать уменьшение затворного напряжения. При изменении U_{gs} на 0.1 В приводит к уменьшению уровня $\sigma\mu(T)$ от 3% до 9%, в зависимости от топологии РО транзистора и окружающей температуры.

5. Заключение

При помощи интегрирования инструментов численного моделирования и моделей механизмов рассеяния носителей численно исследовано комбинированное влияние механизмов на подвижность носителей в ультратонких кремниевых GAA транзисторах с цилиндрической геометрией. Практическая цель такого анализа - проиллюстрировать влияние на подвижность носителей различных механизмов и получить соответствующие оценки, которые помогут уточнить возможное снижение производительности устройства. Статистическими методами получена оценка разброса подвижности в диапазоне диаметров канала нанотранзистора от 3 до 8 нм и температур от 200 до 400 К.

Публикация выполнена в рамках НИР НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов».

Simulation of Carrier Mobility in Silicon Gate-All-Around (GAA) Nanotransistors

N. V. Masalsky

Abstract. We studied the impact of scattering mechanisms on carrier mobility in the active region of ultrathin silicon gate-all-around (GAA) cylindrical nanotransistors. Using numerical simulation tools and carrier scattering models, we analyzed how these mechanisms affect carrier mobility. We applied statistical methods to estimate mobility variation across 3 to 8 nm channel diameters and 200 to 400 K temperatures.

Keywords: silicon gate-all-around (GAA) nanotransistor, carrier mobility, temperature variability, simulation

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect, 2020 Edition. [Online] Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020> (accessed on 25 November 2025).
2. D.K. Ferry, M.J. Gilbert, R. Akis. Some considerations on nanowires in nanoelectronics // "IEEE Trans. Electron Devices", (2008), V. 55, 2820–2826.
3. J. Appenzeller, J. Knoch, M.T. Bjork, H. Riel, H. Schmid, W. Riess. Toward nanowire electronics // "IEEE Trans. Electron Device", (2008), V. 55, 2827–2845.
4. B. Yu, L. Wang, Y. Yuan, P.M. Asbeck, Y. Taur. Scaling of nanowire transistors // "IEEE Trans. Electron Device", (2008), V. 55, 2846–2858.
5. W. Lu, P. Xie, C.M. Lieber. Nanowire transistor performance limits and applications // "IEEE Trans. Electron Device", (2008), V. 55, 2859–2876.
6. I.M. Tienda-Luna, F.G. Ruiz, A. Godoy, B. Biel, F. Gamiz. Surface roughness scattering model for arbitrarily oriented silicon nanowires // "J. Appl. Phys.", (2011), V. 110, 084514.
7. S. Jin, M.V. Fischetti, T.-W. Tang. Modeling of electron mobility in gated silicon nanowires at room temperature: Surface roughness scattering, dielectric screening, and band nonparabolicity // "J. Appl. Phys.", (2007), V. 102, 083715.
8. T. Sadi, E. Towie, M. Nedjalkov, C. Riddet, C. Alexander, L. Wang, V. Georgiev, A. Brown, C. Millar, A. Asenov. One-dimensional multi-subband Monte Carlo simulation of charge transport in Si nanowire transistors// "In Proceedings of the Simulation of Semiconductor Processes and Devices", (2016), Nuremberg, Germany, 5 October 2016, 23–26.
9. W. Zhang, C. Delerue, Y.-M. Niquet, G. Allan, E. Wang. Atomistic modeling of electron-phonon coupling and transport properties in n-type [110] silicon nanowires // "Phys. Rev. B", (2010), V. 82, 115319.
10. Y.-M. Niquet, C. Delerue, D. Rideau, B. Videau. Fully atomistic simulations of phonon-limited mobility of electrons and holes in $\langle 001 \rangle$ -, $\langle 110 \rangle$ -, and $\langle 111 \rangle$ -oriented Si nanowires // "IEEE Trans. Electron Device", (2012), V. 59, 1480–1487.
11. Y.-M. Niquet, C. Delerue, C. Krzeminski. Effects of strain on the carrier mobility in silicon nanowires // "Nano Lett.", (2012), V. 12, 3545–3550.
12. Н.В. Масальский. Моделирование ВАХ ультра тонких КНИ КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором // "Микроэлектроника", (2021), Т. 60, № 6, 387-393
13. K. Huang. Statistical mechanics. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1987.
14. M. Kubo, N. Toda, N. Hashitsume. Statistical Physics II: Nonequilibrium Statistical Mechanics. Berlin, Germany: Springer, 1991.
15. A. Asenov. Random dopant induced threshold voltage lowering and fluctuations in sub-0.1 μm MOSFETs: A 3-D atomistic simulation study // "IEEE Trans. Electron Device", (1998), V. 45, 2505–2513.

Поступила в редакцию / Received: 16.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 20.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 31.03.2026.

UDC 621.382.323

Simulation of Carrier Mobility in Silicon Gate-All-Around (GAA) Nanotransistors

N. V. Masalsky

Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia, volkov@niisi.ras.ru

Abstract. We studied the impact of scattering mechanisms on carrier mobility in the active region of ultrathin silicon gate-all-around (GAA) cylindrical nanotransistors. Using numerical simulation tools and carrier scattering models, we analyzed how these mechanisms affect carrier mobility. We applied statistical methods to estimate mobility variation across 3 to 8 nm channel diameters and 200 to 400 K temperatures.

Keywords: silicon gate-all-around (GAA) nanotransistor, carrier mobility, temperature variation, simulation

1. Introduction

To unleash the industrial capabilities of ultrathin silicon gate-all-around nanotransistors, we need dependable analysis techniques and a deep understanding of the device physics. One approach we implemented in our earlier research is a combination of a quantum method (the Schrödinger equation) and a semi-classical Boltzmann transport equation. In this way, we consider the key scattering mechanisms, such as phonon scattering, surface roughness, scattering at ionized impurities, and traps at the silicon-silicon oxide interface. This comprehensive approach is beneficial to the simulation of advanced, technologically relevant nanostructures that can be manufactured today [1].

The GAA concept enhances charge control in the nanotransistor's active region, minimizes short-channel effects (SCE), and improves transport properties. It also offers advanced materials and technologies to boost chip performance. Another benefit of ultrathin silicon gate-all-around nanowire transistors is that they can be scaled down to 5 nm [2–5]. For GAA simulation and optimization, methods that integrate quantum-mechanical effects (QME) into semi-classical transport frameworks [6–8] are particularly appealing as they are less computationally intensive than pure quantum transport and atomistic approaches [9–11]. The self-consistent semi-classical method is still important for dependable simulation of the electronic transport characteristics in devices smaller than 10 nm [8].

In this study, we combined numerical simulation tools and carrier scattering mechanism models to simulate the transport properties of ultrathin silicon gate-all-around (GAA) cylindrical nanotransistors. The objective is to investigate the physical effects that influence carrier mobility in the operating region of these nanodevices. The focus on mobility

stems from its electrical nature related to how efficiently carriers move through the transistor.

2. Materials and Methods

In low-dimensional systems, charge carriers (such as electrons or holes) cannot be considered point particles. Therefore, in a direction perpendicular to the transistor's axial axis, the momentum of a localized carrier is not precisely defined due to the uncertainty principle. Consequently, the carrier's energy is quantized within an individual subband. In this scenario, the characteristics of each scattering process depend on the extent to which the carrier eigenfunctions overlap within each such subband [12].

The electron mobility in thin silicon gate-all-around (GAA) nanotransistors can be determined using a quasi-analytical method applied to each zone. In this case, the mechanisms of electron scattering by (acoustic and optical) phonons, charged impurities, roughness, and traps at the Si-SiO₂ interface, which limit carrier mobility in the transistor channel, are considered independently. In this scenario, for the i -th scattering mechanism and the k -th subband, the mobility is expressed as:

$$\mu_{i,k} = \frac{2q\beta}{N_k m_k} \int \tau_{i,k}(E) g_k(E) (E - E_k) f_o(E) \times (1 - f_o(E)) dE$$

where q is the elementary charge; $\beta = (k_B T)^{-1}$, k_B is the Boltzmann constant; T is the temperature; m_k is the effective carrier mass in the k -th subband; $\tau_{i,k}$ is the relaxation time, g_k is the one-dimensional density of states, f_o is the Fermi-Dirac function; and N_k is the one-dimensional electron concentration in the k -th subband, given by the equation

$$N_k = N_{eff} \left[-\mathfrak{F}\left\{\frac{1}{2}, -\exp(\beta(E_F - E_k))\right\} \right],$$

where N_{eff} is the effective one-dimensional density of states, \mathfrak{F} is the Fermi integral of order 1/2, and E_F is the Fermi level. Since multiple scattering mechanisms are combined, the total mobility for each subband should account for their cumulative effect, as determined by the well-known Matthiessen's rule.

Alternatively, to study the variations in charge mobility, their transport is analyzed using a semi-classical approach by solving the Boltzmann transport equation (BTE). The BTE solution relies on the approximation of the relaxation time, which essentially linearizes the equation. Our calculations used the approximation of ellipsoidal non-parabolic valleys with a zonal structure; while transitions between the two states occur instantaneously, as we implemented in our earlier studies.

3. Results and Discussion

The GAA nanotransistor's structure is shown in Figure 1. It features a cylindrical silicon nanowire with a [100] channel orientation, encased in a thin silicon dioxide layer with a 1 nm equivalent oxide thickness, and includes thickened drain and source regions. Initially, the transistor channel diameter is 5 nm. The nanotransistor incorporates spacers (gaps) between the highly doped drain and source regions and the undoped channel. The spacer length is fixed at 5 nm, and its diameter matches that of the active region.

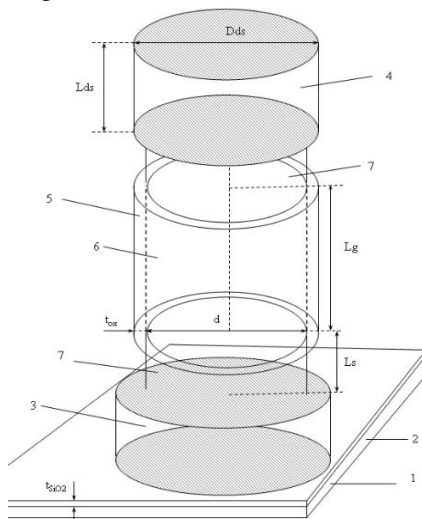


Figure 1. Silicon cylindrical gate-all-around (GAA) nanotransistor, where 1 is the silicon substrate, 2 is the silicon oxide film, 3 is the source, 4 is the drain, 5 is the gate insulator, 6 is the active region, L_{ds} is the drain/source length, D_{ds} is the drain/source diameter, d is the active region diameter, L_g is the active region length, L_s is the spacer length.

Such a design streamlines the device manufacturing by eliminating the need to create sharp boundaries between the drain/source and the active region (AR). However, it does not decrease the probability of impurity diffusion from the heavily doped areas into the AR. In this case, we need to further investigate the effect of charged impurities on the GAA nanotransistor performance. All prototype drain and source regions featured identical doping profiles, with a peak N_{ds} at $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ at the outer edge of these regions. For the simulation, we randomized only arsenic atoms using the Monte Carlo kinetic method [13, 14]. They are distributed as point potentials within the channel. We considered both long-range and short-range Coulomb potentials. Our analysis covered a wide range of equivalent ionized impurity (dopant) concentrations, with N_{di} ranging from very low (10^{15} cm^{-3}) to high (10^{18} cm^{-3}). The density of states at the Si-SiO₂ interface varies from $10^{11} \dots 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. The AR surface is defined parametrically, with a 5 nm correlation length and an RMS ranging from 0.2 to 0.5 nm. We assessed the mobility at a drain supply voltage (U_{ds}) is equal 0.05 V and a gate supply voltage (U_{gs}) is equal 0.8 V.

Figure 2 shows the electron mobility curve $\mu(N_{di})$ when limited solely by ionized impurity.

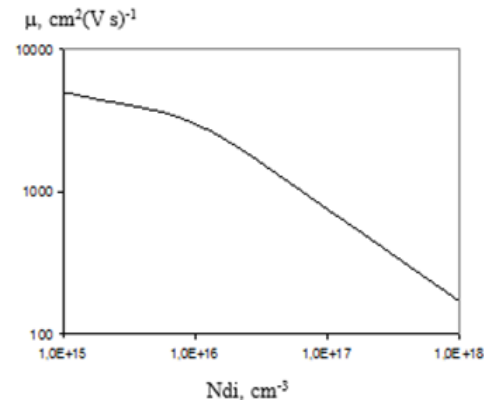


Figure 2. Carrier mobility curve when limited solely by the ionized impurity level in the channel

At high N_{di} levels exceeding $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, since the scattering rate from a charged impurity is directly proportional to its density, the mobility decreases as $\mu \sim 1/N_{di}$. A sharp decline in mobility as the N_{di} level rises indicates that this mechanism is a dominant contributor at high concentrations.

Figure 3 shows the carrier mobility vs. density of traps (N_f) at the silicon-silicon oxide interface, considering the effects of scattering by acoustic and optical phonons, while excluding contributions from surface roughness and ionized impurities.

Note that phonon-induced mobility degradation is essentially constant and independent of external factors.

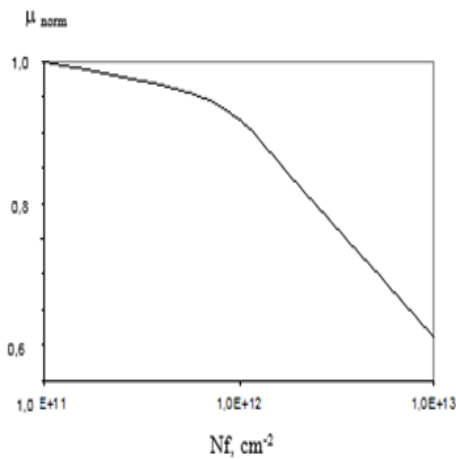


Figure 3. carrier mobility vs. density of traps at the Si-SiO₂ interface

At the highest carrier density, the mobility limited by phonon-electron interactions is 200 cm²/V·s. The scattering rate from acoustic phonons is higher than that from optical phonons, so the effect of the former mechanism on mobility is much more significant. As in the previous case, mobility decreases monotonically, but the effect is smaller. This behavior occurs under a strong perpendicular component of the electric field.

Figure 4 shows the AR mobility vs. the cross-sectional diameter, considering all scattering mechanisms under the worst-case conditions for impurities, traps, and the RMS surface roughness.

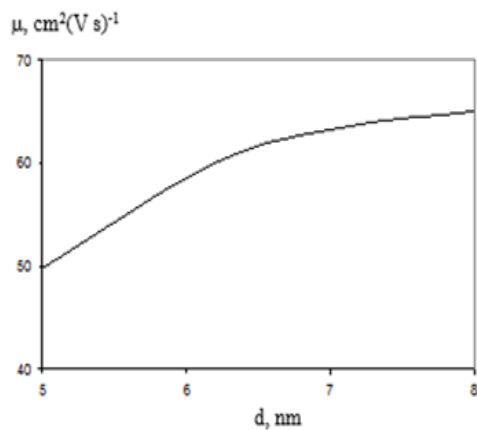


Figure 4. Electron mobility vs. the diameter, considering the combined effects of scattering

The impact of surface roughness scattering is minimal at low carrier densities. The intensity becomes significant at a 3.25×10^{12} cm⁻² carrier density. This mechanism is becoming the dominant one. In this scenario, the carrier density is directly regulated by adjusting the gate voltage U_{gs} . As the gate voltage rises, the density also increases. All our conclusions remain valid for every subband within the three relevant conduction valleys, considering

that most electrons occupy the lowest subband. As the diameter increases, the mobility improves due to a reduced impact of the impurity injected from the source/drain regions into the transistor channel. An even greater effect can be achieved by increasing the spacer's linear dimension.

Figure 5 shows how the parameter Δ affects mobility across the entire N_{di} range at the highest trap level.

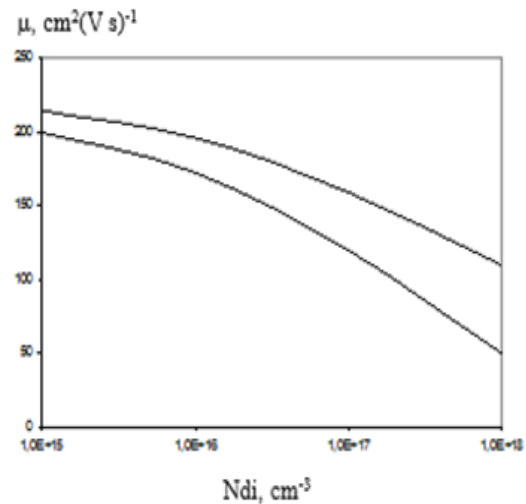
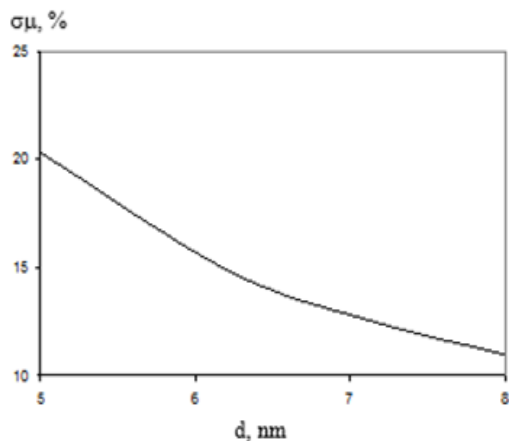


Figure 5. Mobility vs. the ionized impurity concentration at different Δ . Lower curve: $\Delta = 0.5$ nm; upper curve: $\Delta = 0.2$ nm

These findings demonstrate the substantial adverse impact of the injected impurity on carrier mobility. In the worst-case scenario, the difference exceeds 30%. Therefore, there is a need to develop technologies to prevent impurity diffusion from the drain/source regions, while also reducing the roughness of the Si-SiO₂ interface. It is a critical challenge for both ultrathin GAAs and FinFET transistors.

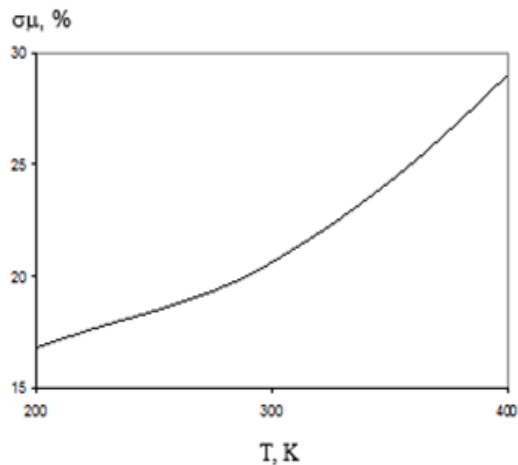
A key benefit of silicon GAA nanotransistors is their operation at low AR doping levels, resulting in minimal statistical variability in their electrophysical properties [15]. Note that various mechanisms contribute to the spread of mobility. Surface roughness is the primary factor restricting mobility and causing its high variability. Its sole advantage is its temperature invariance, meaning the carrier scattering rate is not affected by temperature. Therefore, the mobility variations with temperature are affected only by scattering at impurities and traps. However, minimizing the field components perpendicular to the direction of transport can help reduce the impact of these parameters on the variability of the transistor's electrophysical properties.

Figure 6 illustrates the mobility variations σ_{μ} (see above) vs. AR diameter.

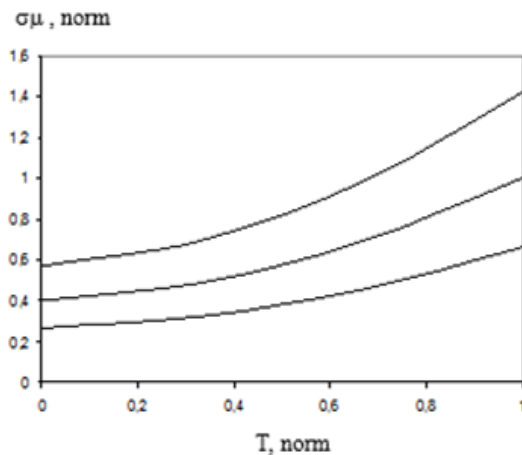
Figure 6. $\sigma\mu(d)$ curve

The magnitude of mobility variations increases with the diameter d . The change in the standard deviation across the considered range of d is approximately 50%. This value can also be decreased by enlarging the spacer's linear dimensions. Relative mobility variations define a trend characteristic of the relative fluctuations in the drain-source current I_{ds} . Note that their ranges are approximately equal when expressed as percentages.

Figure 7 illustrates the temperature curve $\sigma\mu(d)$ in the 200–400 K range, assuming the transistor operates normally within this temperature range.

Figure 7. $\sigma\mu(T)$ curve

Also note that the $\sigma\mu(T)$ curve closely follows a $\sigma\mu(T) \sim T^Y$ parabolic curve where $Y = 0.69$. The Y coefficient depends on the AR topology. Figure 8 shows, in normalized coordinates relative to the curve presented in Figure 7, the $\sigma\mu_{norm}(T_{norm})$ curves for various AR diameters. In this instance, the 200–400 K temperature range is normalized to a 0 to 1 range. The normalized parameter $\sigma\mu$ is derived by dividing by $\sigma\mu(T = 400K)$ for $d = 5$ nm.

Figure 8. Normalized curve $\sigma\mu_{norm}(T_{norm})$ for various diameters. Upper curve: $d=3$ nm; middle curve: $d=5$ nm; lower curve: $d=8$ nm.

Note that the function's $\sigma\mu(T)$ nature remains unchanged, but the coefficient Y differs for each diameter. However, it does not exceed 1.

A lower gate voltage will decrease $\sigma\mu(T)$. A 0.1 V change in U_{gs} results in a 3% to 9% reduction in $\sigma\mu(T)$ depending on the transistor's AR topology and ambient temperature.

5. Conclusion

Using numerical simulation tools and models of carrier scattering mechanisms, we numerically studied how these mechanisms combined affect carrier mobility in ultrathin silicon gate-all-around cylindrical transistors. The application of this analysis is to demonstrate how different mechanisms affect carrier mobility, and provide estimates of the potential impact on device performance. We applied statistical methods to estimate mobility variation across 3 to 8 nm channel diameters and 200 to 400 K temperatures.

Publication is made as part of the research for NRC «Kurchatov Institute» - SRISA on the topic No. FNEF-2024--0003.

References

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect, 2020 Edition. [Online] Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020> (accessed on 25 November 2025).
2. D.K. Ferry, M.J. Gilbert, R. Akis. Some considerations on nanowires in nanoelectronics // “IEEE Trans. Electron Devices”, (2008), V. 55, 2820–2826.
3. J. Appenzeller, J. Knoch, M.T. Bjork, H. Riel, H. Schmid, W. Riess. Toward nanowire electronics // “IEEE Trans. Electron Device”, (2008), V. 55, 2827–2845.
4. B. Yu, L. Wang, Y. Yuan, P.M. Asbeck, Y. Taur. Scaling of nanowire transistors // “IEEE Trans. Electron Device”, (2008), V. 55, 2846–2858.
5. W. Lu, P. Xie, C.M. Lieber. Nanowire transistor performance limits and applications // “IEEE Trans. Electron Device”, (2008), V. 55, 2859–2876.
6. I.M. Tienda-Luna, F.G. Ruiz, A. Godoy, B. Biel, F. Gamiz. Surface roughness scattering model for arbitrarily oriented silicon nanowires // “J. Appl. Phys.”, (2011), V. 110, 084514.
7. S. Jin, M.V. Fischetti, T.-W. Tang. Modeling of electron mobility in gated silicon nanowires at room temperature: Surface roughness scattering, dielectric screening, and band nonparabolicity // “J. Appl. Phys.”, (2007), V. 102, 083715.
8. T. Sadi, E. Towie, M. Nedjalkov, C. Riddet, C. Alexander, L. Wang, V. Georgiev, A. Brown, C. Millar, A. Asenov. One-dimensional multi-subband Monte Carlo simulation of charge transport in Si nanowire transistors// “In Proceedings of the Simulation of Semiconductor Processes and Devices”, (2016), Nuremberg, Germany, 5 October 2016, 23–26.
9. W. Zhang, C. Delerue, Y.-M. Niquet, G. Allan, E. Wang. Atomistic modeling of electron-phonon coupling and transport properties in n-type [110] silicon nanowires // “Phys. Rev. B”, (2010), V. 82, 115319.
10. Y.-M. Niquet, C. Delerue, D. Rideau, B. Videau. Fully atomistic simulations of phonon-limited mobility of electrons and holes in $\langle 001 \rangle$ -, $\langle 110 \rangle$ -, and $\langle 111 \rangle$ -oriented Si nanowires // “IEEE Trans. Electron Device”, (2012), V. 59, 1480–1487.
11. Y.-M. Niquet, C. Delerue, C. Krzeminski. Effects of strain on the carrier mobility in silicon nanowires // “Nano Lett.”, (2012), V. 12, 3545–3550.
12. N.V. Masalsky. Effects of the Physical Parameters on The I-V Data of Cylindrical Surrounding Gate SOI CMOS Nanotransistor // *Microelectronics*, (2021), Vol. 60, No. 6, 387-393 (in Russ.)
13. K. Huang. Statistical mechanics. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1987.
14. M. Kubo, N. Toda, N. Hashitsume. Statistical Physics II: Nonequilibrium Statistical Mechanics. Berlin, Germany: Springer, 1991.
15. A. Asenov. Random dopant induced threshold voltage lowering and fluctuations in sub-0.1 μm MOSFETs: A 3-D atomistic simulation study // “IEEE Trans. Electron Device”, (1998), V. 45, 2505–2513.

Поступила в редакцию / Received: 16.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 20.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 31.03.2026.

УДК 621.391.8

Бесшовная архитектура узла динамической фазовой перестройки тактовых трактов в высокоскоростных интерфейсах физического уровня DDR

Т. Р. Денщиков¹, К. А. Петров²¹НИИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия, denschikov@cs.niisi.ras.ru²НИИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия, petrovk@cs.niisi.ras.ru

Аннотация. В работе предложена модификация архитектуры узла фазовой подстройки тактового сигнала в составе цифрового интерфейсного блока физического уровня DDR (DDR PHY), предназначенного для формирования и подстройки тактовых сигналов в передающем и принимающем трактах. Актуальность задачи определяется ростом требований к устойчивости временных параметров высокоскоростных интерфейсов и необходимостью выполнять калибровку фазовых соотношений без остановки функционирования тракта. В исходной архитектуре изменение задержки связано с процедурой обновления управляемой линии задержки и должно сопровождаться приостановкой работы соответствующего участка тактового пути.

Предлагаемая архитектурная модификация переводит узел фазовой подстройки тактового сигнала к схеме с теньвым контуром перестройки, в которой новая величина задержки подготавливается в неактивной ветви, а переключение на обновлённую конфигурацию выполняется через глитч-безопасную логику управления тактированием. Такое решение позволяет исключить остановку тактового сигнала, уменьшить риск нарушения синхронизации и обеспечить бесшовную перестройку фазы в процессе функционирования блока.

Ключевые слова: DDR PHY, DLL, цифровая линия задержки, фазовая подстройка, тактовый сигнал, динамическая перестройка, глитч-безопасный мультиплексор

1. Введение

Высокоскоростные периферийные интерфейсы СБИС микропроцессора в значительной степени определяют производительность аппаратно-программных платформ на их основе. Высокоскоростные интерфейсы DDR предъявляют жесткие требования к временным параметрам тактовых сигналов, поскольку точность фазового позиционирования напрямую определяет допустимое окно выборки данных и устойчивости передачи данных [1, 2]. Для корректного стробирования данных на

приемной стороне необходимо обеспечить точный фазовый сдвиг между тактовым сигналом и данными; обычно это сдвиг на 90 градусов. Как отмечается в работе [1], цифровая петля задержки позволяет синхронизировать внутренний тактовый сигнал с внешним опорным с точностью, необходимой для надёжного стробирования данных при высоких скоростях передачи. Эту функцию выполняет блок фазовой подстройки (phase shifter), построенный на основе цифровой DLL и управляемой линии задержки (DCDL), структурная схема исходной архитектуры которого показана на рисунке 1.

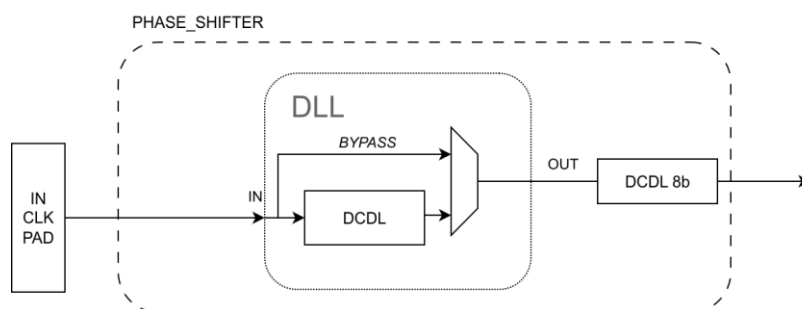


Рис. 1. Исходная архитектура блока фазовой подстройки

При изменении кода задержки DCDL внутри блока фазовой подстройки возникают переходные процессы, вызывающие появление паразитных импульсов в выходном тактовом сигнале. При использовании исходной реализации для защиты синхронных схем применяется принудительная остановка всего тракта данных на время перестройки. Подобные методы безопасного переключения тактовых сигналов широко применяются в архитектурах glitch-free clock multiplexing, где изменение источника тактирования выполняется только внутри заранее определённого безопасного окна [3, 4]. Такой подход приемлем для старых стандартов DDR, но несовместим с современными высокоскоростными интерфейсами, требующими непрерывной передачи данных. Таким образом, актуальной является задача модификации архитектуры блока фазовой подстройки, позволяющей изменять фазовую задержку без остановки тактового сигнала и без внесения искажений. При этом необходимо использовать стандартные библиотечные DCDL.

В рамках данной работы предложена архитектура блока фазовой подстройки с теневой ветвью DCDL, в которой подготовка новой задержки осуществляется параллельно работе активной ветви, а также в разработке конечного автомата, управляющего последовательностью заморозки, настройки и переключения, гарантирующего переключение только в момент низкого уровня обоих тактовых сигналов. Представлены результаты моделирования с учётом реальных задержек, подтверждающие глитч-безопасность и дающие количественные оценки ключевых параметров.

2. Анализ известных решений

Проблема глитчей при переключении тактовых сигналов хорошо известна. В идеальном случае её можно было бы избежать, используя специализированные глитч-безопасные линии задержки, архитектура которых исключает появление паразитных импульсов при изменении управляющего кода. Однако в доступной библиотеке сложно функциональных блоков такие компоненты отсутствуют, что и послужило исходной мотивацией для поиска альтернативных решений, так как разработка такой DCDL потребовала значительных временных, материальных и человеческих затрат, поэтому было принято решение достичь требуемой функциональности за счёт архитектурных методов на имеющихся блоках.

Поведение DCDL при изменении

управляющего кода подробно анализируется в работах по цифровым DLL и высокоточным delay-структурам, где отмечается влияние технологических вариаций, джиттера и искажения скважности на фазовую точность и устойчивость захвата [5, 6]. Эти эффекты особенно критичны для интерфейсов DDR-класса.

В литературе описаны различные архитектуры глитч-безопасных мультиплексоров, основанные на переключении в «безопасном окне», когда оба тактовых сигнала находятся в низком уровне [2, 3]. В частности, авторы работы [4] указывают, что для предотвращения паразитных импульсов переключение тактового сигнала должно выполняться исключительно в промежутках, когда оба сигнала одновременно находятся на низком логическом уровне, а длительность этого окна должна быть достаточной с учётом задержек логических элементов. Аналогичные принципы применяются и в программируемых генераторах тактовых сигналов, где требуется дискретное изменение параметров clocking fabric без нарушения работы синхронной логики [7]. Однако эти работы ориентированы на переключение между независимыми источниками тактовой частоты, а не на динамическую перенастройку задержки внутри одного источника. Задача, стоящая перед нами, иная: требуется не просто сменить источник, а изменить фазу существующего тактового сигнала, причём сделать это без остановки его работы.

В области цифровых DLL для DDR-приложений основные исследования направлены на уменьшение времени захвата, снижение энергопотребления и повышение устойчивости к вариациям техпроцесса и фазовому джиттеру [5, 6, 8]. Вопрос же фоновой перестройки фазы активного тактового сигнала, когда одна линия задержки продолжает работать, а вторая параллельно настраивается на новое значение, после чего выполняется глитч-безопасное переключение, в литературе не рассматривался. Поэтому новизна предлагаемого подхода заключается не в самом принципе глитч-безопасного переключения, а в его архитектурной адаптации для создания бесшовного механизма перестройки задержки в составе блока фазовой подстройки DDR PHY при ограничении на использование только стандартных библиотечных DCDL.

3. Предлагаемое решение

Решение проблемы возникновения глитчей без остановки передачи по шине было

достигнуто архитектурным усовершенствованием архитектуры, основан на введении второй цифровой линии задержки. Структурная схема модифицированного блока показана на рисунке 2. В состав блока входят две идентичные цифровые линии задержки, активная и тневая, которые переключаются в разных временных промежутках. Использование двух параллельных линий задержки ранее рассматривалось в архитектурах DLL для расширения диапазона корректной работы и уменьшения рассогласования параметров отдельных ветвей [9]. В

предлагаемой работе аналогичная структурная избыточность применяется для обеспечения фоновой перестройки фазового положения без остановки активного тактового сигнала. Тактовые вентили обеспечивают отключение тактового сигнала от неактивной ветви без искажения его формы. Детектор на основе логического элемента И фиксирует момент совпадения низких уровней сигналов с выходов обеих DCDL. Управление всей последовательностью операций осуществляет конечный автомат, который реализует алгоритм перестройки.

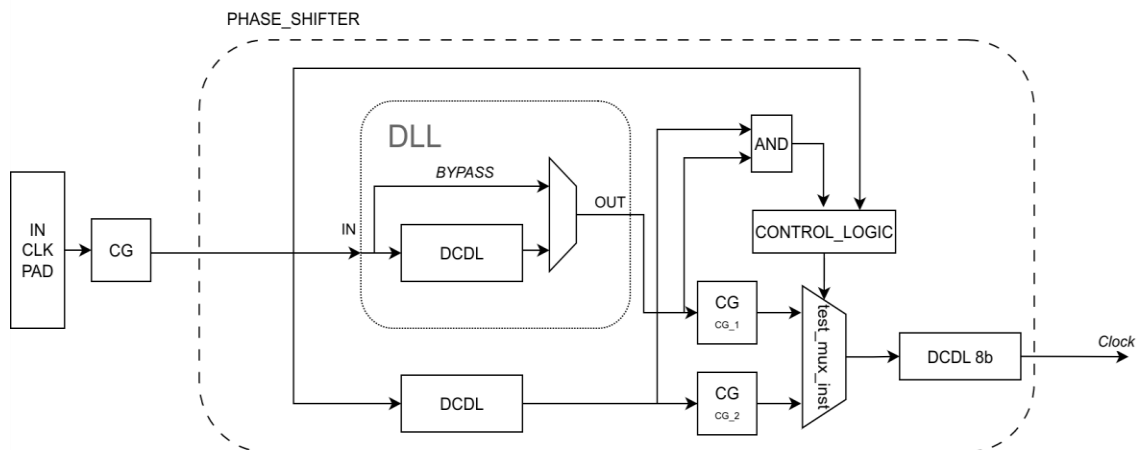


Рис. 2. Структурная схема модифицированного блока фазовой подстройки с теньвым контуром

Алгоритм работы конечного автомата включает несколько этапов. В начальном состоянии активна одна из линий задержки (например, первая DCDL), а вторая отключена с помощью тактового вентиля. При поступлении сигнала update автомат блокирует тактовый вентиль тневой ветви, переводя её в «замороженное» состояние. После паузы длительностью два такта, необходимой для завершения переходных процессов в вентиле, в тневую DCDL загружается новый код задержки. Затем следует ещё одна двухтактная пауза для стабилизации линии, после чего тактовый вентиль тневой ветви разблокируется, и на её выходе появляется тактовый сигнал с новой задержкой. Далее автомат ожидает момента, когда оба тактовых сигнала одновременно находятся в низком уровне; этот момент детектируется схемой [3, 4]. Как только условие выполняется, происходит переключение мультиплексора на выход тневой ветви, и она становится активной. Ранее активная ветвь при этом

переходит в тневое состояние и может быть настроена для следующего цикла. Блок-схема описанного алгоритма представлена на рисунке 3.

Главное достоинство предложенной схемы заключается в том, что активная ветвь продолжает формировать тактовый сигнал на всём протяжении цикла перенастройки, а переключение происходит в безопасный момент, исключающий появление глитчей.

4. Результаты моделирования

Для верификации предложенной архитектуры была разработана RTL-модель на SystemVerilog, выполнен логический синтез и разводка на библиотеку 28 нм и проведено моделирование с аннотированными SDF-задержками. Целью моделирования являлось сравнение поведения исходной одноветвевой и предлагаемой двухветвевой схем при изменении кода задержки.

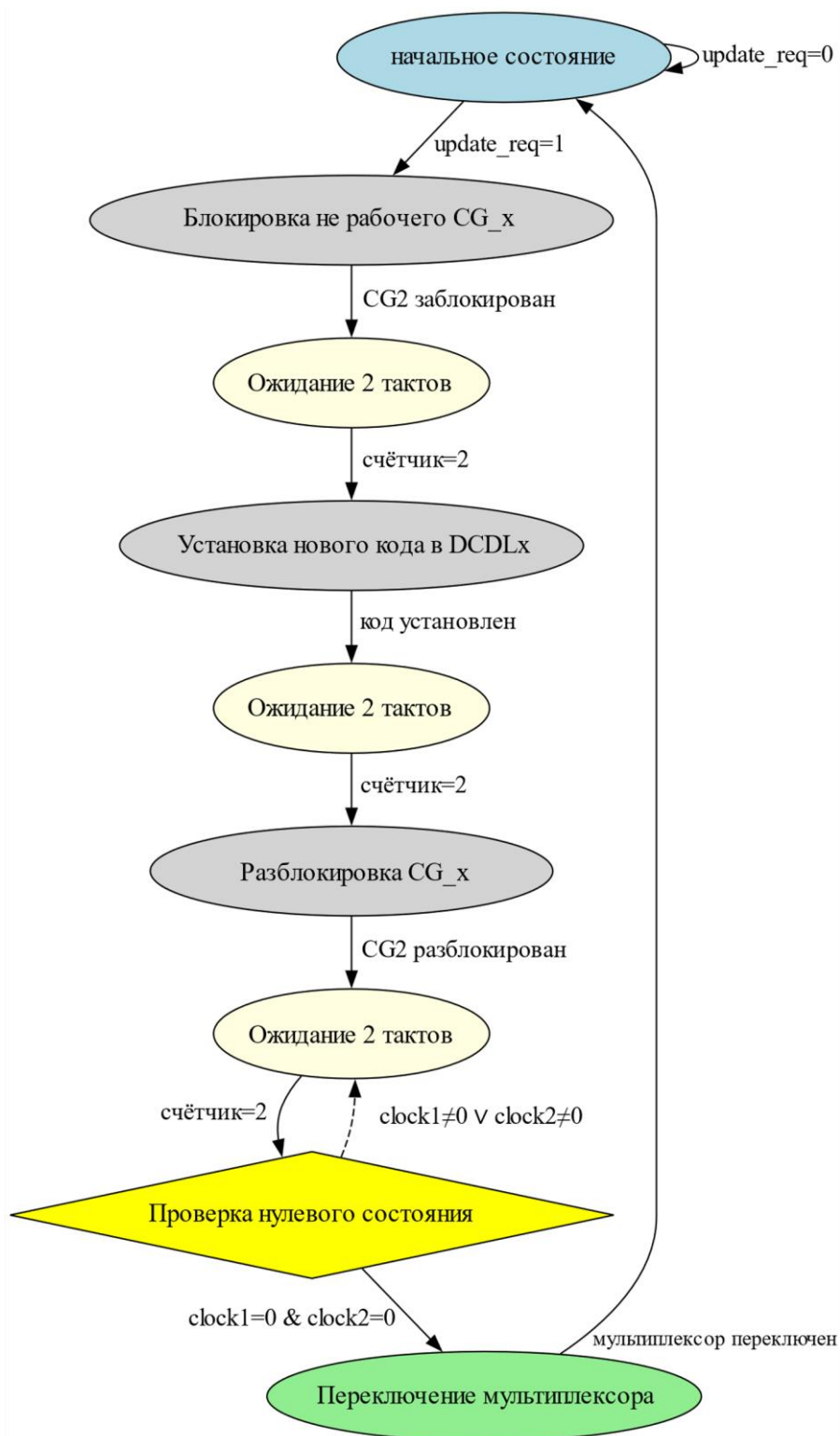


Рис. 3. Блок-схема алгоритма перестройки

На рисунке 4 приведена временная диаграмма, полученная при моделировании исходной схемы с одной DCDL. В момент изменения ведомого кода (slave_code) на ведущий

(master_code) на выходе линии (clk_out) наблюдается искажение – глитч в виде ложного импульса, который мог бы вызвать сбой в синхронной логике.

На рисунке 5 показано поведение двухветвевой архитектуры. Сигналы I1, I2 соответствуют тактовым сигналам после активной и теневой DCDL на вход выходного мультиплексора, clk_out – выходному сигналу после мультиплексора. Из диаграммы следует, что в момент переключения, в данном случае переход сигнала TM в активное состояние, оба тактовых сигнала находятся в низком уровне, и выходной

сигнал сохраняет правильную форму без дополнительных импульсов. Глитчи и пропуски фронтов не наблюдались на протяжении 1000 случайных циклов перестройки при тактовой частоте 1 ГГц.

Количественные характеристики, полученные в результате моделирования, сведены в таблицу 1.

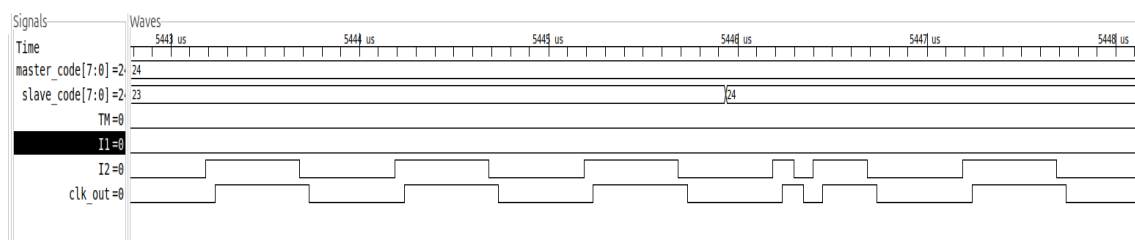


Рис. 4. Временная диаграмма исходной схемы: появление глитча при обновлении кода

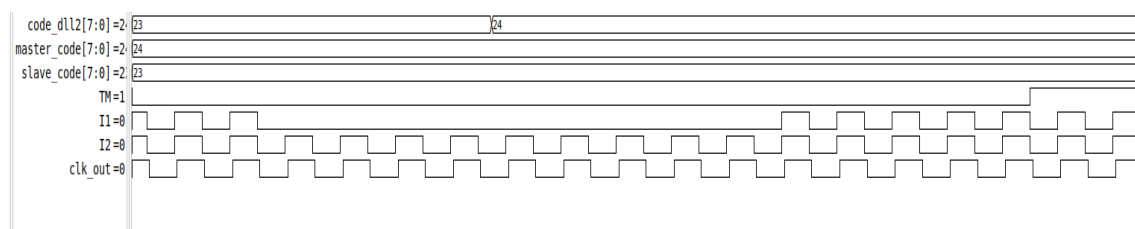


Рис. 5. Временная диаграмма предложенной схемы: переключение в безопасном окне, глитчи отсутствуют

Таблица 1. Характеристики модифицированного блока фазовой подстройки с теньвым контуром

Метрика	Значение	Примечание
Латентность перестройки	8 тактов	Время от update до завершения переключения
Нарушение тактового сигнала	Отсутствует	Ни одного глитча или пропущенного фронта не зафиксировано
Фазовая ошибка после переключения	< 5 пс	Обусловлена несовпадением характеристик двух линий задержки
Добавочная динамическая мощность	+15%	Относительно базовой схемы на частоте 1 ГГц
Дополнительная площадь	+110%	В основном за счёт второй DCDL и логики
Минимальное безопасное окно переключения	≥ 150 пс	Должно выдерживаться при всех PVT

Латентность перестройки, измеренная от момента прихода сигнала update до завершения переключения, составила 8 тактов плюс величина от 0,8 до 2,1 нс в зависимости от фазы

прихода update относительно тактовых сигналов. Остаточная фазовая ошибка после переключения, обусловленная статическим рассогласованием двух физически разных

DCDL, не превышает 5 пс (по уровню 3σ). Дополнительная динамическая мощность возросла на 15% относительно базовой схемы, а площадь – примерно на 110% за счёт второй DCDL и управляющей логики. Минимальное безопасное окно для переключения, при котором гарантируется отсутствие глитчей, составило не менее 150 пс; это значение выдерживается при типовых условиях и должно контролироваться при всех PVT-вариациях.

Предложенная архитектура, однако, имеет ряд ограничений. Удвоение числа DCDL ведёт к росту площади и статического энергопотребления, что для многих приложений может быть приемлемой платой за непрерывность работы. Остаточная фазовая ошибка, определяемая несовпадением характеристик линий, при необходимости может быть скомпенсирована дополнительной калибровкой.

Подобные статические фазовые отклонения характерны для дискретных delay-структур и подробно обсуждаются в работах по высокоточным CMOS delay-линиям [6]. Гарантия отсутствия глитчей критически зависит от детектирования момента одновременного низкого уровня обоих сигналов; минимальная длительность этого окна должна обеспечиваться при всех углах процесса и напряжениях питания, что требует дополнительного анализа методом Монте-Карло. Латентность перестройки, достигающая 10–12 тактов, допустима для задач фоновой калибровки, компенсирующих медленные

дрейфы параметров, но может быть неприемлема для систем, требующих мгновенной смены фазы.

5. Заключение

Разработана и верифицирована архитектура блока фазовой подстройки тактового сигнала для DDR PHY, обеспечивающая динамическую перестройку задержки без остановки тактирования и без генерации глитчей. Использование двух DCDL с переключением в момент низкого уровня обоих сигналов позволяет полностью исключить простои шины данных, что критически важно для современных высокоскоростных интерфейсов. Моделирование post-route netlist с SDF-задержками подтвердило отсутствие паразитных импульсов при переключении и позволило получить количественные оценки латентности, остаточной фазовой ошибки и дополнительных аппаратных затрат. Предложенное решение создаёт основу для реализации алгоритмов фоновой калибровки в перспективных разработках DDR PHY. Дальнейшие исследования будут направлены на пост-топологическое моделирование с учётом паразитных ёмкостей и корреляционный анализ Монте-Карло для оценки устойчивости к технологическим разбросам.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” – НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Glitch-free dynamic phase retuning unit in high-speed DDR PHY clocking circuits

T. R. Denschikov, K. A. Petrov

Abstract. This paper discusses a modification of the Clock Phase Adjustment unit within the digital interface block of a DDR PHY, designed for generating and adjusting clock signals in the transmit and receive paths. The relevance of this task is driven by the increasing demands on the timing stability of high-speed interfaces and the necessity to calibrate phase relationships without interrupting path operation. In the original architecture, changing a delay involves a procedure for updating the controlled delay line and must be accompanied by a pause in the operation of the corresponding section of the clock path. The proposed modification transitions the Clock Phase Adjustment Block unit to a circuit with a shadow adjustment path, where the new delay value is prepared in an inactive branch, and switching to the updated configuration is performed via glitch-safe clock control logic. This solution eliminates the need to stop the operational clock signal, reduces the risk of synchronization disruption, and enables seamless phase retuning during system operation.

Keywords: DDR PHY, DLL, DCDL, digital delay line, phase adjustment, clock signal, dynamic retuning

Литература

1. Okajima K. et al. Digital delay-locked loop and design technique for high-speed synchronous interface // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. — 1996. — Vol. 31, No. 8. — P. 1130–1138.
2. Matano K. et al. A 1-Gb/s/pin 512-Mb DDRII SDRAM using a digital DLL and slew-rate-controlled output buffer // *IEEE Symposium on VLSI Circuits*, 2002.
3. Lee, Y. and Park, I.-C. (2014), Single-step glitch-free NAND-based digitally controlled delay lines using dual loops. *Electron. Lett.*, 50: 930-932. <https://doi.org/10.1049/el.2014.0331>
4. Zeidler M., Kohnert M., Rosenstiel W. A glitch-free clock multiplexer for non-continuously running clocks // 2020 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD). Kranj, Slovenia, 2020. — P. 11–16.C.
5. Kim et al., "A fast-locking harmonic-free digital DLL for DDR3 and DDR4 SDRAMs," *IEICE Electronics Express*, vol. 14, no. 2, pp. 1-6, 2017. doi: 10.1587/elex.14.20161020.
6. Chen C.-H. et al. A fast-locking all-digital delay-locked loop for DDR controller interface // *Journal of Semiconductors*. — 2011. — Vol. 32, No. 10. — P. 105010-1–105010-6.
7. Meijer G. et al. Glitch-free discretely programmable clock generation on chip // *ISCAS*, 2005
8. Y. Song and Z. Zhang, "A 1.2 Gb/s/pin double-data-rate SDRAM with on-chip duty-cycle corrector," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 4, pp. 824-831, April 2006, doi: 10.1109/JSSC.2006.870765.
9. Qin, B.; Zhao, L.; Fang, C.; Pochmueller, P. A Design of a Dual Delay Line DLL with Wide Input Duty Cycle Range. *Electronics* 2023, 12, 2696. <https://doi.org/10.3390/electronics12122696>

Поступила в редакцию / Received: 24.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 09.04.2026.

Принята к печати / Accepted: 13.04.2026.

УДК 004.415.2

Аналитическая платформа для оценки эффективности разработки GITALPHA

С. Н. Яцук¹, С. Г. Еловой²¹СурГУ, Сургут, Россия, yatsuk_sn@edu.surgu.ru;²Сургутский филиал НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Сургут, Россия, s.elovoy@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается концепция аналитической платформы GitAlpha, предназначенной для преобразования данных Git-активности в понятную и структурированную информацию о работе команд разработки. Показано, как автоматический сбор данных о коммитах, запросах на слияние (merge-requests) и код-ревью позволяет формировать показатели вовлечённости, вклада и эффективности разработчиков, а также выявлять узкие места процессов. Рассматриваются архитектурные решения, используемые для обработки Git-данных, принципы визуализации метрик и аспекты интеграции системы с GitLab и BitBucket. Обосновывается актуальность проекта в условиях растущего спроса на отечественные инструменты аналитики разработки и усиления тенденций к импортозамещению.

Ключевые слова: производительность разработки; git; merge-requests; код-ревью; визуализация данных; эффективность разработки; аналитика git-репозитория; GitLab, BitBucket

1. Введение: актуальность и проблематика

Современные процессы разработки программного обеспечения требуют высокой прозрачности и оперативного доступа к данным о взаимодействии участников проекта. Системы контроля версий, такие как GitLab и BitBucket, используются не только как простые сервисы хостинга кода, но и постепенно становятся ключевыми источниками объективной информации о динамике разработки, однако большинству компаний не хватает имеющегося функционала [2]. В отсутствие специализированных инструментов аналитики руководителям приходится опираться на субъективные оценки и разрозненные данные, что затрудняет принятие решений. Аналитическая платформа GitAlpha предлагает решение данной проблемы за счёт автоматизированного анализа Git-репозитория удобных и визуализаций метрик, отражающих вовлечённость, вклад и эффективность участников команды [3]. Платформа позволяет перейти от ручного анализа Git-логов к системным представлениям о производительности, используя данные о коммитах, merge requests, обсуждениях, ревью и т.д. для получения управленческих показателей. Такой подход принципиально повышает прозрачность процессов разработки и предоставляет руководству возможность объективно оценивать скорость и качество работы как отдельных разработчиков, так

и целых команд.

Актуальность разработки GitAlpha обусловлена уходом зарубежных сервисов аналитики разработки, что создало дефицит доступных платформ, ориентированных на отечественные команды. Дополнительным фактором выступает рост спроса на инструменты анализа производительности разработки, связанный с цифровизацией индустрии и усложнением программных продуктов. GitAlpha позиционируется как инструмент, который позволяет компаниям повысить прозрачность процессов разработки, выявить потери рабочего времени и оптимизировать взаимодействие внутри команды. Применение платформы обеспечивает сокращение времени прохождения merge requests, более равномерное распределение нагрузки между разработчиками и повышение скорости доставки функциональности [1].

2. Целевая аудитория и принцип работы платформы

GitAlpha ориентирована на технических лидеров, менеджеров проектов, разработчиков и руководителей подразделений, которым важно понимать реальное состояние процессов разработки. Подключение репозитория осуществляется пользователем через персональные токены GitLab и BitBucket, после чего система автоматически извлекает данные о репозиториях и преобразует их в структурированные показатели. Сырые

данные о коммитах, запросах на слияние, комментариях и обсуждениях проходят этапы агрегирования и дистилляции, что позволяет выделять ключевые параметры: частоту активности, скорость реакции на ревью, время цикла merge request, вклад участника в общий объём изменений и другие. Визуализация метрик в виде графиков и диаграмм обеспечивает наглядное представление динамики процессов и облегчает сравнение команд и отдельных разработчиков.

Отдельной особенностью GitAlpha является возможность развёртывания платформы на собственных серверах компании. Поддержка on-premise-установки позволяет организациям использовать аналитическую систему, не передавая чувствительные данные о разработчиках и внутренних проектах во внешние облака. Такой подход особенно важен для крупных организаций, предприятий с повышенными требованиями к безопасности, государственных структур и компаний, работающих с конфиденциальными данными. Локальное развёртывание обеспечивает полный контроль над хранилищем данных, позволяет интегрировать систему в существующую корпоративную инфраструктуру, применять собственные политики резервного копирования и шифрования, а также минимизировать зависимость от внешних сервисов. Кроме того, такая модель снижает риски нарушения нормативных требований и обеспечивает соответствие внутренним регламентам по защите информации. Таким образом, поддержка локального развёртывания представляет собой значимое конкурентное преимущество сервиса, особенно в условиях растущей потребности компаний в автономных и надежных решениях [5].

3. Функциональные возможности системы

Функциональные возможности системы включают автоматизированный сбор и обновление данных, формирование аналитических отчётов по разработчикам и репозиториям, настройку временных интервалов анализа и фильтрацию активности. Отчёты позволяют выявлять замедления процессов код-ревью, определять «узкие места» - например, большие коммиты, долгие

обсуждения или просроченные merge requests, а также анализировать вклад и загруженность участников. Такой подход делает систему полезной как для руководителей, так и для самих разработчиков, которые могут отслеживать собственную динамику и вовлечённость [4].

4. Архитектура и технологический стек

Надёжность системы обеспечивается микросервисной архитектурой (рис. 1), возможностью горизонтального масштабирования и применением механизмов автоматизированной проверки состояния сервисов. Серверная часть реализована на Java 17 и Spring Boot и включает сервисы, отвечающие за авторизацию, интеграцию с Git-платформами, сбор и анализ статистики, и взаимодействие с клиентским интерфейсом через REST API. Данные хранятся в реляционной базе данных PostgreSQL, а для развёртывания используется Docker и Docker Compose, обеспечивающие изоляцию окружений и легкость развёртывания сервиса. Клиентская часть написана на языке TypeScript с использованием библиотеки React и современного фреймворка Next JS. Визуализация аналитических отчётов реализована на базе Mantine Charts. Такой технологический стек обеспечивает высокую производительность, расширяемость и удобство интерфейса. Особое внимание уделяется безопасности данных: используются протокол HTTPS, JWT-токены, шифрование чувствительной информации и ограничение доступа в рамках предоставленных пользователем токенов. При необходимости есть возможность поддержать современный протокол OAuth, обеспечивающий безопасную авторизацию и аутентификацию через сторонние сервисы, такие как Яндекс, ВК и другие. Для восстановления данных предусмотрены резервные копии базы данных и журналы аудита. Организационная модель использования платформы предполагает, что каждый пользователь самостоятельно подключает свои репозитории, а система не использует ролевую модель доступа, что упрощает её внедрение и снижает порог входа для пользователей.

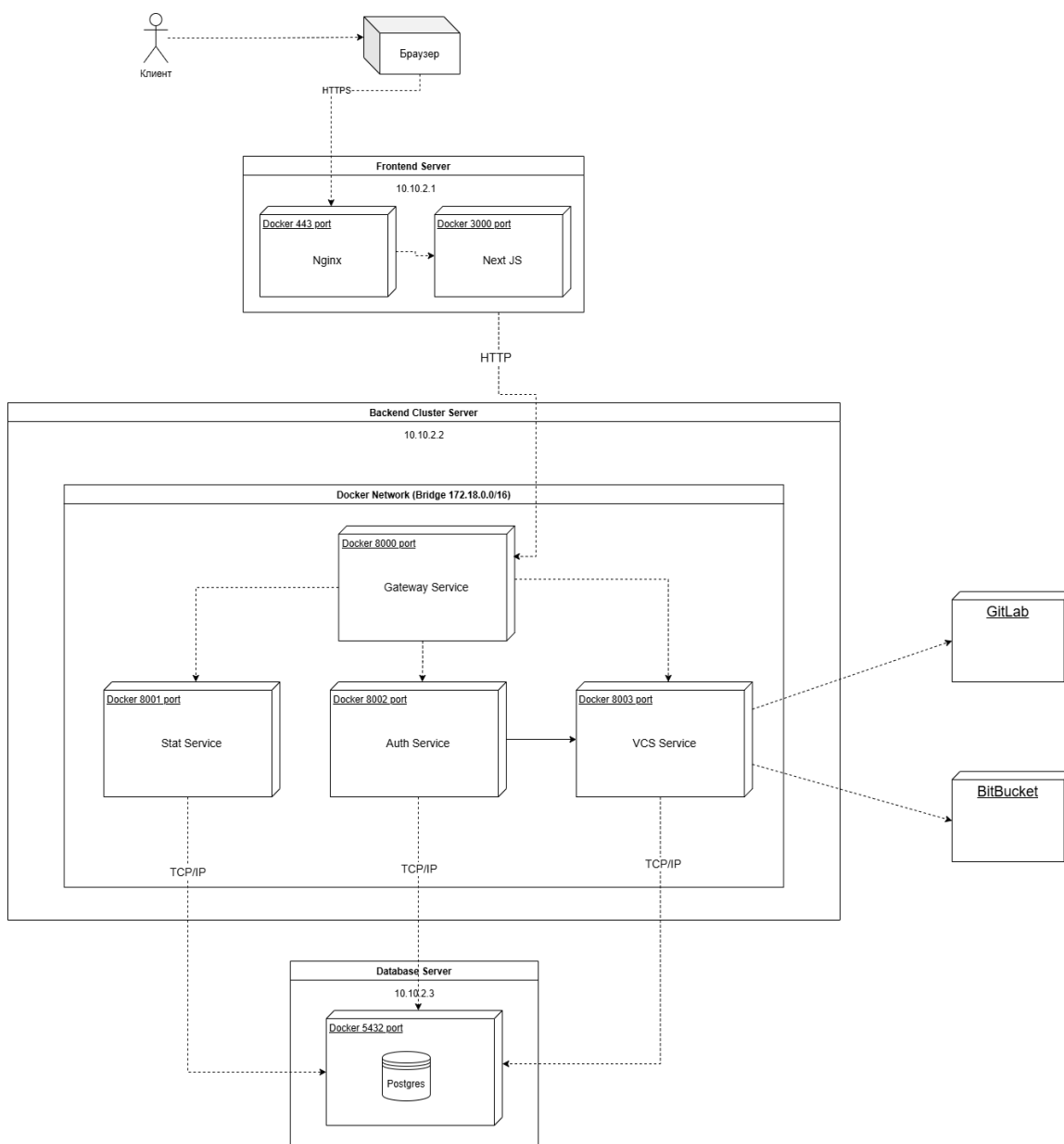


Рис. 1. Диаграмма развертывания компонентов сервиса GitAlpha

5. Заключение

Таким образом, GitAlpha представляет собой современную аналитическую платформу, способную предоставить объективную информацию о работе команды разработки на основе данных Git. Система сочетает автоматизированный сбор данных, удобные визуализации, современную архитектуру и возможность интеграции в уже

существующую инфраструктуру, что делает её перспективным инструментом для повышения эффективности разработки в отечественных организациях. Продукт отвечает тенденциям развития аналитики, цифровизации процессов создания программного обеспечения и формированию спроса на отечественные программные продукты, обеспечивающие независимость от зарубежных сервисов.

GITALPHA, an analytical platform for evaluating the effectiveness of development

S. N. Yatsuk, S. G. Elovoj

Abstract. This article explores the concept of the GitAlpha analytics platform, designed to transform Git activity data into understandable and structured information about the work of development teams. It demonstrates how automatic collection of data on commits, merge requests, and code reviews allows for the generation of metrics on developer engagement, contribution, and efficiency, as well as the identification of process bottlenecks. The article also examines the architectural solutions used for processing Git data, the principles of metric visualization, and aspects of the system's integration with GitLab and BitBucket. The relevance of the project is substantiated in the context of growing demand for domestic development analytics tools and the strengthening trend toward import substitution.

Keywords: developer productivity; git; merge requests; code review; data visualization; developer efficiency; git repository analytics; GitLab, BitBucket

Литература

1. Филиппов В.В., Герасимов А.В. Метрики и показатели качества процесса разработки программного обеспечения в современных командных средах // Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33. № 1. С. 112–125. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(1\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-8)
2. Котов В.Е., Захаров Н.М. Исследование возможностей систем контроля версий для анализа производственных процессов разработки ПО // Программные продукты и системы. 2020. № 4. С. 235–243. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.132.235-243>
3. Баранов П.А., Тарасов С.В. Автоматизированный анализ Git-репозитория как инструмент повышения эффективности разработки // Открытые системы. СУБД. 2022. № 3. С. 29–38.
4. Горбунов А.А., Соколов И.В. Метрики жизненного цикла разработки и их применение в задачах управления командами // Программная инженерия. 2023. Т. 14. № 2. С. 87–96. <https://doi.org/10.17587/prin.14.87-96>
5. Петрова Е.Н., Романов А.В. Аналитические подходы к оценке производительности инженерных команд в условиях цифровизации // Информационные технологии и вычислительные системы. 2024. № 1. С. 41–50.

Поступила в редакцию / Received: 15.12.2025.

Поступила после рецензирования / Revised: 20.03.2026.

Принята к печати / Accepted: 23.03.2026.

УДК 372.8; 519.683

Особенности организации двухнедельного курса по обучению программированию с использованием среды «ПиктоМир» в разновозрастных группах

А. И. Аханкина¹, Г. О. Райко¹, М. В. Райко^{1,2}, У. М. Солопова¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ, Москва, Россия;

²Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлен опыт организации и проведения двухнедельной образовательной программы «Создай свой цифровой мир. Азы программирования» во Всероссийском детском центре «Смена». Участниками программы стали школьники 12–14 лет из 15 регионов России, прошедшие конкурсный отбор. В рамках программы реализовывались методические подходы к обучению программированию с использованием отечественной предметно-цифровой среды «ПиктоМир». Описываются особенности работы с разновозрастной группой, адаптация заданий под уровень подготовки участников, а также результаты итогового соревнования по кооперативному программированию. Статья будет полезна педагогам дополнительного образования и организаторам профильных смен в детских центрах.

Ключевые слова: ПиктоМир, алгоритмическое мышление, разновозрастная группа, кооперативное программирование, программирование

1. Введение

ФГБОУ Всероссийский детский центр (ВДЦ) «Смена» (г. Анапа) является уникальной образовательной площадкой, где в условиях временного детского коллектива создаются возможности для интенсивного личностного и интеллектуального развития школьников. Особенность работы в этом детском образовательном лагере заключается в ограниченном временном ресурсе (14 дней), разновозрастном составе участников и уровне их предварительной подготовки. В этих условиях особую значимость приобретают образовательные инструменты, позволяющие быстро вовлечь детей в продуктивную деятельность, выровнять стартовые возможности и обеспечить индивидуальную траекторию обучения [6; 7].

Одним из таких инструментов является предметно-цифровая среда «ПиктоМир» [10], разработка которой началась в ФГУ ФНИЦ НИИСИ РАН около 15 лет тому назад и сегодня продолжается в НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ. Хотя с момента создания «ПиктоМир» позиционировался как среда для дошкольников и младших школьников [1; 2], наш опыт применения в ВДЦ «Смена» показал,

что при правильной методической организации эта среда эффективно работает и с более старшей подростковой аудиторией, позволяя в сжатые сроки освоить ключевые алгоритмические концепции.

2. Организация и содержание образовательной программы

Для проведения занятий в ВДЦ «Смена» в отделе учебной информатики НИЦ «Курчатовский институт» - НИИСИ была создана специальная общеразвивающая образовательная программа «Создай свой цифровой мир. Азы программирования» и разработана методика для ее проведения. Сотрудники отдела проводили занятия по этой программе 27 учебных часов, что заняло две календарные недели непосредственно в ВДЦ «Смена». С целью набора мотивированных учащихся в программу НИЦ «Курчатовский институт» провел конкурсный набор среди школьников 12-14 лет из разных регионов России (рис. 1).

Конкурсный отбор прошли 25 человек из 60 подавших заявки. Возрастной состав распределился так: двое пятиклассников, восемь шестиклассников, восемь

семиклассников и семеро восьмиклассников.

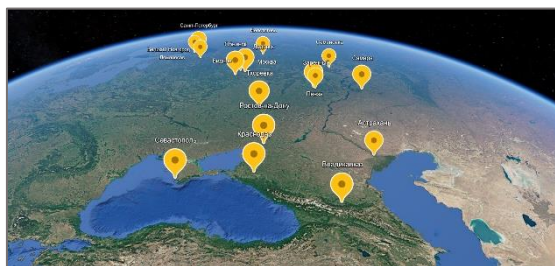


Рис. 1. География участников программы.

На момент начала занятий по программе программированием владели всего 7 человек; большинству же — 18 школьникам — предстояло осваивать азы предмета с самых основ. Эта пропорция, хорошо знакомая педагогам дополнительного образования, работающим с разновозрастными группами, неизбежно подводит к необходимости гибких, индивидуально ориентированных методик.

Занятия проводились (рис. 2) на базе оборудования, предоставленного ВДЦ «Смена» (16 стационарных ПК, 2 телевизора) и НИЦ «Курчатовский институт» (15 планшетов Android с подставками, комплект «ПиктоМир», а также 2 преподавательских планшета).



Рис. 2. Школьники выполняют практические задания

2.1. Методические особенности работы с разновозрастной группой

Ключевая трудность программы: как одновременно учить школьников с разным уровнем знаний и возрастными особенностями? Решение нашлось в трёх подходах.

Подход первый — организационный. Разницу в подготовке обратили в ресурс: те, кто уже умел программировать, стали наставниками для остальных. Педагог получил время для сложных случаев, у «наставников» выросла мотивация и самооценка, а в группе воцарилась атмосфера поддержки, а не соперничества.

Подход второй — форма подачи. От традиционных лекций почти отказались, сделав ставку на викторины, практику в «ПиктоМире» и соревнования. Результат — дети не заскучали и сохранили внимание на все 14 дней интенсива (рис.3).



Рис. 3. Управление реальным роботом Ползуном

Подход третий — содержательный. Задания в «ПиктоМире» были разноуровневыми. Автоматический учёт прогресса каждого позволял педагогу гибко настраивать индивидуальный маршрут.

2.2. Содержание программы

Обучение строилось вокруг изучения системы команд исполнителей среды «ПиктоМир» и освоения практики составления несложных программ управления движущимися объектами с обратной связью. За время двухнедельной программы участники освоили следующие темы:

- линейные алгоритмы;
- циклы с повторением (цикл «n раз»);
- циклы с условием (цикл «пока»);
- подпрограммы;
- условные конструкции «если — то — иначе».

Каждый участник составил программы для решения 170–250 типовых задач [3-5]. Такой объем практической работы позволил закрепить изученные алгоритмические конструкции и сформировать устойчивые навыки их применения.

В процессе освоения программы школьники, включая пятиклассников и шестиклассников, имели возможность изучить типовые задания из ОГЭ по информатике для учащихся девятых классов. Основной акцент был сделан на проработке умений решать алгоритмические задания (варианты) задачи №15 из кодификатора ОГЭ по информатике. Особенность этой задач состоит в использовании виртуального исполнителя Робот, поэтому ее можно решать в учебной среде «ПиктоМир». Подобный подход позволил соотнести содержание курса с актуальными образовательными задачами, тем самым повысив заинтересованность учащихся к программированию.

2.3. Структура образовательной программы

Ядром программы являются представленные в предыдущих пунктах актуальные методики обучения программированию и развитию алгоритмического мышления.

В процессе разработки программы были учтены следующие принципы:

- системность и поэтапность освоения материала;
- доступность и наглядность подачи информации;
- ориентация на практику;
- учёт индивидуальных особенностей обучающихся.

Программа состоит из шести взаимосвязанных модулей, которые выстроены как целостная система изучения основ программирования. Каждый модуль представляет собой автономный учебный блок, одновременно вписывающийся в общую логику курса.

Подобная организация обучения позволяет:

- постепенно наращивать сложность изучаемого материала;
- последовательно формировать у школьников профессиональные навыки и компетенции.

Обучение выстроено по принципу «от простого к сложному»: от базовых понятий к продвинутым алгоритмическим структурам. Знания и умения, полученные на предыдущих этапах, служат опорой для освоения последующих тем.

Концепция курса построена на интеграции теоретической подготовки и практических навыков. Это обеспечивает разносторонность получаемых знаний. В каждом модуле теоретические положения подкрепляются реальными кейсами — так абстрактные концепции обретают практическое применение. Такой подход создаёт динамичную образовательную среду, где теория и практика дополняют друг друга, помогая учащимся сформировать целостное понимание предмета.

Структура образовательной программы:

Модуль 1. Программирование без обратной связи: линейный алгоритм.

Этот стартовый модуль закладывает фундамент для дальнейшего изучения программирования. Учащиеся знакомятся с базовыми алгоритмическими конструкциями через выполнение простых последовательных операций и работу с упрощёнными роботизированными системами. На этом этапе осваиваются основы построения алгоритмов без использования условных операторов.

Модуль 2. Программирование без обратной

связи: циклы и подпрограммы.

Этот этап позволяет не только закреплять ранее приобретённые навыки, но и, на базе первого модуля, позволяет освоить более сложные алгоритмические структуры. Все это позволит детям перейти к изучению механизмов обратной связи.

В сравнении с первым модулем, где основное внимание уделялось развитию у детей понимания линейных алгоритмов, то представленный модуль делает упор на развитие навыков оптимизации программы. Вводятся понятия циклов и подпрограмм. Обучение переходит от простых последовательностей команд к сложным.

Все эти навыки создают фундамент к будущему изучению условных конструкций.

Модуль 3. Программирование с обратной связью.

Третий модуль представляет собой следующую ступень в освоении программирования. Учащиеся переходят от базовых к продвинутым алгоритмическим конструкциям. Упор делается на создание программных решений с обратной связью, способной к ситуационному анализу и принятию решения на основе заданных условий.

Модуль 4. Решение задач с исполнителем Робот. Решение задач ОГЭ.

Представленный модуль нацелен на выстраивание связи между теорией и практикой в рамках подготовки к ОГЭ по информатике. Ключевым элементом заданий на данном этапе является работа с исполнителем Робот. Учащиеся не только закрепляют пройденные знания, а применяют их в контексте реальных экзаменационных заданий. Такой подход позволяет детям укрепить уверенность в себе, собственных знаниях и умениях, а также повышают шансы на успешное выполнение заданий с Роботом на ОГЭ.

Модуль 5. Решение задач головоломок.

На этапе пятого модуля учащиеся продолжают развивать ранее полученные умения в программировании на базе цифровой среды «ПиктоМир». Основной акцент заданий смещается с «просто» применения полученных навыков к поиску более нестандартных путей решения сложных задач. В процессе дети учатся мыслить творчески и находить неожиданные решения. Все полученные навыки перерабатываются и находят новые пути реализации. Подобная практика развивает гибкость алгоритмического мышления. Дети учатся осваивать способы подбора и адаптации своих знаний под специфику конкретной задачи.

Итогом данного модуля можно считать развитие устойчивого интереса к задачам повышенной сложности, а отработанные компетенции становятся инструментом для дальнейшего обучения.

Модуль 6. Кооперативное программирование.

Модуль представляет собой кульминационный этап в двухнедельном изучении программирования. На данном этапе учащиеся впервые знакомятся с азами параллельного программирования и командной работы. Это важный шаг в развитии профессиональных навыков будущего программиста.

Заключающим этапом не только этого модуля, но и всего курса является соревнование по кооперативному программированию. Соревнование позволило учащимся продемонстрировать знания и навыки, полученные в процессе прохождения курса, а также помогло им выявить свои сильные стороны, определить направления для дальнейшего развития в области программирования.

Разберем итоги соревнования подробнее.

2.4. Итоговое соревнование по кооперативному программированию

Формат соревнования предполагал работу в парах, где участники совместно решали задачи в среде «ПиктоМир» (рис. 4).



Рис. 4. Соревнование по кооперативному программированию

Результаты соревнования:

- 1 место — команда, решившая 17 задач из 18 (2 первых места, 1 команда);
- 2 место — команды, решившие по 16 задач (8 вторых мест, 4 команды);
- 3 место — участники, выполнившие от 10 до 15 задач (15 третьих мест).

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной методики. Даже участники, начинавшие с нуля, смогли за две недели освоить материал, достаточный для успешного решения значительного объема алгоритмических задач в условиях командного соревнования.

3. Заключение

27-часовая программа «Создай свой цифровой мир: азы программирования» была реализована полностью. Опыт её проведения в разновозрастных группах ВДЦ «Смена» с использованием среды «ПиктоМир» позволяет сделать несколько ключевых выводов.

Во-первых, среда показала свою универсальность: она эффективна не только для младших школьников, но и для подростков 12–14 лет, особенно тех, кто начинает обучение с нуля.

Во-вторых, использование наставничества (принцип «равный — равному») позволяет сгладить разницу в уровне подготовки участников и даёт дополнительные результаты — развитие коммуникации и ответственности.

В-третьих, интенсивный формат себя оправдал: как показали соревнования за две недели школьники освоили широкий круг алгоритмических конструкций, решили множество задач и смогли применить свои знания в соревнованиях.

В-четвёртых, связь содержания программы с требованиями основного курса информатики [8; 9] и практика решения задач ОГЭ усиливают мотивацию учащихся и обеспечивают преемственность между дополнительным и основным образованием.

Изложенный опыт рекомендуется к использованию педагогами дополнительного образования, руководителями детских лагерей и специалистами в сфере IT-образования, работающими с разновозрастными группами.

Features of organizing a two-week course on teaching programming using the «PictoMir» digital learning environment in mixed-age groups

A. I. Akhankina¹, G. O. Raiko¹, M. V. Raiko^{1,2}, U. M. Solopova¹

Abstract. The article presents the experience of organizing and conducting a two-week educational program "Create your own digital world. Basics of programming" at the "Smena" children center. The participants of the program were schoolchildren aged 12-14 from 15 regions of Russia, who passed the competitive selection. The program implemented methodological approaches to teaching programming using the PictoMir digital learning environment. It describes the specifics of working with a diverse age group, adapting tasks to the level of training of participants, as well as the results of the final cooperative programming competition. The article will be useful for teachers of additional education and organizers of specialized courses in children centers.

Keywords: PictoMir, algorithmic thinking, mixed-age group, cooperative programming, programming

Литература

1. Бетелин, В.Б. Основные понятия программирования в изложении для дошкольников / В. Б. Бетелин, А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов // Информатика и её применение. — 2020. — Т. 14, №3. — С. 55–61.
2. Besshaposhnikov, N. Pictomir: how and why do we teach textless programming for preschoolers, first graders and students of pedagogical universities / N. Besshaposhnikov, A. Kushnirenko, A. Leonov // CEE-SECR'17: Proceedings of the 13th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia, October 2017. — No. 21. — P. 1–7.
3. Информатика: 9 класс: Учебник / А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов, Я. Н. Зайдельман, В. В. Тарасова. – Москва: Просвещение, 2022.
4. Информатика: 8 класс: Учебник / А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов, Я. Н. Зайдельман, В. В. Тарасова. – Москва: Просвещение, 2022.
5. Информатика: 7 класс: Учебник / А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов, Я. Н. Зайдельман, В. В. Тарасова. – Москва: Просвещение, 2021.
6. Леонов, А. Г. Цифровые образовательные среды – основа формирования алгоритмического мышления / А. Г. Леонов // Журнал педагогических исследований. – 2024. – Т. 9, № 4. – С. 50-57.
7. Леонов, А. Г. Подходы к преподаванию основ программирования от вуза до детского сада / Леонов, А. Г. // М.: НАУКА, 2024.
8. О внесении изменений в некоторые приказы Министерства просвещения Российской Федерации, касающиеся федеральных образовательных программ начального общего образования, основного общего образования и среднего общего образования: приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 9 октября 2024 года № 704 – Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202502120007> (дата обращения: 12.05.2025).
9. Об утверждении федеральной образовательной программы основного общего образования: приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 18 мая 2023 года № 370 – Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202307140040> (дата обращения: 12.05.2025).
10. Стартовая страница проекта «ПиктоМир» на сайте НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ // URL: <https://www.niisi.ru/piktomir/> (дата обращения: 20.03.2026). – Электронный ресурс.

Поступила в редакцию / Received: 30.03.2026.

Поступила после рецензирования / Revised: 03.04.2026.

Принята к печати / Accepted: 03.04.2026.

Наименование: сетевой рецензируемый научный журнал «Труды НИИСИ»
ISSN: 3033-6422
Сведения о переименовании: до 2025 года журнал издавался в печатном виде с названием «Труды НИИСИ РАН», ISSN 2225-7349
Журнал основан: 2011 г.
Периодичность: 4 раза в год
Учредитель и издатель: НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
Главный редактор: Бетелин Владимир Борисович, д. ф.-м. н., профессор, академик РАН
Адрес учредителя и издателя: 117218, Москва, Нахимовский проспект, д.36, к.1
Адрес редакции: 117218, Москва, Нахимовский проспект, д.36, к.1
Контакты: Тел.: +7 (925) 924-83-46; muranov@niisi.msk.ru
Подписка: Электронная версия журнала находится в свободном доступе на сайте журнала, а также в базах данных открытого доступа

Title: *SRISA Proceedings* online peer-reviewed journal
ISSN: 3033-6422
Former title: until 2025, the journal was published in print under the name *Trudy NIISI RAN* (Proceedings of SRISA, Russian Academy of Sciences), ISSN 2225-7349
Published since: 2011
Publication frequency: Quarterly
Founder and publisher: NRC "Kurchatov Institute" - SRISA
Chief Editor: Vladimir B. Betelin, Doctor of Science (Phys&Math), Prof., member of the Russian Academy of Sciences,
Address of the founder and publisher: 117218, Moscow, Nakhimovsky avenue, 36, bldg. 1
Address of the editorial office: 117218, Moscow, Nakhimovsky avenue, 36, bldg. 1
Contacts: Tel.: +7 (925) 924-83-46; muranov@niisi.msk.ru
Subscription: The electronic version of the journal is freely available on the journal's website, as well as in open access databases