

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ
ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ҚАЗАҚСТАН ӨНДІРІС КӨЛІГІ

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ
КАЗАХСТАНА

INDUSTRIAL TRANSPORT
OF KAZAKHSTAN

ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ
КӨЛІКТІК-
ГУМАНИТАРЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІ



МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ТРАНСПОРТНО-
ГУМАНИТАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

2026 №1(89)

январь-март

РЕДАКЦИЯЛЫҚ КЕҢЕС:

БАС РЕДАКТОР:

Омаров Амангельды Джумагалиевич — (Халықаралық көліктік-гуманитарлық университетінің Президенті, т.ғ.д., проф., халықаралық көлік және ақпараттандыру академияларының толық мүшесі)

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА:

Турдалиев Ауезхан Турдалиевич — (т.ғ.д., проф., Машина жасау, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:56466038000, Scopus h-индекс - 2)

Майлыбаев Ерсайын Курманбаевич — (PhD, Автоматтандыру және басқару, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:57190165227, Scopus h-индекс - 2)

Ахметов Бахытжан Сражатдинович — (т.ғ.д., проф., Әлеуметтік экономикалық жүйелерде басқару, Абай ат. Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:56910050000, Scopus h-индекс - 8)

Ахметов ДаниярАқбулатович — (т.ғ.д., проф., Құрылыс бұйымдары мен конструкцияларын өндіру, Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:57224279309, Scopus h-индекс - 5)

Войцик Вальдемар — (т.ғ.д., проф., Люблин политехникалық университеті, Польша, Scopus Autor ID:7005121594, Scopus h-индекс - 25)

Лахно Валерий Анатольевич — (т.ғ.д., проф., Ақпаратты қорғау жүйесі, Ұлттық биоресурстар және табиғатты пайдалану университеті, Украина, Scopus Autor ID57680586200, Scopus h-индекс - 13)

Оралбекова Аяулым Оралбековна — (PhD, Ақпараттандыру және басқару, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Қазақстан, Алматы Scopus Autor ID:57210248989, Scopus h-индекс - 3)

Жұман Жаппар — (э.ғ.д., проф., Экономика, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Қазақстан, Алматы Scopus Autor ID:56658765400, Scopus h-индекс - 7)

Козбакова Айнур Холдасовна — (PhD, Ақпараттық жүйе, әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:57195683902, Scopus h-индекс - 8)

Фуад Мохамед Хасан Хошнав — (PhD, Машина жасау, Де Монтфорт университеті, Ұлыбритания, Лестер, Scopus Autor ID:14008036500, Scopus h-индекс - 8)

Миркин Евгений Леонидович — (т.ғ.д., проф., Ақпаратты өңдеу және басқару, Қырғызстан халықаралық университеті, Қырғызстан, Бішкек, Scopus Autor ID15623452500, Scopus h-индекс - 5)

«Қазақстан өндіріс көлігі» журналы

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

Меншік иесі: Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті (Алматы қ.).

Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінде тіркелген. Тіркеу туралы куәлік № KZ27VPY00074524, 28.07.2023 ж. берілген.

Тақырып бағыты: Есептеу техникасы, ақпараттық жүйелер, электр энергетикасы және көлікті автоматтандыру.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Тираж: 500 дана.

Редакция мекенжайы: Қазақстан, Алматы қ., Жетісу-1 ықшам ауданы, 32а үй.

Кон. Тел.: 8 (727) 376-74-78.

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Журнал сайты: <https://prom.mtgu.edu.kz>

© Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, 2026

© Авторлар ұжымы, 2026

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Омаров Амангельды Джумагалиевич — (Президент Международного транспортно-гуманитарного университета, д.т.н. профессор, действительный член международных академий транспорта и информатизации)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Турдалиев Ауезхан Турдалиевич — (д.т.н., проф., Машиностроение, Международный транспортно-гуманитарный университет, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:56466038000, Scopus h-индекс - 2)

Майлыбаев Ерсайын Курманбаевич — (PhD, Автоматизация и управление, Международный транспортно-гуманитарный университет, Казахстан, Алматы Scopus Autor ID:57190165227, Scopus h-индекс - 2)

Ахметов Бахытжан Сражатдинович — (д.т.н., проф., управление в социальных и экономических системах, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:56910050000, Scopus h-индекс - 8)

Ахметов Данияр Акбулатович — (д.т.н., проф., производство строительных изделий и конструкций, Казахский национальный исследовательский технический университет, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:57224279309, Scopus h-индекс - 5)

Войцик Вальдемар — (д.т.н., профессор Люблинского политехнического университета, Польша, Scopus Autor ID:7005121594, Scopus h-индекс - 25)

Лахно Валерий Анатольевич — (д.т.н., проф., системы защиты информации, Национальный университет биоресурсов и природопользования, Украина, Scopus Autor ID:57680586200, Scopus h-индекс - 13)

Оралбекова Аяулым Оралбековна — (PhD, Автоматизация и управление, Международный транспортно-гуманитарный университет, Казахстан, Алматы Scopus Autor ID:57210248989, Scopus h-индекс - 3)

Жуман Жаппар — (д.э.н., проф., КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:56658765400, Scopus h-индекс - 7)

Козбакова Айнур Холдасовна — (PhD, Информационные системы, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:57195683902, Scopus h-индекс - 8)

Фуад Мохамед Хасан Хошнав — (PhD, машиностроение, Университет Де Монтфорт, Великобритания, Лестер, Scopus Autor ID:14008036500, Scopus h-индекс - 8)

Миркин Евгений Леонидович — (д.т.н., проф., управление и обработка информации, Международный университет Кыргызстана, Кыргызстан, Бишкек, Scopus Autor ID:15623452500, Scopus h-индекс - 5)

Журнал «Промышленный транспорт Казахстана»

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

Собственник: Международный транспортно-гуманитарный университет (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан № KZ27VPY00074524, выданное от 28.07.2023 г.

Тематическая направленность: вычислительная техника, информационные системы, электроэнергетика и автоматизация транспорта.

Периодичность: 4 раза в год.

Тираж: 500 экземпляров.

Адрес редакции: г. Алматы, мкрн. Жетысу-1, д. 32а. Кон. Тел.: 8(727) 376-74-78

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Сайт журнала: <https://prom.mtgu.edu.kz>

EDITOR-IN-CHIEF:

Omarov Amangeldy Dzhumagalievich — (President of the International Transport and Humanities University, Doctor of Technical Sciences, Professor, full member of the international academies of transport and information)

EDITORIAL BOARD:

Turdaliev Auyezkhan Turdalievich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering, International Transport and Humanitarian University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:56466038000, Scopus h-index - 2)

Mailybaev Ersayyn Kurmanbaevich — (PhD, Automation and Management, International Transport and Humanitarian University, Kazakhstan, Almaty Scopus Autor ID:57190165227, Scopus h-index - 2)

Akhmetov Bakhytzhhan Batdinovich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Management in social and economic systems, Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:56910050000, Scopus h-index - 8)

Akhmetov Daniyar Akbulatovich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, manufacture of building products and structures, Kazakh National Research Technical University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:57224279309, Scopus h-index -5)

Wojcik Waldemar — (Doctor of Technical Sciences, Professor at Lublin Polytechnic University, Poland, Scopus Autor ID:7005121594, Scopus h-index - 25)

Valery A. Lakhno — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Security Systems, National University of Bioresources and Environmental Management, Ukraine, Scopus Autor ID57680586200, Scopus h-index -13)

Oralbekova Ayaulym Oralbekovna — (PhD, Automation and Management, International Transport and Humanitarian University, Kazakhstan, Almaty Scopus Autor ID:57210248989, Scopus h-index - 3)

Zhuman Zhappar — (Doctor of Economics, Prof., KazNU named after. al-Farabi, Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, Almaty Scopus Autor ID:56658765400, Scopus h-index - 7)

Kozbakova Ainur Holdasovna — (PhD, Information Systems, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:57195683902, Scopus h-index - 8)

Fouad Mohamed Hassan Khoshnav — (PhD, Mechanical Engineering, De Montfort University, UK, Leicester, Scopus Autor ID:14008036500, Scopus h-index - 8)

Mirkin Evgeny Leonidovich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Management and Processing, International University of Kyrgyzstan, Kyrgyzstan, Bishkek, Scopus Autor ID15623452500, Scopus h-index -5)

Industrial Transport of Kazakhstan

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

Owner: International university of transportation and humanities (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan, Information Committee KZ27VPY00074524, issued July 28, 2023.

Thematic focus: computer engineering, information systems, electrical power engineering, and transport automation.

Periodicity: 4 times a year.

Circulation: 500 copies.

Editorial address: Kazakhstan, Almaty, microdistrict Zhetysu-1, building 32a. Tel.: 8 (727) 376-74-78

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Journal website: <https://prom.mtgu.edu.kz>

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION

Zh.Zh. Kozhamkulova IOT SYSTEM MODELING AND SIGNAL PROCESSING ON END DEVICES	7
I. Kosyakov, T. Torekeliev, Muhindi Mozeh MODELING AND PROVISIONING OF QUALITY OF SERVICE (QOS) IN WIMAX NETWORKS BASED ON IEEE 802.16 STANDARD	29
A.A. Orazbayev DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS	47
R.T. Safin, Y. Bagdollauly, Jia Wei VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS FOR MOTOR VEHICLES AT INTERSECTIONS	68

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

A. Abzalkhanov STATIC CHARACTERISTICS OF A CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN DYNAMIC BRAKING MODE	83
G.S. Aitkaziyeva DEVELOPMENT OF AN ENERGY SYSTEM WITH EXTREME STEPWISE CONTROL OF SOLAR PANEL POWER	103
V. Guliyev METHODOLOGY FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS OF PASSENGER TRAIN FORMATION AND MOVEMENT	132
P.Yu. Dzekanov, Haseeb Rehman EXPERIMENTAL STUDY OF SHORT-TERM COMPRESSIVE STRENGTH OF COMPOSITE REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH HIGH-STRENGTH REINFORCEMENT	151

МАЗМҰНЫ

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ

Ж.Ж. Кожамкулова ІОТ ЖҮЙЕСІНІҢ МОДЕЛІН ЖӘНЕ СОҢҒЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДАҒЫ СИГНАЛДАРДЫ ӨНДЕУДІ ЗЕРТТЕУ	7
И.О. Косяков, Т.К. Төрекелдиев, Мухинди Мозе IEEE 802.16 СТАНДАРТЫ НЕГІЗІНДЕ WIMAX ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ САПАСЫН (QOS) МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ	29
А.А. Оразбаев ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ПЕН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН АЛГОРИТМДЕРДІ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ	47
Р. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй ЖОЛ ҚИЫЛЫСТАРЫНДА АВТОМОБИЛЬ КӨЛІГІН БЕЙНЕТІРКЕУ ЖҮЙЕЛЕРІ	68

ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

А.Б. Абзалханов ДИНАМИКАЛЫҚ ТЕЖЕУ РЕЖИМІНДЕГІ РЕТТЕЛЕТІН ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ СТАТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ	83
Г.С. Айтказиева КҮН БАТАРЕЯЛАРЫНЫҢ ҚУАТЫН ЭКСТРЕМАЛДЫ ҚАДАМДЫҚ РЕТТЕУ АРҚЫЛЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫ ӘЗІРЛЕУ	103
В.Н. Гулиев ЖОЛАУШЫЛАР ПОЙЫЗДАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУ ЖӘНЕ ҚОЗҒАЛЫС ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ӘДІСТЕМЕСІ	132
П.Ю. Дзеканов, Хасиб Рехман ЖОҒАРЫ БЕРІКТІКТІ АРМАТУРАСЫ БАР ҚҰРАМА ТЕМІР-БЕТОН БАҒАНДАРДЫҢ ҚЫСҚА МЕРЗІМДІ ҚЫСУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ	151

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА

Ж.Ж. Кожамкулова МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОТ-СИСТЕМЫ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ	7
И.О. Косяков, Т.К. Төрекелдиев, Мухинди Мозе МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ (QOS) В СЕТЯХ WIMAX НА БАЗЕ СТАНДАРТА IEEE 802.16	29
А.А. Оразбаев РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	47
Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй СИСТЕМЫ ВИДЕОФИКСАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ПЕРЕКРЁСТКАХ	68

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

А.Б. Абзалханов СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ	83
Г.С. Айтказиева РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ШАГОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ	103
В.Н. Гулиев МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ	132
П.Ю. Дзеканов, Хасиб Рехман ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН С ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРОЙ	151

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ / ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА / ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 7–28
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>
UDC 656.2

IOT SYSTEM MODELING AND SIGNAL PROCESSING ON END DEVICES

Zh.Zh. Kozhamkulova

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek
Daukeyev, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz

Zhadra Kozhamkulova — PhD, Associate Professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9780-9767>.

© Zh.Zh. Kozhamkulova

Abstract. The rapid development of Internet of Things (IoT) systems increases the demand for efficient digital signal processing performed directly on end devices. Limited computational resources, strict energy constraints, and low-latency requirements make the development of optimized signal processing methods a critical research challenge. In such systems, the problem of detecting and processing broadband signals under noisy conditions becomes particularly important. The aim of this study is to develop and analyze digital correlation processing and matched filtering methods suitable for implementation on resource-constrained IoT devices. The objectives of the research include analyzing existing signal detection and matched filtering techniques, developing algorithms with reduced computational complexity, and evaluating their performance through signal modeling and simulation. As a result of the research, an adapted digital correlation processing method based on normalization and computational optimization is proposed. Signal processing simulations were performed for various signal shapes, including rectangular and broadband signals, in the presence of additive noise. The results demonstrate that the proposed method provides reliable signal detection while significantly reducing computational load and processing delay compared to classical correlation-based approaches. In conclusion, the developed methods can be effectively applied in IoT systems, sensor networks, and radio engineering applications, ensuring a balance between detection accuracy and computational efficiency. The obtained results contribute to the advancement of digital signal processing techniques for end devices and form a foundation for further research in energy-efficient data processing algorithms.

Keywords: digital signal processing; matched filtering; signal detection; Internet of Things; correlation processing; broadband signals



For citation: Zh.Zh. Kozhamkulova. IoT System Modeling and Signal Processing on End Devices // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 7–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ИОТ ЖҮЙЕСІНІҢ МОДЕЛІН ЖӘНЕ СОҢҒЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДАҒЫ СИГНАЛДАРДЫ ӨНДЕУДІ ЗЕРТТЕУ

Ж.Ж. Кожамкулова

Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы,
Қазақстан.

E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz

Жадра Кожамкулова — PhD, қауымдастырылған профессор, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9780-9767>.

© Ж.Ж. Кожамкулова

Аннотация. Интернет заттары (IoT) жүйелерінің қарқынды дамуы деректерді тікелей соңғы құрылғыларда тиімді өңдеу қажеттілігін арттырып отыр. Есептеу ресурстарының шектеулілігі, энергия тұтынудың төмен деңгейіне қойылатын талаптар және минималды уақыттық кідірістер сигналдарды өңдеудің оңтайландырылған әдістерін әзірлеудің өзектілігін көрсетеді. Мұндай жүйелерде шу жағдайында кеңжолақты сигналдарды анықтау және өңдеу мәселесі ерекше маңызға ие. Бұл зерттеудің мақсаты – шектеулі аппараттық ресурстарға ие IoT соңғы құрылғыларында қолдануға арналған цифрлық корреляциялық өңдеу және келісілген фильтрация әдістерін әзірлеу және талдау. Зерттеу міндеттеріне сигналдарды анықтау мен келісілген фильтрацияның қолданыстағы әдістерін талдау, есептеу күрделілігі төмен алгоритмдерді әзірлеу және олардың тиімділігін модельдеу арқылы бағалау кіреді. Зерттеу нәтижесінде есептеу операцияларын оңтайландыру мен нормализацияға негізделген цифрлық корреляциялық өңдеудің бейімделген әдісі ұсынылды. Өртүрлі формадағы сигналдар, соның ішінде тікбұрышты және кеңжолақты сигналдар, аддитивті шу жағдайында модельденді. Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің классикалық корреляциялық әдістермен салыстырғанда есептеу жүктемесін азайта отырып, сигналдарды сенімді анықтайтынын көрсетті. Қорытындылай келе, әзірленген әдістер IoT жүйелерінде, радиотехникалық және сенсорлық желілерде тиімді қолданылуы мүмкін. Зерттеу нәтижелері соңғы құрылғыларда цифрлық сигналдарды өңдеу саласындағы ғылыми білімді кеңейтіп, энергия үнемдейтін алгоритмдерді одан әрі дамытуға негіз қалайды.

Түйін сөздер: цифрлық сигналдарды өңдеу; келісілген фильтрация; сигналдарды анықтау; Интернет заттары; корреляциялық өңдеу; кеңжолақты сигналдар

Дәйексөздер үшін: Ж.Ж. Кожамкулова. IoT жүйесінің моделін және соңғы құрылғылардағы сигналдарды өңдеуді зерттеу // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 7–28 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОТ-СИСТЕМЫ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Ж.Ж. Кожамкулова

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы,
Казахстан.

E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz

Жадра Кожамкулова — PhD, ассоциированный профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан
E-mail: kozhamkulova.zhadra@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9780-9767>.

© Ж.Ж. Кожамкулова

Аннотация. В условиях активного развития систем Интернета вещей (IoT) возрастает необходимость эффективной обработки цифровых сигналов непосредственно на конечных устройствах. Ограниченные вычислительные ресурсы, энергопотребление и требования к минимальным временным задержкам делают актуальной задачу разработки адаптированных методов цифровой обработки сигналов, обеспечивающих высокую точность при сниженной вычислительной сложности. Особое значение в таких системах приобретает задача обнаружения и корреляционной обработки широкополосных сигналов в условиях шума. Целью данного исследования является разработка и анализ методов цифровой корреляционной обработки и согласованной фильтрации сигналов, ориентированных на применение в конечных IoT-устройствах с ограниченными аппаратными ресурсами. В рамках работы поставлены следующие задачи: анализ существующих методов согласованной фильтрации и обнаружения сигналов; разработка алгоритмов с пониженной вычислительной сложностью; моделирование сигналов и оценка эффективности предлагаемых решений. В результате исследования предложен адаптированный метод цифровой корреляционной обработки, основанный на нормализации и оптимизации вычислительных операций. Проведено моделирование обработки сигналов различной формы, включая прямоугольные и широкополосные сигналы, в присутствии аддитивного шума. Полученные результаты показали, что предложенный метод обеспечивает надежное обнаружение сигналов при снижении вычислительных затрат и минимальных временных задержках по сравнению с классическими методами корреляции. В заключение отмечается, что разработанные методы могут быть эффективно применены в системах IoT, радиотехнических и сенсорных сетях, обеспечивая баланс между точностью обработки и вычислительной эффективностью. Полученные результаты расширяют возможности практической реализации цифровой обработки сигналов на конечных устройствах и создают основу для дальнейших исследований в области энергоэффективных алгоритмов обработки данных.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов; согласованная фильтрация; обнаружение сигналов; Интернет вещей; корреляционная обработка; широкополосные сигналы

Для цитирования: Ж.Ж. Кожамкулова. Моделирование IoT-системы и обработка сигналов на конечных устройствах // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 22. No. 89. Стр. 7–28. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.001>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие технологий Интернета вещей (IoT) в последние годы значительно расширило возможности мониторинга, управления и анализа физических процессов в промышленности, транспорте, умных городах и других прикладных областях. Основными элементами IoT-систем являются конечные устройства, состоящие из сенсоров, процессоров и коммуникационных модулей, обеспечивающие сбор, обработку и передачу данных. Несмотря на активное внедрение IoT, в научной литературе отмечается

недостаточная проработанность методов цифровой обработки сигналов непосредственно на конечных устройствах, ограниченных по вычислительным ресурсам и энергопотреблению.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности обработки данных на конечных IoT-устройствах при сохранении минимального объема передаваемой информации и обеспечения высокой точности детектирования событий. Существующие подходы, применяемые в радиолокации и гидроакустике, такие как согласованная фильтрация, обеспечивают оптимальное отношение сигнал/шум, но требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их прямое применение в IoT-устройствах.

Объект исследования — IoT-система, включающая сенсоры, процессоры и коммуникационные модули, осуществляющая сбор, обработку и передачу данных. Предмет исследования — методы цифровой корреляционной обработки сигналов на конечных IoT-устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Цель исследования — разработка эффективного метода цифровой обработки сигналов для детектирования событий различной формы на конечных IoT-устройствах с минимизацией объема передаваемых данных и задержки обработки.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- Провести анализ существующих методов корреляционной обработки сигналов и их применимости для IoT-устройств.

- Определить вычислительную сложность традиционных алгоритмов и предложить подходы к снижению объема вычислений.

- Разработать алгоритм нормализованной взаимной корреляции, адаптированный для работы на конечных устройствах с ограниченной разрядностью и частотой тактов.

- Смоделировать работу алгоритма на цифровой последовательности данных с различными типами сигналов и определить эффективность детектирования.

- Определить пороговые значения для эффективного разделения событий и минимизации ложных тревог.

Методы и подходы исследования включают аналитический обзор существующих алгоритмов цифровой обработки сигналов, математическое моделирование взаимной корреляционной функции, методы кусочно-линейной аппроксимации сигналов, а также моделирование алгоритмов на платформе MATLAB с использованием псевдослучайных цифровых последовательностей.

Гипотеза исследования состоит в том, что применение адаптированного метода согласованной фильтрации с нормализацией и упрощением вычислительных операций позволяет реализовать эффективное детектирование сигналов различной формы непосредственно на конечных IoT-устройствах, обеспечивая минимальную задержку и сокращение объема передаваемых данных.

Результаты исследования имеют теоретическую значимость, так как дополняют существующие представления о цифровой обработке сигналов в ограниченных вычислительных средах, и практическую ценность, так как могут быть использованы в разработке промышленных, транспортных и умных городских систем, требующих высокой точности измерений при минимальных ресурсах конечного устройства.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются конечные устройства Интернета вещей (IoT), включающие сенсоры, процессоры и коммуникационные модули, осуществляющие сбор, цифровую обработку и передачу данных.

Качественная характеристика материалов:

- Сенсоры — устройства, измеряющие физические величины (температура, вибрация, давление и др.) с последующим преобразованием сигнала в цифровую форму;

- Процессоры — микроконтроллеры (MCU), цифровые сигнальные процессоры

(DSP) и программируемые логические интегральные схемы (FPGA);

- Коммуникационные модули — беспроводные (Wi-Fi, ZigBee, LoRa) и проводные интерфейсы передачи данных;

- Данные — цифровые последовательности отсчетов (8–16 бит), имитирующие реальные измерения с сенсоров; включают сигналы треугольной и прямоугольной формы, а также случайные шумовые компоненты.

Количественная характеристика:

- Длина моделируемых цифровых последовательностей данных — до 10^7 отсчетов;

- Разрядность сигналов — 8 бит;

- Частота дискретизации — определяемая параметрами АЦП, $SR = 1–10$ кГц (в зависимости от типа сенсора и требуемой точности);

- Объем моделируемого трафика на конечном устройстве — до десятков тысяч отсчетов в секунду.

- Используемые материалы позволили воспроизвести реальные условия работы IoT-устройств и оценить эффективность предложенного метода цифровой корреляционной обработки сигналов.

Вопросы исследования:

Насколько эффективен метод согласованной фильтрации при реализации на конечных IoT-устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами?

- Как влияют тип и форма сигналов на показатели корреляции и вероятность правильного детектирования событий?

- Каким образом можно снизить вычислительную сложность алгоритмов корреляционной обработки без потери точности?

- Какое пороговое значение корреляции (ТН) обеспечивает оптимальное разделение событий и минимизацию ложных тревог?

Гипотеза исследования: адаптированный метод цифровой согласованной фильтрации с нормализацией и упрощенными вычислительными операциями позволяет реализовать эффективное детектирование сигналов различной формы на конечных IoT-устройствах, обеспечивая минимальное количество передаваемых данных и задержку обработки, даже при ограниченной вычислительной мощности процессора.

Этапы исследования:

Аналитический этап: изучение существующих методов цифровой корреляционной обработки сигналов, их вычислительной сложности и применимости для IoT-устройств.

- Разработка алгоритма: создание адаптированной модели цифровой корреляционной обработки, включающей нормализацию и упрощенные вычислительные операции для конечного устройства.

- Моделирование данных: генерация псевдослучайных цифровых последовательностей с включением сигналов различной формы (треугольной и прямоугольной) и шумовых компонентов.

- Реализация алгоритма: программная реализация предложенного метода на платформе MATLAB для моделирования работы на конечном устройстве.

- Анализ результатов: вычисление взаимной корреляции, определение максимального значения сигнала, проверка порогового значения ТН и оценка эффективности детектирования.

Сравнительный анализ: оценка вычислительной сложности предложенного метода по сравнению с методами прямой корреляции, подапертур и кодовых скользящих сумм.

Следующие методы исследования были использованы в статье:

- Цифровая корреляционная обработка сигналов: использование нормализованной взаимной корреляционной функции для детектирования событий различной формы.

- Методы математического моделирования: генерация цифровых последовательностей, аппроксимация сигналов кусочно-линейными формами и

вычисление корреляции с учетом задержки.

- Компьютерное моделирование: реализация алгоритмов на MATLAB, оценка максимальных значений корреляции и эффективности пороговой фильтрации.

- Сравнительный анализ: анализ вычислительной сложности алгоритмов прямой корреляции, подапертур и кодовых скользящих сумм; расчет числа операций для различных длин последовательностей N.

- Аппаратная оценка: обсуждение применения MCU, DSP и FPGA для реализации предложенного метода с точки зрения вычислительных возможностей и задержки.

Научная новизна статьи состоит в следующем:

- Предложен адаптированный метод цифровой согласованной фильтрации, оптимизированный для конечных IoT-устройств с ограниченными ресурсами;

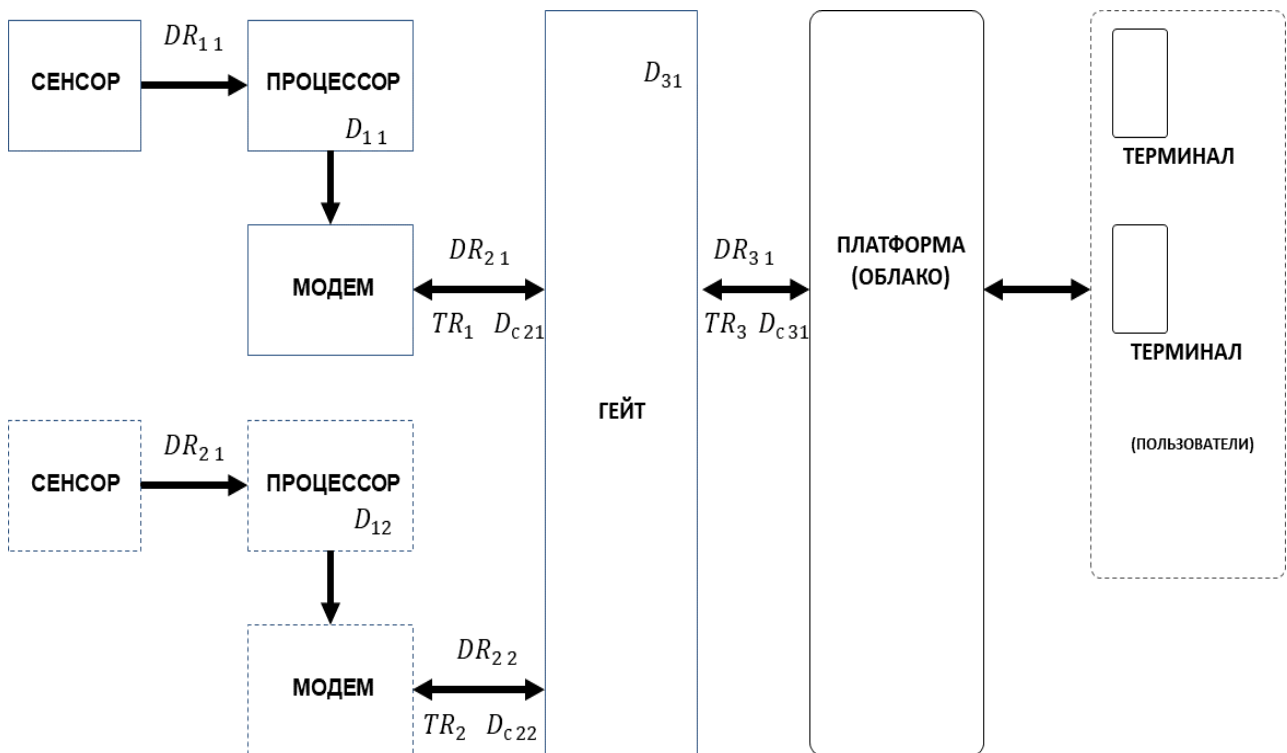
- Разработан алгоритм нормализации и упрощения вычислительных операций (исключение операции квадратного корня и замена деления на усечение младших разрядов), позволяющий снижать задержку обработки;

- Проведена комплексная оценка эффективности детектирования сигналов различной формы с учетом ограничений частоты дискретизации и разрядности АЦП;

- Обоснована практическая применимость метода для промышленного мониторинга, умных автомобилей и умных городов с высокоскоростным потоком данных.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим модель системы Интернета вещей с точки зрения базовых устройств, осуществляющих передачу, прием и обработку данных, а также ключевых характеристик. Предполагается, что вся обработка данных осуществляется в цифровом, а не аналоговом виде, то есть даже при передаче данных от сенсоров к процессору мы оперируем отсчетами определенной разрядности.



DR – скорость потока данных,
TR – пропускная способность канала связи,
D – задержка связанная с обработкой данных

Рис. 1. Модель IoT-системы, с учетом устройств обработки

Сенсор, процессор и модем образуют конечное устройство (модуль). Определим ключевые параметры, связанные с передачей данных (Anufrienko, 2022: 3–8).

DR	Скорость потока данных, бит/с (байт/с)
TR	Пропускная способность канала связи, бит/с (байт/с)
D	Задержка. Данный параметр может выражаться как в количестве тактов, либо в секундах (мкс).

Для первого модуля:

DR_{11} — это скорость потока данных от сенсора к процессору.

D_{11} — задержка, связанная с обработкой процессором потока данных.

DR_{21} — это скорость потока данных между модемом и гейтом,

TR_1 — соответствующая пропускная способность канала связи между модемом и гейтом. Аналогичные параметры (DR_{31} ; TR_3 ; D_3) применяются к каналу «гейт - облако».

В общем случае:

$TR_1 \leq TR_3$;

$TR_1 \geq M * DR_{21}$, где $M < 1$.

Данная модель позволяет оперировать задержками для всех методов обработки сигналов и доставки информации от сенсоров в облако. Далее рассмотрим подходы к корреляционной обработке сигналов, чтобы далее проанализировать подход цифровой обработки на конечном устройстве Интернета вещей, работающем в составе IoT-системы.

Перейдем к анализу существующих подходов к корреляционной обработке сигналов, чтобы в дальнейшем рассмотреть комплексный подход обработки на конечном устройстве в составе IoT-системы.

В радиотехнике корреляция активно используется в радиолокации и гидроакустике для детектирования и идентификации сигналов в шуме. Для увеличения разрешающей способности по дальности при сохранении импульсной мощности широко применяются сигналы относительно большой длительности с внутриимпульсной модуляцией (Рабинер, 1978: 234–399). В радиолокации в качестве широкополосных сигналов в основном используют линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) сигналы и сигналы с фазовокодовой манипуляцией (ФКМ) на основе кодов Баркера n -й длины. В настоящее время для согласованной фильтрации в частотной области широко используют алгоритм быстрого преобразования Фурье (Блейхут, 1989: 186–287), очевидным недостатком которого является существенная конвейерная задержка выдачи результата обработки, связанная с необходимостью вычисления быстрого преобразования Фурье (БПФ) и обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ).

Для корреляционной обработки используется согласованный фильтр (СФ), который максимизирует отношение сигнал/шум (S/N) на выходе. Выбор в качестве критерия оптимальности максимального отношения сигнал/шум на выходе фильтра определяет импульсную характеристику этого фильтра. Импульсная характеристика фильтра, обеспечивающего на выходе в момент времени t_0 максимум отношения S/N является зеркальным отражением сигнала, сдвинутым на t_0 (Ламанов, 2015:57–98). Сигнал на выходе СФ определяется выражением:

$$y(t) = \int_0^T S(t)h(t - \tau)d\tau, \quad (1)$$

где $S(t) = S_1(t) + q(t)$, τ – задержка, а $q(t)$ – шумовой компонент.

Импульсная характеристика согласованного фильтра выражается как:

$$h(t) \propto S_i(T - t) \quad (2)$$

где c – константа, $S_i(t)$ – входной сигнал, определенный следующим образом:

$$S_i(t) = \begin{cases} S_i(t), & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & T < t < 0. \end{cases} \quad (3)$$

, а T – момент времени дискретизации.

При нулевой задержке имеем автокорреляционную функцию сигнала с его локальной копией:

$$y(t) = \int_0^T S_1^2(t) dt = r_{11}(0) \quad (4)$$

В работе (Ламанов, 2015:57–98) показано, что условную вероятность правильного обнаружения (вероятность превышения порога $y_0 = k_0 z_0$ при наличии сигнала) для СФ можно определить как:

$$W_{п.о.} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(v_0)] = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0 - qs_0)], \quad (5)$$

где $\Phi(v) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^v \exp(-\frac{v^2}{2}) dv$ – интеграл вероятности, у которого $\Phi(\infty) = 1$, а $\Phi(v) = -\Phi(-v)$, u_0 – относительный порог срабатывания, а qs_0 – отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра. Аналогично, выражение для расчета вероятности ложной тревоги:

$$W_{л.т.} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(u_0)], \quad (6)$$

Функции распределения плотности вероятностей показаны на Рисунке 2, где обозначен пороговый уровень y_0 .

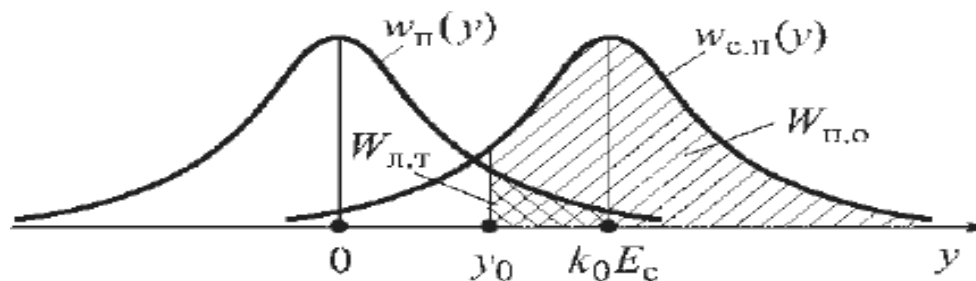


Рис. 2. Плотности распределения вероятностей

Чем выше пороговый уровень, тем меньше вероятность ложной тревоги $W_{л.т.}$, при этом одновременно снижается и вероятность правильного обнаружения $W_{п.о.}$.

Расчётные данные характеристик обнаружения, для полностью известного сигнала представлены на Рисунке 3, что позволяет определять необходимую величину отношения сигнал/шум на выходе оптимального обнаружителя, для заданной вероятности правильного обнаружения $W_{п.о.}$ (Ламанов, 2015: 57–98).

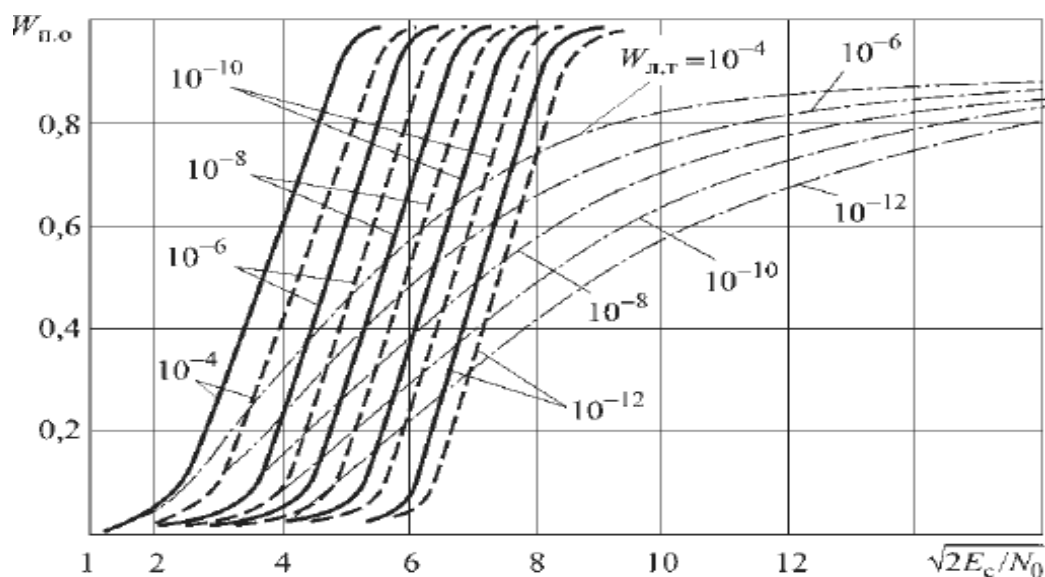


Рис. 3. Характеристики обнаружения сигналов: сплошная линия – для сигнала с полностью известными параметрами; штриховая – для сигнала с флуктуирующей амплитудой; штрихпунктирная – для сигналов с флуктуирующей амплитудой и случайной фазой

Согласованный фильтр реализует задачу вычисления функции взаимной корреляционной функции (ВКФ), между принимаемым и ожидаемым (опорным) сигналом. Следовательно, с точки зрения получения максимального отношения сигнал/шум, согласованный фильтр – это оптимальное устройство обработки сигналов (Ламанов, 2015: 57–98; Шахтарин, 2015: 233–578; Федоров, 2011: 566–785; Сизых, 2017: 203–338).

Цифровой согласованный фильтр математически описывается следующей формулой:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) * x(n - k) \quad (7)$$

где N - длина импульсной характеристики согласованного фильтра. Достоинством метода является получение результатов фильтрации с задержкой равной длине N . Вычислительная сложность пропорциональна N^2 .

Возможно ускорение вычисления корреляции путем использования теоремы о корреляции и вычисления БПФ и ОБПФ. Реализация будет быстрее, чем прямое вычисление корреляции, если число отсчетов превышает 128 (Ifeachor, 2001: 184–245). Тогда система реализует вычисление $r_{12}(j)$, которое выражается как:

$$r_{12}(j) = F_D^{-1}[F_1(k) F_2(k)] \quad (8)$$

На выходе системы имеем:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} q_1(n) A q_2(n + \Delta n + j) \quad (9)$$

где Δn - временная задержка, A – коэффициент затухания (по умолчанию $A=1$). Так как сигналы $q_1(n)$ и $q_2(n)$ случайные, то максимальный выигрыш будет достигнут когда сигналы идут в фазе, что происходит при $j = -\Delta n$

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} q_1^2(n) \quad (10)$$

что эквивалентно средней мощности. Блок-схема реализующая вычисление представлена на Рисунке 4.

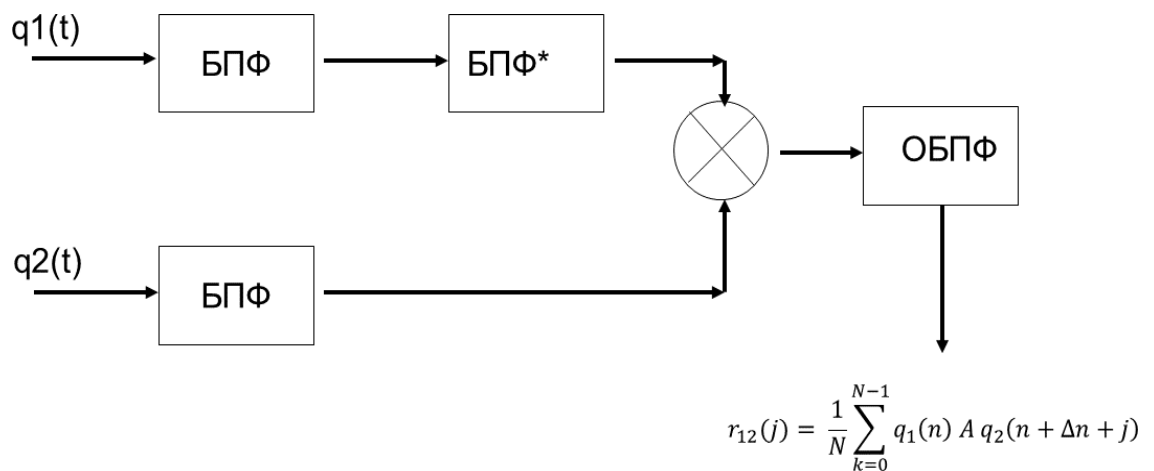


Рис. 4. Блок-схема вычисления корреляции с использованием БПФ

Как видно из рисунка, необходимо для каждого сигнала производить операцию БПФ, далее свертки и обратного преобразования Фурье. Недостатком данной схемы при вычислении БПФ и ОБПФ является существенная конвейерная задержка выдачи результата обработки, пропорциональная базе сигнала.

В работе (Янаков, 2010: 478–481) предлагаются способы согласованной фильтрации методом подапертур и методом кодовых скользящих сумм. Метод кодовых скользящих сумм предназначен для фазово-кодированных (ФКМ)-сигналов, а метод подапертур для линейно-частотно модулированных (ЛЧМ). Количество операций для СФ методом кодовых скользящих сумм составляет $4\sqrt{N}$, а для метода подапертур - \sqrt{N} , соответственно.

Реализация метода подапертур требует двойной линии задержки, в противном случае N выбирается так чтобы число подапертур изменилось на угол кратный π (Янаков, 2010: 478–481), что требует специальной подготовки и группирования потока входных данных, а также рекурсивных операций. Результатом является задержка выдачи итогового значения. Результаты, приводимые в данной работе справедливы для применения реализации алгоритмов на базе специализированных микропроцессоров, но не для иных аппаратных архитектур.

IoT — устройства являются относительно маломощными с точки зрения вычислительных возможностей и энергетики, по сравнению с радиолокационными

станциями. Что, из соображений эффективности не позволяет реализовывать сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, требующие большого количества вычислительных операций, в частности БПФ, ОБПФ для последовательностей 64, 128, 256, 512, 1024 и более символов.

Сравнительный анализ количества операций на основе расчета, для метода кодовых скользящих (МКС), метода подапертур (МПА), прямого метода с обычным делением (*МПр) и прямого метода с делением усечением (МПр), в зависимости от длины N представлена в Таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение оценочного количества вычислительных операций для различных методов, в зависимости от длины N

N	0	2	4	8	16	32	64	128	256	512
МКС	0	6	8	12	16	23	32	46	64	91
МПА	0	3	3	4	4	5	6	7	8	10
*МПр	0	4	16	64	256	1024	4096	16384	65536	262144
МПр	0	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

При этом кажущаяся вычислительная сложность прямого метода обработки, по сравнению с другими, исходя из количества операций, обманчива. Для прямого метода, при N пропорциональном 2^n , количество операций соответствует не N^2 , а $2N$, за счет замены классической операции деления, отсечением младших разрядов. Для метода кодовых скользящих и метода подапертур оценка количества операций справедлива при $N \geq 64$, в противном случае, ресурсы, затрачиваемые на обеспечение функционирования алгоритма значительно превышают ценность достигаемого эффекта (Ануфриенко, 2021: 40–45).

Вышеперечисленные факты, говорящие о сложности с одной стороны, и преимущества ряда характеристик с другой стороны, подчеркивают необходимость разработки нового метода и алгоритмов для устройств Интернета вещей. В связи с чем рассмотрим корреляционную функцию подробнее.

Выражение для взаимной корреляции $r_{12}(n)$ двух последовательностей данных $x_1(n)$ и $x_2(n)$ содержащих N отсчетов можно записать как:

$$r_{12} = \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n) \quad (11)$$

Однако, такое соотношение даст результат, зависящий от числа отсчетов. Соответственно, требуется нормирование относительно числа отсчетов N. Таким образом, нормированное выражение примет вид:

$$r_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n) \quad (12)$$

Так как последовательности данных $x_1(n)$ и $x_2(n)$ смещаются друг относительно друга необходимо вводить задержку. Поэтому взаимная корреляционная функция между двумя цифровыми последовательностями, каждая из которых содержит N данных и нормирована на число отсчетов, может быть записана в виде:

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) * x_2(n+j) \quad (13)$$

где корреляция должна быть рассчитана с задержкой пропорциональной базе сигнала. В случае, когда $x_1(n) = x_2(n)$, процесс больше известен как автокорреляционная функция и может быть записан в виде:

$$r_{11}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) = E \quad (14)$$

где E – энергия сигнала.

Значения взаимной корреляции, вычисленные в соответствии с приведенными выше уравнениями, зависят от абсолютных значений данных. Значения коэффициента кросс-корреляции обычно находится в фиксированном диапазоне значений $[-1; +1]$, в случае наличия в области диапазона входных данных отрицательных значений. Где “-1” означает отсутствие совпадений, а “+1” — это полное совпадение (100 % корреляция). Если же область значений положительная, то значения коэффициента кросс-корреляции будут находится диапазоне $[0; +1]$.

Необходимо осуществлять нормализацию значений на величину, зависящую от энергии (амплитуды) сигнала. И нормализованное выражение для r_{12} примет вид:

$$\rho_{12}(j) = \frac{r_{12}(j)}{\frac{1}{N} \sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) * \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n) \right]}} \quad (15)$$

Вычислительная сложность знаменателя выражения (15) относительно высока и требует больших вычислительных ресурсов и задержки. Особенно для операции деления и извлечения квадратного корня.

Количество тактов задержки при операции квадратного корня зависит от разрядности и составляет $\log_2(K) - 1$. То есть для 8-бит, количество тактов задержки составит 7. Данный факт означает, что для синхронного вычисления квадратного корня при наличии потоковой обработки данных, тактовая частота модуля расчета квадратного корня должна быть в 4 раза выше тактовой частоты системы, что требует либо дополнительного тактового входа, либо PLL. Для операции деления, задержка также зависит от разрядности и может составлять от $\log_2(K) / 2$ до $\log_2(K) - 1$.

С учетом того, что для обозначенных выше граничных условий выполняется неравенство:

$$\sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) \geq \sum_{n=0}^{N-1} x_2^2(n) \quad (16)$$

Так как знаменатель необходим как коэффициент нормировки, то его величина не должна приводить к возникновению ситуации, когда $\rho_{12} > 1$, обратная же ситуация допустима. Поэтому, в знаменателе выражения (15) $x_2(n)$ можно заменить на $x_1(n)$.

И в итоге знаменатель выражения (15) примет вид:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1^2(n) = const \quad (17)$$

Таким образом, благодаря сделанным допущениям, можно избежать операции по извлечению квадратного корня. Дополнительное допущение, связанное с приведением итогового значения знаменателя к числу эквивалентному 2^n , позволит заменить операцию классического деления на усечение младших разрядов. Данная операция потребует либо всего лишь одного дополнительного такта, либо может быть выполнена одновременно с другой операцией.

В приложениях для Интернета вещей (Промышленные, Умные автомобили, Умный город, Транспорт), в процессе измерений параметров систем, при тестировании или в режимах эксплуатации используются большое количество групп датчиков на изделиях, генерирующих данные. Как уже упоминалось, не все данные должны передаваться и накапливаться с целью хранения и дальнейшей обработки. Пример промышленного применения показан на Рисунке 5. Представлен авиадвигатель в режиме проведения испытаний с набором сенсоров, передающих данные в соответствующий центр сбора данных.

Для точного анализа соответствия параметров наиболее важна информация о поведении узлов и агрегатов на критических и закритических режимах, особенно в процессе тестирования и испытаний. Именно для таких режимов актуально снятие показаний с максимально короткими интервалами (высокой частотой дискретизации SR). Активно развивающаяся тематика систем предиктивной аналитики позволяет строить прогнозные модели на основе измеренных данных. Соответственно, чем более точные результаты измерений, тем выше точность моделей.

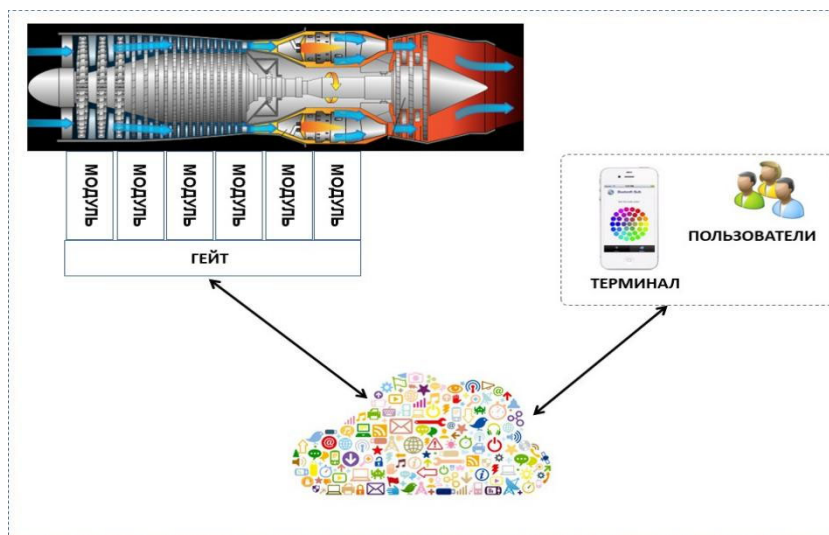


Рис. 5. Типовая тестовая схема с высокоскоростным потоком данных

Следовательно, для предлагаемого метода, необходимо увеличивать частоту дискретизации SR, для исключения пропуска сигналов, представляющих прикладной интерес для анализа.

Пример пропуска и детектирования события в зависимости от частоты дискретизации описан на Рисунках 6. а) и б) (Anufrienko, 2020: 21–31). В цифровой обработке сигналов также наблюдается тренд на повышение частоты дискретизации, причем речь идет как о частоте дискретизации при аналогово-цифровом преобразовании

F_S , так и частоте SR, то есть при работе с отсчетами данных из уже оцифрованной последовательности данных.

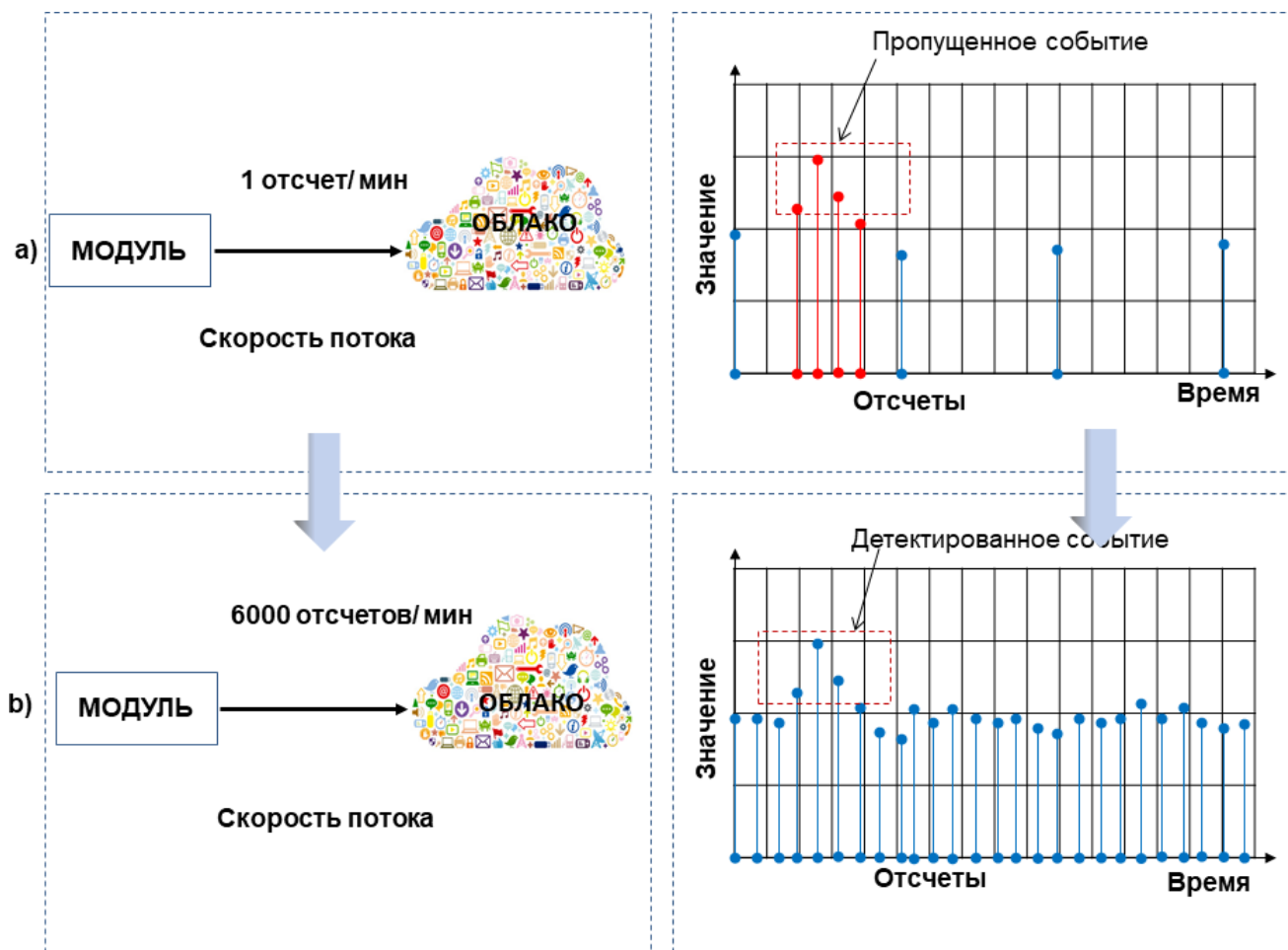


Рис. 6. а) Пропущенное событие при низкой скорости потока и б) Выявленное событие при высокой скорости потока

На практике недостаточно определять, что поступивший от датчика сигнал, например, значение температуры, больше или меньше predetermined (ожидаемого) значения. Важно получить информацию о тренде – восходящий, нисходящий, скорость нарастания или спада. Поэтому, простые пороговые методы (Thresholding) не подходят для решения существующих задач, несмотря на простоту реализации на любых аппаратных платформах.

Для описания сигналов воспользуемся методом кусочно-линейной аппроксимации. Огибающую участка сигнала заменим линиями с определенным наклоном к оси абсцисс. Определим следующие формы сигналов для аппроксимации (Рис. 7):

$S_1[n]$: треугольная 45 градусов – средняя скорость нарастания сигнала;

$S_2[n]$: прямоугольная – высокая скорость нарастания и спада фронта

сигнала;

$S_3[n]$: треугольная 30 градусов – медленная скорость нарастания сигнала.

Согласно (Шахтарин, 2015: 233–578), форма сигнала не оказывает влияния на характеристики обнаружения.

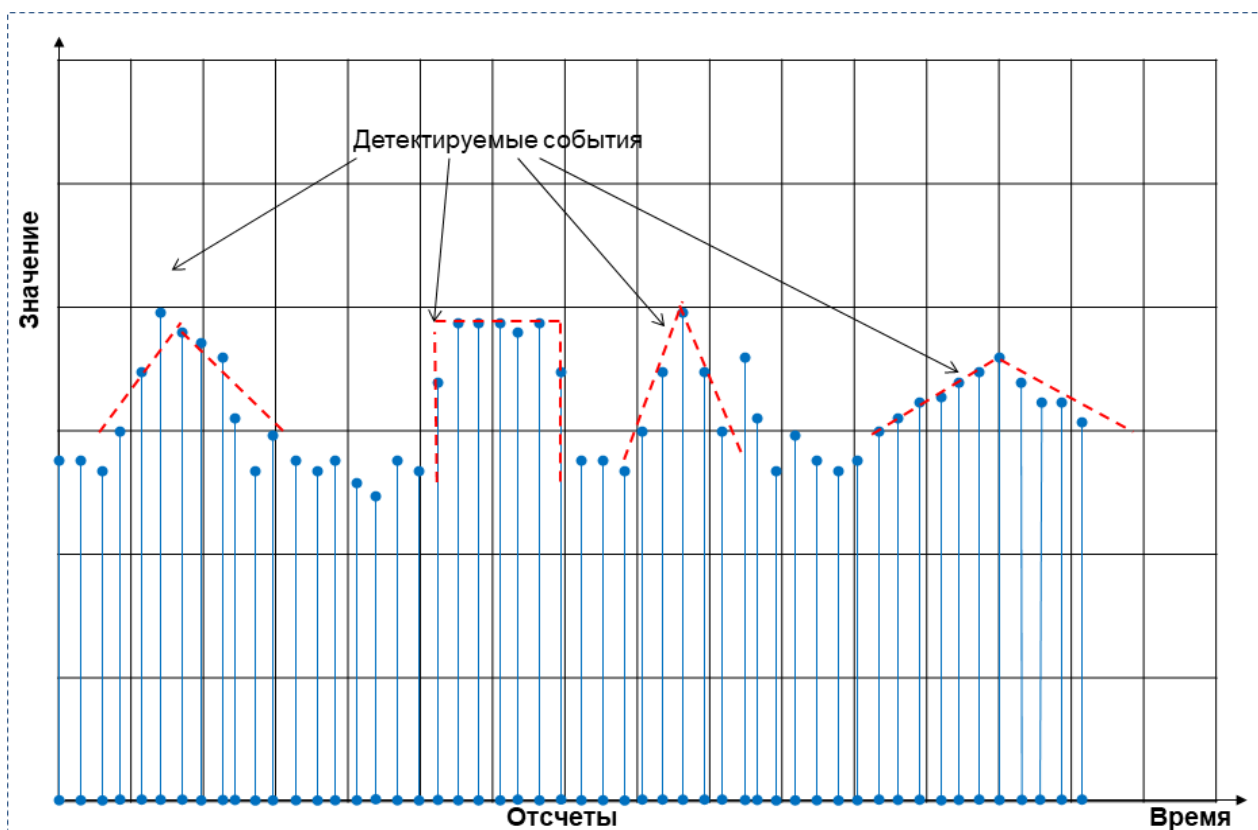


Рис. 7. Пример событий, подлежащих детектированию

С учетом того, что мы оперируем оцифрованным сигналом, в отличие от классического представления аналогового сигнала в аналитическом виде, в случае цифрового представления сигнала достаточно определить количество отсчетов, соответствующих длине N , и их значения. Определим среднее значение сигнала для длины последовательности X_0

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} x[n] \quad (18)$$

для определения порогового уровня постоянной составляющей. Тогда в установившемся режиме $A_0 = \bar{x}$.

Определим следующие условия:

Таблица 2 – Начальные условия для реализации

1) Диапазон значений отсчетов входного потока данных $[0; K-1]$, где $K = 256; 1024; 16384$, определяется параметрами АЦП.
2) Среднее значение сигнала $A_0 = \bar{x}$, при длине последовательности X_0 ;
3) $[0 < A_0 \leq K-1]$;
4) $[A_0 < S_1[n] \leq K-1]$;
5) $[A_0 < S_2[n] \leq K-1]$;
6) $[A_0 < S_3[n] \leq K-1]$;
7) Частота дискретизации SR , определяется параметрами АЦП.

Схема, которую необходимо в общем случае реализовать на конечном устройстве в соответствии с выражением (15) представлена на Рисунке 8, где $x_1(n)$ – опорный сигнал, а $x_2(n)$ – входная последовательность.



Рис. 8. Блок-схема корреляционной обработки, реализуемой для конечного IoT устройства

Типовая архитектура конечного IoT автономного устройства представлена на Рисунке 9 и включает в себя сенсор (датчик); беспроводной (проводной) модем, включающий в свою очередь, процессор, элемент питания и актуатор реализующий управляющие воздействия.

Как правило, существующие процессоры IoT устройства основаны на архитектуре ARM, 8051 или иной, и предназначены для обеспечения реализации функции коммуникации (BaseBand), управления доступом к среде (MAC) и приложений (Application), то есть выполняют специализированную задачу и имеют тактовую частоту 10–20 МГц. И не подходят с точки зрения применения его как специализированного вычислительного узла.

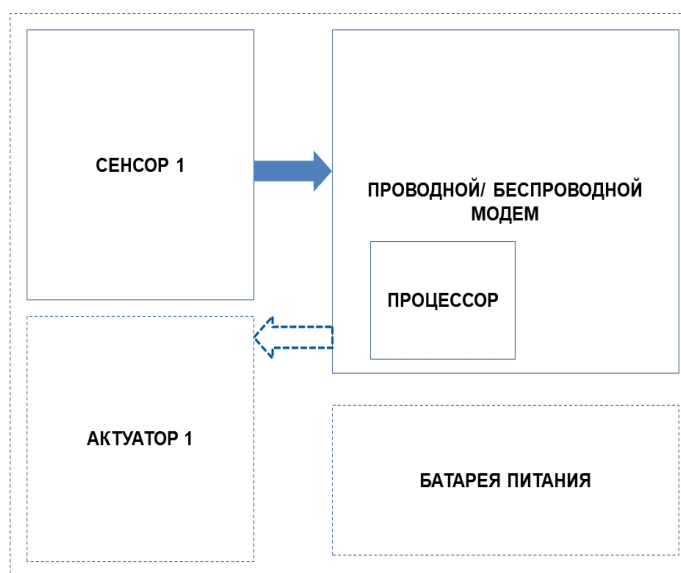


Рис. 9. Типовая блок-схема конечного IoT устройства

Именно поэтому авторы работ, рассмотренных ранее в Главе 1, ориентируются на Граничный и Облачный подходы, где вычисления реализуются на уровне гейтов и выше.

Предлагается следующая архитектура конечного устройства (Рис. 10).

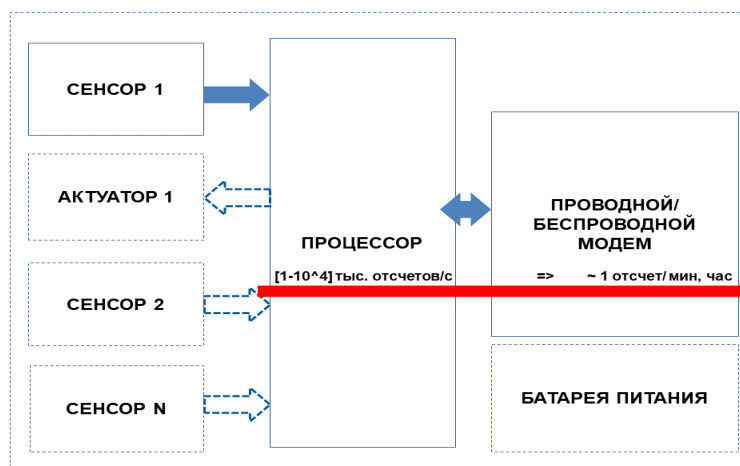


Рис. 10. Предлагаемая блок-схема конечного IoT устройства

Данная архитектура отличается от предыдущей архитектуры (Рис. 9) наличием отдельного процессора, предназначенного для корреляционной обработки. В качестве примера на рисунке показано, что функция процессора — это снижение объема передаваемых конечным устройством данных с десятков тысяч в секунду, до единиц отсчетов в минуту.

Существует несколько типов цифровых устройств, которые могут быть пригодны для задач прототипирования и реализации согласованной фильтрации — это микроконтроллеры (MCU), цифровые сигнальные процессоры (DSP) и программируемые логические интегральные схемы (FPGA). Потенциальное удобство микроконтроллерных устройств заключается в том, что они имеют встроенные датчики и аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), но тактовая частота и разрядность работы как самого микроконтроллера, так и входящих в него элементов ограничены.

Микроконтроллеры и цифровые сигнальные процессоры выполняют операции последовательно, поэтому в случае необходимости обработки большого количества параллельных потоков, потребуется соответствующее параллельное количество обращений к памяти и регистрам, и задержка обработки сигнала от момента поступления на вход устройство до выхода будет значительной. Вплоть до невозможности реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов. Поэтому, DSP и MCU имеют очень ограниченный потенциал применения для предлагаемого метода.

FPGA устройства представляют собой оптимальный вариант для быстрой параллельной обработки в случае согласованного фильтра и инвариантны к скорости потока (частоте дискретизации SR). ASIC (специализированные интегральные микросхемы) особенно перспективны в случае реализации системы на кристалле (SoC), включающей в себя датчик(и) и процессор. При массовом производстве данная связка обеспечит низкую итоговую себестоимость SoC.

Определим количество отсчетов в опорной последовательности $x_1[n] = 8$, соответственно $N = 8$. С учетом ранее определенных условий в Таблице 2, блок-схема алгоритма выглядит следующим образом (Рис. 11).

В качестве среды для моделирования был использован MATLAB. В первую очередь была сгенерирована псевдослучайная последовательность чисел в диапазоне [25...35], размерность массива данных = 1 млн. отсчетов. Разрядность отсчета = 8-бит (int8). Необходимо заметить, что моделирование проводилось для длин последовательности потока данных $x_2[n]$ вплоть до 10 млн. символов. Для наглядности представления результатов, длина последовательности $x_2[n]$ уменьшена до 200 отсчетов.

В сгенерированную последовательность были добавлены всплески - треугольная $S_1[n]$, прямоугольная $S_2[n]$ и $S_3[n]$, длиной 8 отсчетов, а также ряд аналогичных событий

(всплесков) в районе 130, 165 и 185 отсчетов треугольной формы различной крутизны и амплитуды. С практической точки зрения, количество отсчетов в аномальных всплесках зависит от частоты дискретизации SR. Таким образом, были определены две опорные последовательности $x_1[n]$ для сигналов треугольной формы и прямоугольной.



Рис. 11. Алгоритм корреляционной обработки

Результаты моделирования в соответствии с вышеописанным алгоритмом демонстрируются на Рисунке 12. Для наглядности приводятся значения корреляции ρ_{12} до компаратора, то есть до реализации отсечки на основе порогового значения TH.

Передача финального значения ρ_{12} в модем, при превышении уровня TH, должна производиться вместе с соответствующим элементом последовательности $x_2[n]$.

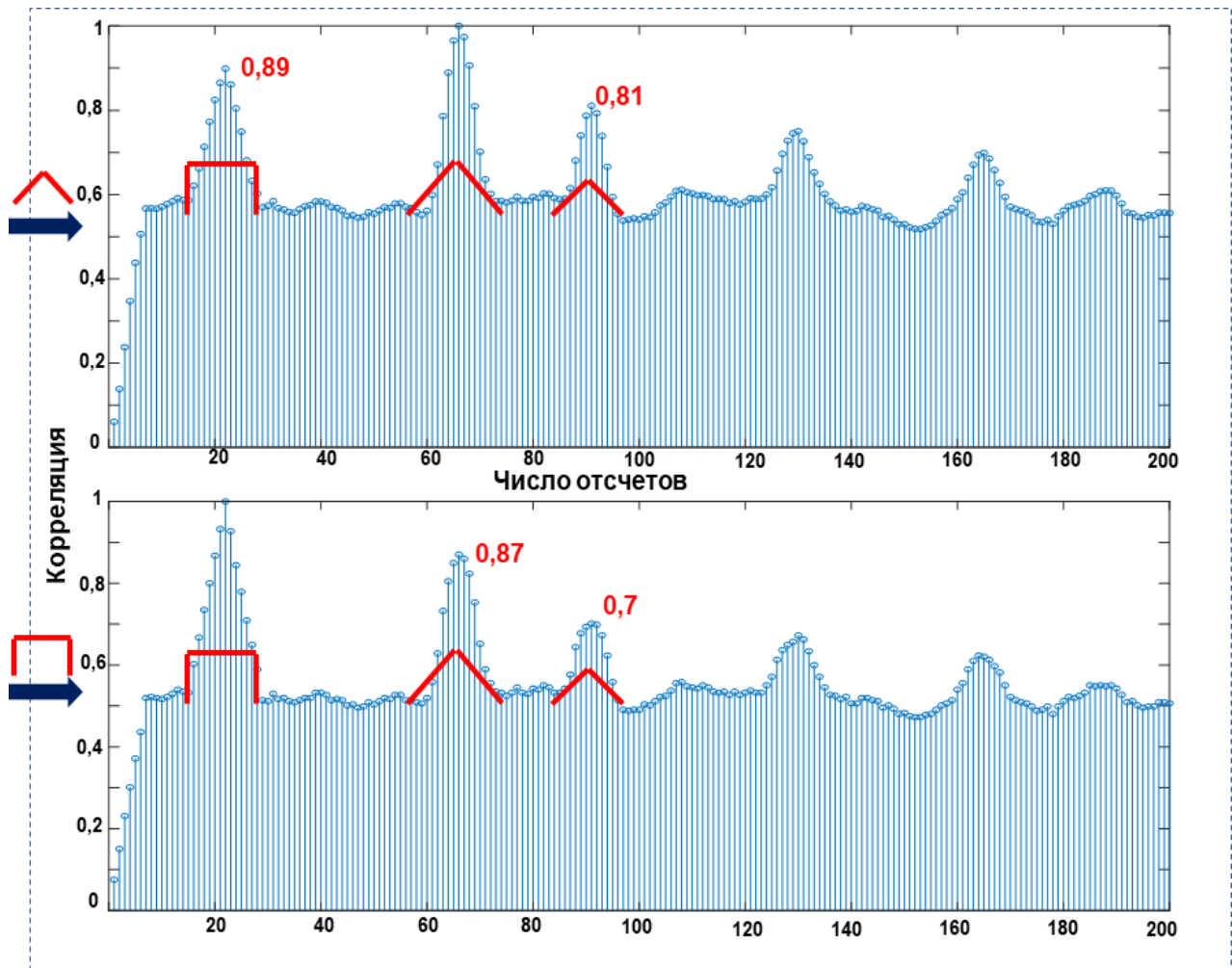


Рис. 12. Значения корреляции для различных типов сигналов. а) сверху – для опорного сигнала треугольной формы б) снизу - для опорного сигнала прямоугольной формы.

Как видно из Рисунка 12, при опорной последовательности $x_1[n]$ треугольной формы максимальное значение корреляции при наличии в потоке данных события прямоугольной формы $S_2[n]$ $\rho_{12} = 0.89$, при наличии события треугольной формы типа $S_1[n]$ максимальное значение корреляции $\rho_{12} = 1$, а для треугольной формы типа $S_3[n]$ $\rho_{12} = 0.81$.

В случае опорного сигнала $x_1[n]$ прямоугольной формы и аналогичной последовательности потока данных (Рис. 13), ситуация меняется и уже для события прямоугольной формы $S_2[n]$ значение корреляции $\rho_{12} = 1$, а для остальных событий – 0,87 и 0,7 соответственно.

Кроме того, на Рисунках 12-13 присутствуют всплески в области 130, 165 и 185 отсчетов. Но для опорной последовательности прямоугольной формы максимальные значения корреляции меньше чем для опорной последовательности треугольной формы.

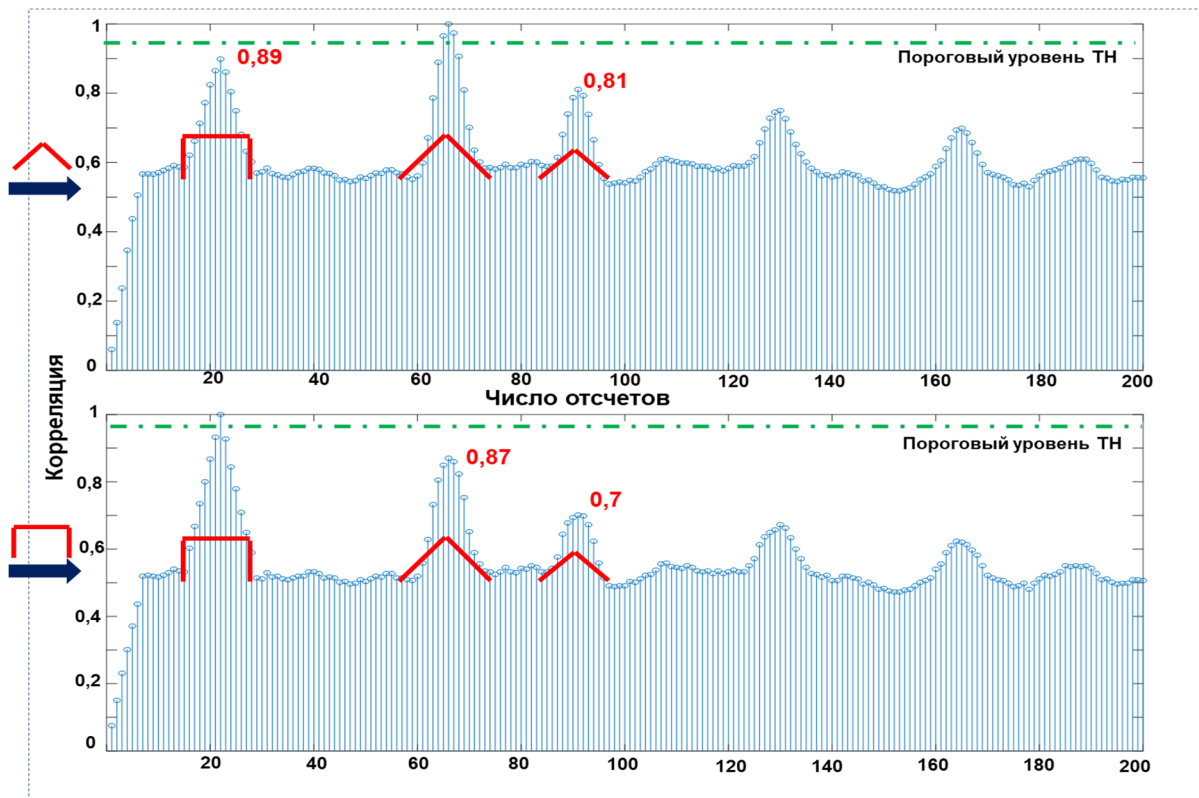


Рис. 13. Пороговый уровень ТН для значений корреляции для различных типов сигналов. а) сверху – для опорного сигнала треугольной формы б) снизу - для опорного сигнала прямоугольной формы.

Как упоминалось ранее, с точки зрения получения максимального отношения сигнал/шум, согласованный фильтр – это оптимальное устройство обработки сигналов (Ламанов, 2015:57–98).

Таким образом, можно утверждать, что по критерию максимального отношения сигнал/шум использование адаптированного для IoT устройств, метода согласованной фильтрации позволяет решать задачу детектирования сигналов (событий) различной формы при реализации на дискретных конечных устройствах, что продемонстрировано результатами моделирования.

Для эффективной работы алгоритма необходимо определить пороговое значение ТН. Для приведенных условий, при уровне ТН = 0.9 достигается эффективное разделение.

Итоговое значения знаменателя приводится к числу эквивалентному степени 2, операцию деления выполняется за счет усечения младших разрядов. Как упоминалось ранее данная операция потребует либо всего лишь одного дополнительного такта, либо может быть выполнена одновременно с другой операцией.

Заключение

В рамках проведенного исследования были реализованы поставленные цели и методы, направленные на изучение эффективности цифровой корреляционной обработки сигналов на конечных устройствах Интернета вещей (IoT). Основной задачей являлось создание адаптированного метода согласованной фильтрации, способного эффективно работать при ограниченных вычислительных ресурсах и обеспечивать надежное детектирование сигналов различной формы.

В ходе исследования выполнены следующие этапы: проведен анализ существующих методов цифровой обработки сигналов; разработан алгоритм адаптированной цифровой корреляционной фильтрации с нормализацией и упрощенными вычислительными операциями; смоделированы цифровые последовательности данных, имитирующие работу

сенсоров; реализован алгоритм на платформе MATLAB и оценена его эффективность с точки зрения точности детектирования и вычислительной сложности.

Полученные результаты подтвердили истинность выдвинутой гипотезы: предложенный метод позволяет с высокой точностью выявлять сигналы различной формы, снижая количество вычислительных операций и минимизируя задержку обработки. Сравнительный анализ показал преимущество предложенного подхода по сравнению с методами прямой корреляции, подапертур и кодовых скользящих сумм, особенно для устройств с ограниченной вычислительной мощностью.

Выводы исследования можно обобщить следующим образом:

- Адаптированный метод цифровой корреляционной фильтрации обеспечивает надежное детектирование сигналов даже при ограниченных ресурсах конечных IoT-устройств.

- Использование нормализации и упрощенных вычислительных операций снижает вычислительную нагрузку без снижения точности обработки.

- Метод применим для анализа сигналов различной формы, включая треугольные, прямоугольные и шумовые сигналы, что расширяет его практическую применимость.

Перспективы дальнейшей работы включают:

- реализацию алгоритма на аппаратных платформах MCU, DSP и FPGA для промышленного тестирования;

- адаптацию метода для работы в реальном времени с потоками больших данных в системах умного города, промышленного мониторинга и умных транспортных систем;

- интеграцию с другими методами обработки данных для улучшения энергоэффективности и снижения объема передаваемой информации.

Таким образом, проведенное исследование расширяет научное знание в области цифровой обработки сигналов и IoT, демонстрируя возможности эффективной реализации алгоритмов корреляционной фильтрации на конечных устройствах с ограниченными ресурсами. Полученные результаты имеют практическую ценность для разработки интеллектуальных сенсорных систем, способных работать в условиях реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

Anufrienko, 2022 — Anufrienko A. Fast Data Processing by IoT Devices // In: Koucheryavy Y., Balandin S., Andreev S. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2021. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, Cham. — Vol. 13158. — 2022. — Pp. 3–8. [Eng.]

Ануфриенко, 2021 — Ануфриенко А.Ю. Оценка сложности реализации обработки данных на конечных IoT-устройствах // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2021. — № 10. — С. 40–45. [Russ.]

Anufrienko, 2020 — Anufrienko A. Methods for Reducing the Amount of Data Transmitted and Stored in IoT Systems // In: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, 20th International Conference, NEW2AN 2020, and 13th Conference, ruSMART 2020, St. Petersburg, Russia, Proceedings, — Springer. — August 26–28, 2020. — Part I. — Issue 12525. — P. 21–31. [Eng.]

Рабинер, 1978 — Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Ю.Н. Александрова. — М.: Мир. — 1978. — 848 с. [Russ.]

Блейхут, 1989 — Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. — М.: Мир. — 1989. — 448 с. [Russ.]

Ламанов, 2015 — Ламанов А.И., Нефедов С.И., Слукин Г.П. Введение в теорию радиолокации: учебное пособие. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2015. — 150 с. [Russ.]

Шахтарин, 2015 — Шахтарин Б.И. Обнаружение сигналов: учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., испр. — М.: Горячая линия – Телеком. — 2015. — 465 с. [Russ.]

Федоров, 2011 — Информационные технологии в радиотехнических системах: учебное пособие / Под ред. И.Б. Федорова. — 3-е изд. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2011. — 848 с. [Russ.]

Сизых, 2017 — Случайные процессы. Примеры и задачи. Том 4 – Оптимальное обнаружение сигналов: учебное пособие для вузов / Под ред. В.В. Сизых, В.И. Тихонова, Б.И. Шахтарина. — 2-е изд., испр. — М.: — 2017. — 400 с. [Russ.]

Ifeachor, 2001 — Ifeachor E., Jervis B. Digital Signal Processing: A Practical Approach. — 2nd ed. — Hardcover. — USA: Prentice Hall. — 2001. — Pp. 184–245. [Eng.]

Янаков, 2010 — Янаков Е.С. Методы согласованной фильтрации широкополосных сигналов с минимальными временными задержками // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). — 2010. — № 1. — С. 478–481. [Russ.]

REFERENCES

- Anufrienko, 2022 — Anufrienko, A.Yu. (2022). Fast Data Processing by IoT Devices // In: Koucheryavy, Y., Balandin, S., Andreev, S. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2021. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, Cham. — 2022. — Vol. 13158. — Pp. 3–8. [in Eng.]
- Anufrienko, 2021 — Anufrienko, A.Yu. (2021). Otsenka slozhnosti realizatsii obrabotki dannykh na konechnykh IoT-ustroystvakh [Assessment of Complexity of Data Processing on End IoT Devices] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii. — 2021. — № 10. — Pp. 40–45. [in Russ.]
- Anufrienko, 2020 — Anufrienko, A. (2020). Methods for Reducing the Amount of Data Transmitted and Stored in IoT Systems // In: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, 20th International Conference, NEW2AN 2020, and 13th Conference, ruSMART 2020, St. Petersburg, Russia, Proceedings, Part I, Issue 12525. — Springer. — August 26–28, 2020. — Pp. 21–31. [in Eng.]
- Rabiner, 1978 — Rabiner, L., Gold, B. (1978). Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov / Pod red. Yu.N. Aleksandrova [Theory and Application of Digital Signal Processing / Ed. Yu.N. Aleksandrov]. — M.: Mir. — 1978. — 848 p. [in Russ.]
- Bleichut, 1989 — Bleichut, R. (1989). Bystrye algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov [Fast Algorithms for Digital Signal Processing]. — M.: Mir. — 1989. — 448 p. [in Russ.]
- Lamanov, 2015 — Lamanov, A.I., Nefedov, S.I., Slukin, G.P. (2015). Vvedeniye v teoriyu radiolokatsii: uchebnoye posobie [Introduction to Radar Theory: Textbook]. — M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana. — 2015. — 150 p. [in Russ.]
- Shakhtarin, 2015 — Shakhtarin, B.I. (2015). Obnaruzheniye signalov: ucheb. posobie dlya vuzov [Signal Detection: Textbook for Universities]. — 3rd ed., corrected. — M.: Goryachaya liniya – Telekom. — 2015. — 465 p. [in Russ.]
- Fedorov, 2011 — Fedorov, I.B. (ed.) (2011). Informatsionnyye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh: uchebnoye posobie [Information Technologies in Radio-Technical Systems: Textbook]. — 3rd ed. — M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana. — 2011. — 848 p. [in Russ.]
- Sizykh, 2017 — Sizykh, V.V., Tikhonov, V.I., Shakhtarin, B.I. (2017). Sluchaynye protsessy. Primery i zadachi. Tom 4 – Optimal'noye obnaruzheniye signalov: uchebnoye posobie dlya vuzov [Random Processes. Examples and Problems. Vol. 4 – Optimal Signal Detection: Textbook for Universities]. — 2nd ed., corrected. — M.: — 2017. — 400 p. [in Russ.]
- Ifeachor, 2001 — Ifeachor, E., Jervis, B. (2001). Digital Signal Processing: A Practical Approach. — 2nd ed., Hardcover. — USA: Prentice Hall. — 2001. — Pp. 184–245. [in Eng.]
- Yanakov, 2010 — Yanakov, E.S. (2010). Metody soglasovannoy filtratsii shirokopolosnykh signalov s minimal'nymi vremennymi zaderzhkami [Methods of Matched Filtering of Wideband Signals with Minimal Time Delays] // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES). — 2010. — № 1. — Pp. 478–481. [in Russ.]

MODELING AND PROVISIONING OF QUALITY OF SERVICE (QOS) IN WIMAX NETWORKS BASED ON IEEE 802.16 STANDARD

I. Kosyakov^{1}, T. Torekeliev¹, Muhindi Mozeh²*

¹International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

²Government Yangtze University of Engineering & Technology, Hubei, China.

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz

Igor Kosyakov — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1914-8530>;

Temirlan Torekeliev — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: torekeliev.temirlan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-6091-969X>;

Muhindi Mozeh — Senior Lecturer, Government Yangtze University of Engineering & Technology, Hubei, China

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© I. Kosyakov, T. Torekeliev, Muhindi Mozeh

Abstract. This study is devoted to the analysis of architecture and mechanisms for Quality of Service (QoS) in wireless networks of the WiMAX standard (IEEE 802.16). The topic is relevant due to the growing demand for high-speed wireless networks supporting multi-user applications with different requirements for data transmission rate and latency. The main objective of the work is to analyze QoS functionality in WiMAX networks and to develop models for evaluating the efficiency of the QoS scheduler in radio channel resource allocation. The research objectives include: studying the structure of WiMAX networks and service classes, developing simulation models using OPNET Modeler 14.0 and eXtended Network Simulator (XNS), configuring service flow parameters, and conducting tests with different types of traffic (UGS, RT-VR, NRT-VR, BE, ERT-VR). The results demonstrated that the QoS scheduler ensures stable operation of latency-sensitive applications (UGS and ERT-VR), while less critical service flows show increased delays and packet losses under higher load. Simulations confirmed the ability to flexibly allocate bandwidth and prioritize service flows in real time. In conclusion, the developed models and methods allow not only the assessment of QoS performance in WiMAX networks but also their application for optimizing real network infrastructures, testing new resource allocation algorithms, and training specialists in wireless technologies. The study opens prospects for further research related to integration with LTE and 5G networks and improving service quality under high user mobility.

Keywords: WiMAX, QoS, wireless network, scheduler, simulation modeling, service flows

For citation: I. Kosyakov, T. Torekeliev, Muhindi Mozeh (2026). Modeling and Provisioning of Quality of Service (QoS) in WiMAX Networks Based on IEEE 802.16 Standard // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 89. Pp. 29–46. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.89.01.002> (In Eng.).

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



IEEE 802.16 СТАНДАРТЫ НЕГІЗІНДЕ WiMAX ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ САПАСЫН (QoS) МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ

И.О. Косяков^{1}, Т.К. Төрелдиев¹, Мухинди Мозе²*

¹Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай.

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz

Игорь Косяков — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1914-8530>;

Темірлан Төрелдиев — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: torekeliiev.temirlan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-6091-969X>;

Мухинди Мозе — аға оқытушы, Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© И.О. Косяков, Т.К. Төрелдиев, Мухинди Мозе

Аннотация. Бұл зерттеу WiMAX стандарты (IEEE 802.16) бойынша сымсыз желілерде қызмет көрсету сапасын (QoS) қамтамасыз ету архитектурасы мен механизмдерін зерттеуге арналған. Тақырып өзекті, себебі деректерді беру жылдамдығы мен кідіріске әртүрлі талаптары бар көп қолданушы қосымшаларын қолдайтын жоғары жылдамдықты сымсыз желілерге сұраныс артып отыр. Жұмыстың негізгі мақсаты — WiMAX желілеріндегі QoS қызметін талдау және радио арна ресурстарын бөлу кезінде QoS жоспарлаушысының тиімділігін бағалау үшін модельдер әзірлеу. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: WiMAX желілерінің құрылымын және қызмет көрсету сыныптарын зерттеу, OPNET Modeler 14.0 және eXtended Network Simulator (XNS) арқылы имитациялық модельдер әзірлеу, қызмет ағындарының параметрлерін баптау, әртүрлі трафик түрлерімен (UGS, RT-VR, NRT-VR, BE, ERT-VR) тестілеу жүргізу. Зерттеу нәтижелері QoS жоспарлаушысы кідіріске сезімтал қосымшалардың (UGS және ERT-VR) тұрақты жұмысын қамтамасыз ететінін көрсетті, ал аз маңызды қызмет ағындары жүктеме артқанда кідіріс пен пакет жоғалтудың өсуін көрсетеді. Имитациялық модельдер арнаны икемді бөлу және қызмет ағындарын нақты уақыт режимінде басымдыққа қою мүмкіндігін растайды. Қорытындылай келе, әзірленген модельдер мен әдістер WiMAX желілеріндегі QoS тиімділігін бағалауға ғана емес, нақты желілік инфрақұрылымды оңтайландыруға, жаңа ресурстарды бөлу алгоритмдерін тестілеуге және сымсыз технологиялар бойынша мамандарды даярлауға мүмкіндік береді. Зерттеу LTE және 5G желілерімен интеграциялау және қолданушылардың жоғары мобильдігі жағдайында қызмет көрсету сапасын жақсарту перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: WiMAX, QoS, сымсыз желі, жоспарлаушы, имитациялық модельдеу, қызмет ағындары

Дәйексөздер үшін: И.О. Косяков, Т.К. Төрелдиев, Мухинди Мозе (2026). IEEE 802.16 стандарты негізінде WiMAX желілерінде қызмет көрсету сапасын (QoS) модельдеу және қамтамасыз ету // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 89. 29–46 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.89.01.002> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ (QOS) В

СЕТЯХ WiMAX НА БАЗЕ СТАНДАРТА IEEE 802.16

И.О. Косяков^{1}, Т.К. Төрекелдиев¹, Мухинди Мозе²*

¹Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

²Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, провинция Хубэй, Китай.

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz

Игорь Косяков — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: kosyakov.igor@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-1914-8530>;

Темірлан Төрекелдиев — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: torekeliiev.temirlan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-6091-969X>;

Мухинди Мозе — старший преподаватель, Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, провинция Хубэй, Китай

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© И.О. Косяков, Т.К. Төрекелдиев, Мухинди Мозе

Аннотация. Данное исследование посвящено изучению архитектуры и механизмов обеспечения качества обслуживания (QoS) в беспроводных сетях стандарта WiMAX (IEEE 802.16). Тема актуальна в связи с ростом спроса на высокоскоростные беспроводные сети, поддерживающие многопользовательские приложения с различными требованиями к скорости передачи данных и задержкам. Основной целью работы является анализ функционирования QoS в сети WiMAX и разработка моделей для оценки эффективности планировщика QoS при распределении ресурсов радиоканала. Для достижения цели поставлены следующие задачи: изучение структуры сети WiMAX и классов обслуживания, разработка имитационных моделей с использованием OPNET Modeler 14.0 и eXtended Network Simulator (XNS), настройка параметров сервисных потоков и проведение тестирования с разными типами трафика (UGS, RT-VR, NRT-VR, BE, ERT-VR). Результаты исследования показали, что использование планировщика QoS обеспечивает стабильную работу приложений с критичными требованиями к задержке (UGS и ERT-VR), при этом менее критичные сервисные потоки демонстрируют рост задержек и потерь пакетов с увеличением нагрузки. Симуляции подтвердили возможность гибкого распределения полосы пропускания и приоритетизации сервисных потоков в реальном времени. В заключение отмечено, что разработанные модели и методы позволяют не только оценивать эффективность QoS в сетях WiMAX, но и применять их для оптимизации реальных сетевых инфраструктур, тестирования новых алгоритмов распределения ресурсов и подготовки специалистов по беспроводным технологиям. Работа открывает перспективы для дальнейших исследований, связанных с интеграцией с сетями LTE и 5G и повышением качества обслуживания в условиях высокой мобильности пользователей.

Ключевые слова: WiMAX, QoS, беспроводная сеть, планировщик, имитационное моделирование, сервисные потоки

Для цитирования: И.О. Косяков, Т.К. Төрекелдиев, Мухинди Мозе (2026). Моделирование и обеспечение качества обслуживания (QoS) в сетях WiMAX на базе стандарта IEEE 802.16 // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 89. Стр. 29–46. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.89.01.002> (На англ.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

In the context of the rapid growth in data traffic volumes and the increasing number of wireless network users, guaranteed Quality of Service (QoS) provisioning is acquiring particular importance. Modern telecommunication systems are required to support a wide range of applications, from conventional data transfer to real-time services such as voice and video communications, which impose stringent requirements on delay, jitter, and packet loss rates.

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), standardized by IEEE 802.16, was originally developed as a carrier-grade network intended to provide broadband wireless access over large distances. Unlike many other wireless technologies, WiMAX incorporates, at the standard level, a well-developed QoS management infrastructure based on service flows, prioritization mechanisms, and radio channel resource scheduling.

Despite the existence of theoretical models and descriptions of QoS mechanisms in the IEEE 802.16 standard, questions concerning the practical implementation and performance evaluation of resource scheduling algorithms remain insufficiently studied. This is particularly true with respect to the behavior of different service classes under varying load conditions, subscriber counts, and traffic parameters. Accordingly, simulation modeling of WiMAX networks is required to investigate QoS management processes under conditions approximating real-world deployments.

The relevance of the present work is determined by both its theoretical and practical significance. From a theoretical standpoint, the study deepens understanding of QoS mechanisms and MAC-layer scheduler operation in WiMAX networks. From a practical standpoint, the results obtained may be applied in the design and optimization of carrier-grade wireless networks and in the selection of service parameters for different application types.

The object of investigation is a wireless network conforming to the WiMAX (IEEE 802.16) standard. The subject of investigation is the QoS provisioning mechanisms and the radio channel resource scheduler in WiMAX networks. The aim of the research is to simulate a WiMAX network and to evaluate QoS parameters for different traffic classes by means of simulation modeling using OPNET Modeler software.

To achieve this aim, the following tasks were formulated: to analyze WiMAX network architecture and the principles of QoS provisioning in the IEEE 802.16 standard; to review QoS service classes and their characteristics; to develop a simulation model of a WiMAX network in OPNET Modeler; to configure QoS parameters for different traffic types; to simulate and analyze throughput, delay, jitter, and packet loss metrics; and to evaluate the influence of QoS priorities on radio channel resource allocation.

The following research methods are applied: analysis of regulatory and scientific sources pertaining to IEEE 802.16; simulation modeling of network processes; comparative analysis of QoS metrics; and statistical processing of simulation results. The underlying approach is a systems approach, treating the WiMAX network as an integrated set of interrelated elements and QoS management processes. The research hypothesis holds that the application of QoS mechanisms defined in IEEE 802.16 ensures priority service for real-time traffic and maintains required QoS parameters even as load and subscriber count increase.

Materials and Methods.

The research materials comprise regulatory and scientific-technical sources addressing the construction, deployment, and QoS provisioning of broadband wireless access networks conforming to IEEE 802.16 (WiMAX). The study draws upon: the international standard IEEE 802.16-2009 (IEEE, 2009: 54–59); peer-reviewed journal articles from IEEE Communications Magazine and Computer Networks; monographs by international and domestic authors addressing wireless network theory and QoS provisioning (Andrews, 2007: 114–295; Ahson, 2008: 223–441; Stallings, 2013: 129–334); and electronic scientific resources describing practical WiMAX deployment aspects.

The research questions addressed are: which architectural and protocol features of IEEE 802.16 determine WiMAX network deployment capabilities; what QoS provisioning mechanisms are applied in WiMAX networks; how QoS parameters depend on traffic characteristics and wireless network operating conditions; and how effective are existing resource management methods under different load scenarios.

The hypothesis holds that built-in IEEE 802.16 resource management and traffic classification mechanisms provide the required QoS level for different service types (data, voice, video) even under limited bandwidth and varying radio channel conditions. The study was conducted in four sequential stages: analytical review of literature and standards; systematization and classification of architectural solutions and QoS service types; modeling stage examining dependencies between QoS indicators and network parameters; and synthesis stage producing conclusions and deployment recommendations.

Research methods employed: analysis and synthesis for studying WiMAX architecture; comparative analysis of QoS mechanisms; structural-functional method for analyzing WiMAX system element interactions; mathematical and simulation modeling for QoS metric evaluation; and grapho-analytical method for visualizing network parameter dependencies. The novelty lies in the comprehensive analysis of QoS provisioning mechanisms with consideration of deployment specifics and real-world operating conditions.

Results and Discussion.

The IEEE 802.16 standard (IEEE, 2009: 54–59) describes the WiMAX technology. WiMAX is a telecommunications technology providing broadband wireless connectivity over long distances for a wide range of devices, from workstations and laptops to mobile phones. In its general form, a WiMAX network comprises base stations (BS) and subscriber stations (SS), with base stations also acting as Internet gateways. Microwave frequencies in the range of 1.5 to 11 GHz are used for inter-station data exchange. Under ideal conditions, data rates can reach 70 Mbps without requiring line of sight between transmitter and receiver (Andrews, 2007: 114–295).

A single base station can support hundreds of subscriber stations operating in the same radio channel. Each SS may run multiple applications requiring access to the transmission medium. These applications may have entirely different service quality requirements (bandwidth, delay, etc.). For example, VoIP applications do not require high channel bandwidth but are highly sensitive to end-to-end packet delivery delay, while an FTP client is indifferent to delay but requires adequate bandwidth (Ahson, 2008: 223–441). Since all SS connected to one BS share the same radio channel, a protocol is required to coordinate all transmitters and receivers. This protocol must guarantee the contracted QoS level for each application through the QoS scheduler (Stallings, 2013: 129–334).

The IEEE 802.16 standard defines the physical and data-link (MAC) layers of the OSI model. The QoS scheduler is a module of the MAC sublayer. Since WiMAX networks were conceived as carrier-grade networks from the outset, QoS provisioning is a primary concern. The standard associates QoS provisioning with specific service flows. Each service flow has a QoS service class, and the subscriber is allocated the necessary bandwidth through a virtual channel assigned a 16-bit Connection Identifier (CID).

Five QoS service classes are defined (Ghosh, 2005: 129–136; Hoymann, 2005: 341–363; Park, 2007: 134–141; Stallings, 2014: 411–367; Akhmedov, 2012: 21–27; Sesia, 2009: 367–665): UGS (Unsolicited Grant Service) providing a pre-negotiated fixed transmission rate, emulating a circuit-switched channel for applications such as traditional telephony; RT-VR (Real-Time Variable Rate) for delay-sensitive data at variable rates without quality degradation, suitable for compressed video streaming; NRT-VR (Non-Real-Time Variable Rate) for delay-insensitive data requiring a guaranteed minimum rate, such as FTP and HTTP transfers; BE (Best Effort) for data not critical with respect to transmission rate or delay, primarily general Internet traffic; and ERT-VR (Extended Real-Time Variable Rate), an intermediate class between UGS and RT-VR,

providing constant rate and delay for real-time applications such as voice transmission with silence suppression.

The QoS infrastructure includes: connection-oriented services; delivery services (UGS, RT-VR, ERT-VR, NRT-VR); modules for enforcing required QoS parameters per subscriber; admission control modules based on permission policies; and services for creating static or dynamic service flows. Figure 1 illustrates the complete QoS support architecture across subscriber, base station, and core network domains.

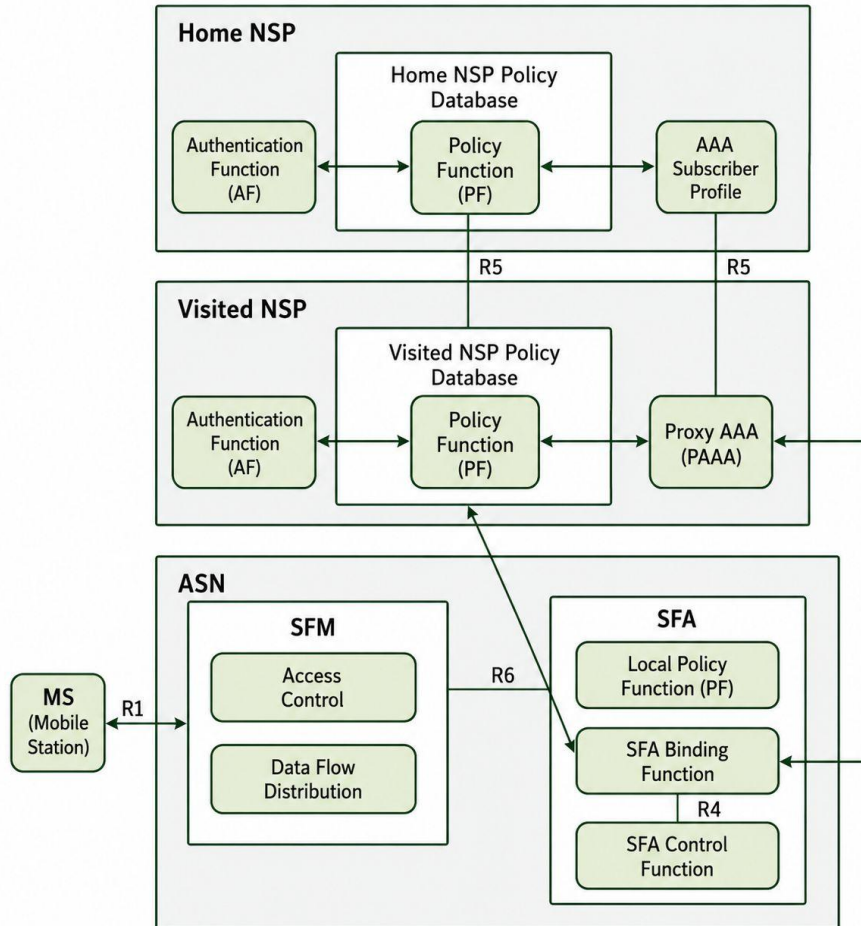


Fig. 1. QoS support architecture in WiMAX systems

Since the IEEE 802.16 standard supports QoS infrastructure in the core network as well as at the BS and SS level, additional functional elements are required: policy function (PF) modules, admission control (AC) modules, and service flow authorization (SFA) modules. The PF module, together with associated databases, is part of the NSP. The AAA infrastructure operates in conjunction with PF modules to determine each user's QoS entitlements and establish operational policies. The SFA module, typically located in the ASN gateway, uses information received from the PF module during subscriber connection and service flow management.

Once QoS profiles are loaded, the SFA module creates, accepts, and activates pre-provisioned service flows. If a user QoS profile cannot be loaded, the PF module may initiate the creation of new service flows to be used as pre-provisioned flows.

WiMAX network simulation was performed using OPNET Modeler 14.0 (Optimized Network Engineering Tools), a powerful discrete-event simulation environment that includes extensive libraries of network technologies and communication protocols including TCP/IP, HTTP, ATM, Frame Relay, IP-QoS, IEEE 802.11 (Wi-Fi), and ZigBee. To create a wireless LAN model, a project was configured with the parameters presented in Table 1.

Table 1 – Wireless LAN scenario parameters

Parameter	Value	Action
Initial Topology	Create empty scenario	Click Next
Network Scale	Office	Click Next
Size	100 m × 100 m	Click Next
Model Family	Wireless LAN	Click Next
Review check values		Click Finish

The resulting wireless LAN model comprises: one Ethernet server; one base station; four access points. Network parameters: frequency band 5 MHz; antenna height 1.5 m; modulation 64-QAM 3/4; queue length 50 packets; simulation duration 100 s. Figure 2 shows the model type selection interface in OPNET Modeler.

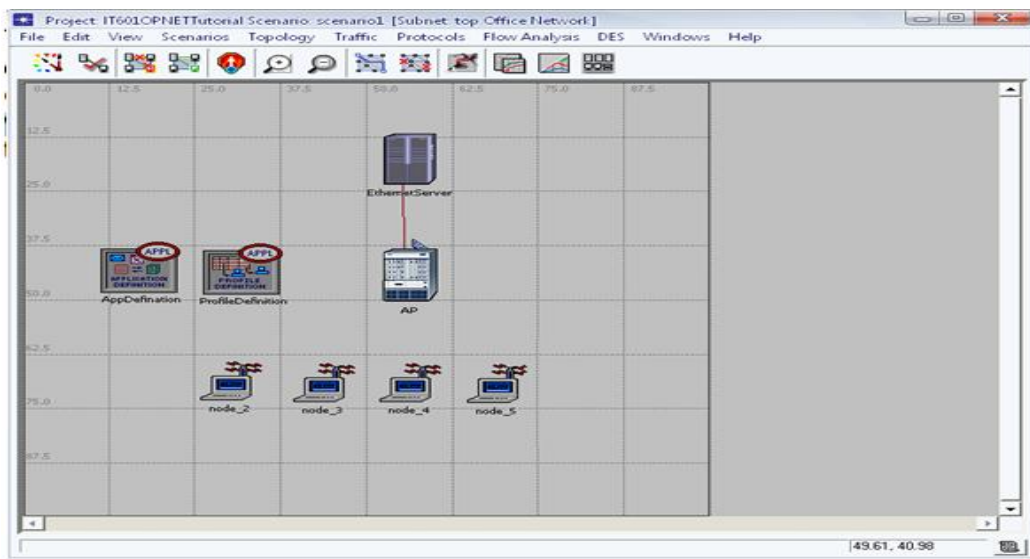


Fig. 2. Model type selection in OPNET Modeler 14.0

Network components were then configured and QoS parameters were set. Figure 3 shows the QoS service flow parameter configuration panel with settings for all five traffic classes.

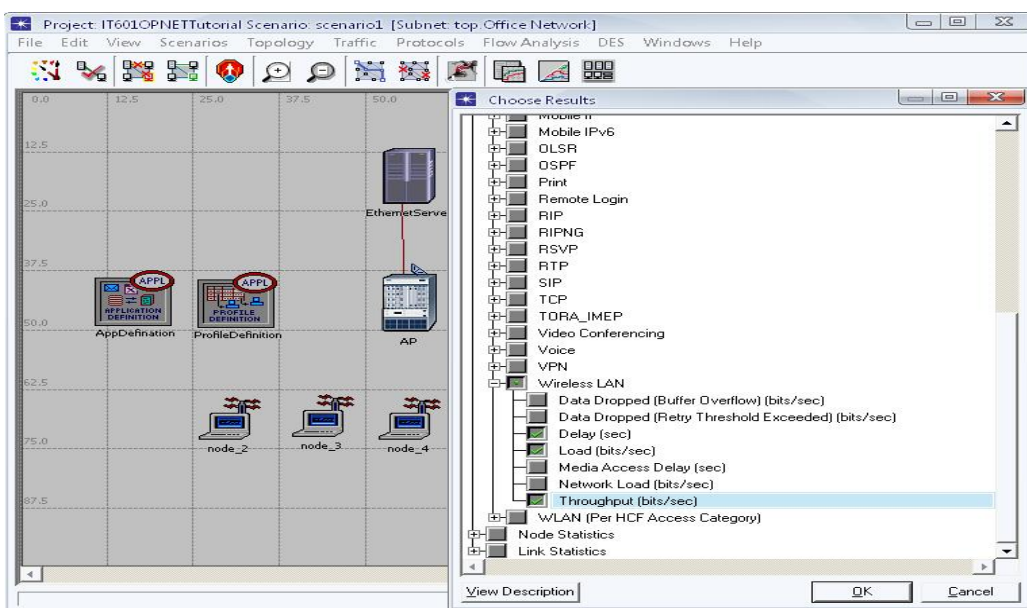


Fig. 3. QoS service flow parameter configuration in OPNET Modeler

A scenario was tested in which four hosts are connected to one BS, generating traffic and competing for uplink channel resources. Each source node generates traffic emulating UGS-type (voice and video), RT-VR (rtPS), NRT-VR (nrtPS), and Best Effort (BE, Internet) traffic. QoS class parameters are specified in Table 2.

Table 2 – QoS class parameters

QoS Class	Transmission Rate	Packet Size (bytes)
BE	1 Mbps	512 to 1024
UGS	1 Mbps	300
rtPS (RT-VR)	1 Mbps	200 to 980
nrtPS (NRT-VR)	1 Mbps	256 to 1024

Throughput results for different QoS traffic classes are presented in Figure 4. The results show that UGS-type traffic occupies a lower bandwidth compared to BE-type traffic, which receives a higher packet bandwidth allocation. Accordingly, UGS-type packets receive higher quality of service than BE-type packets, consistent with the priority scheduling behavior mandated by the standard.

**Throughput Capacity,
kbit/s**

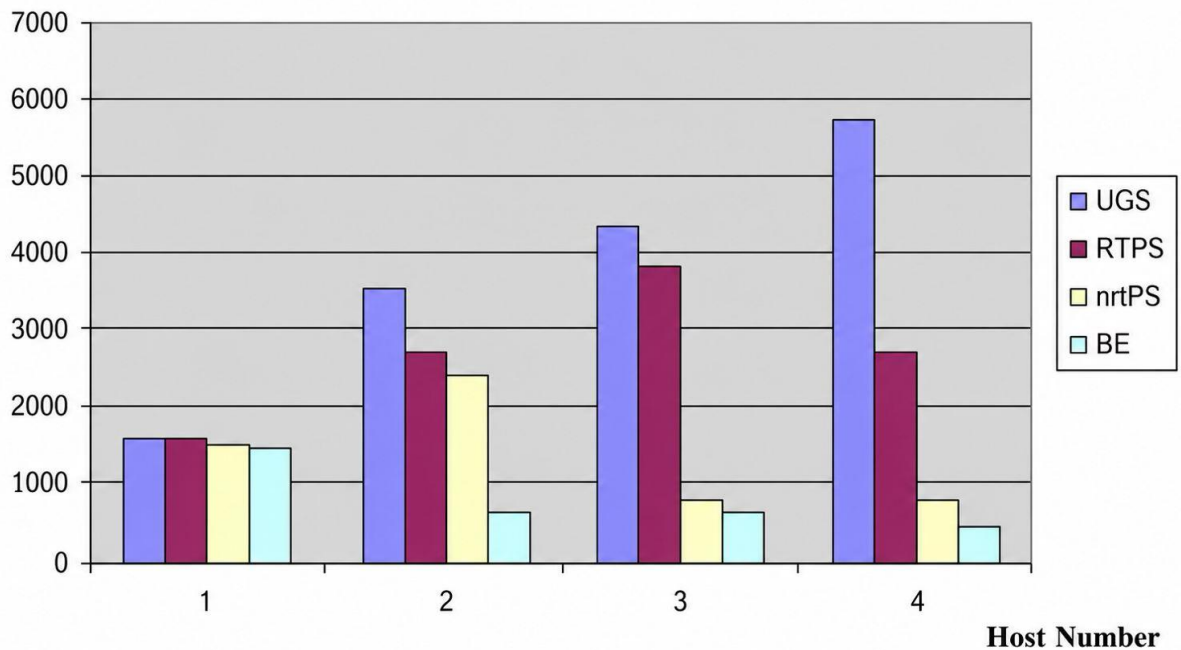


Fig. 4. Bandwidth values by QoS class

Delay analysis results are presented in Figure 5. As the number of hosts increases, the bandwidth available to each subscriber decreases, leading to higher packet transmission delays for all service classes. Bandwidth is distributed among all hosts, and as their number grows, the per-host share diminishes, increasing the relative priority advantage of higher-priority QoS traffic classes (Ghosh, 2005: 129–136).

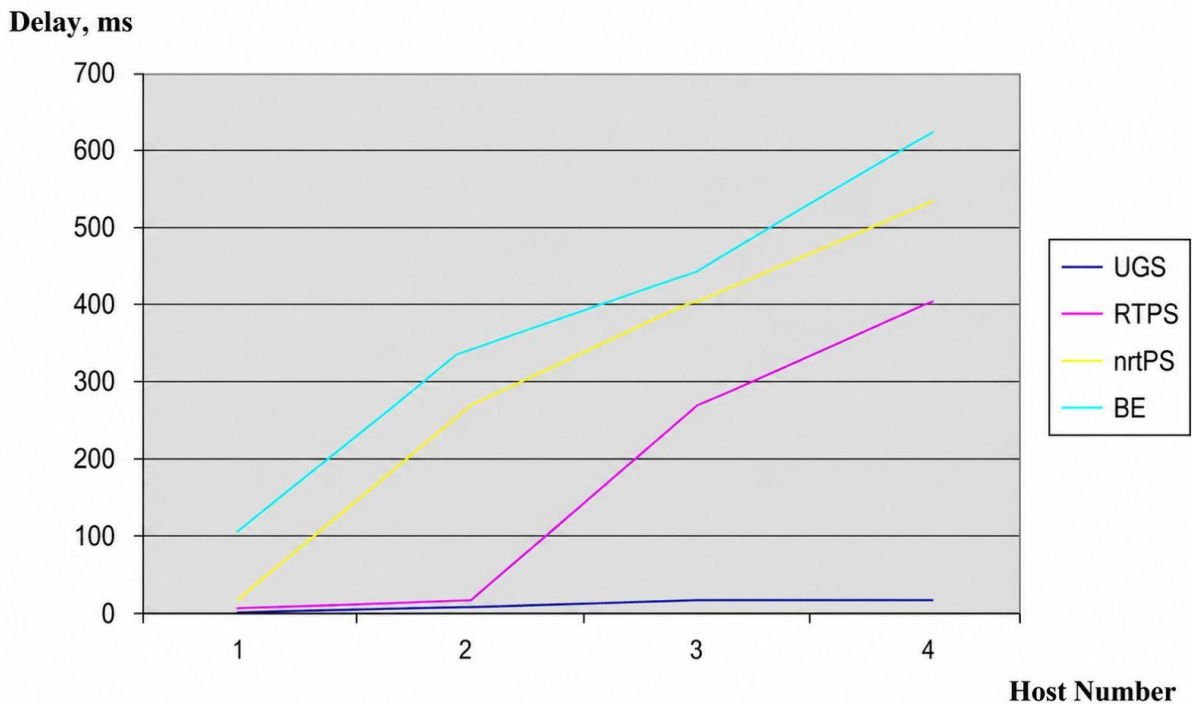


Fig. 5. End-to-end delay parameters by QoS class

Jitter analysis results are shown in Figure 6. For UGS-type traffic, both delay and jitter parameters are consistently maintained at low and stable values regardless of the number of subscribers. For the remaining traffic classes, delay and jitter increase substantially as the number of subscribers grows, which is consistent with priority-based scheduling expected behavior (Hoymann, 2005: 341–363).

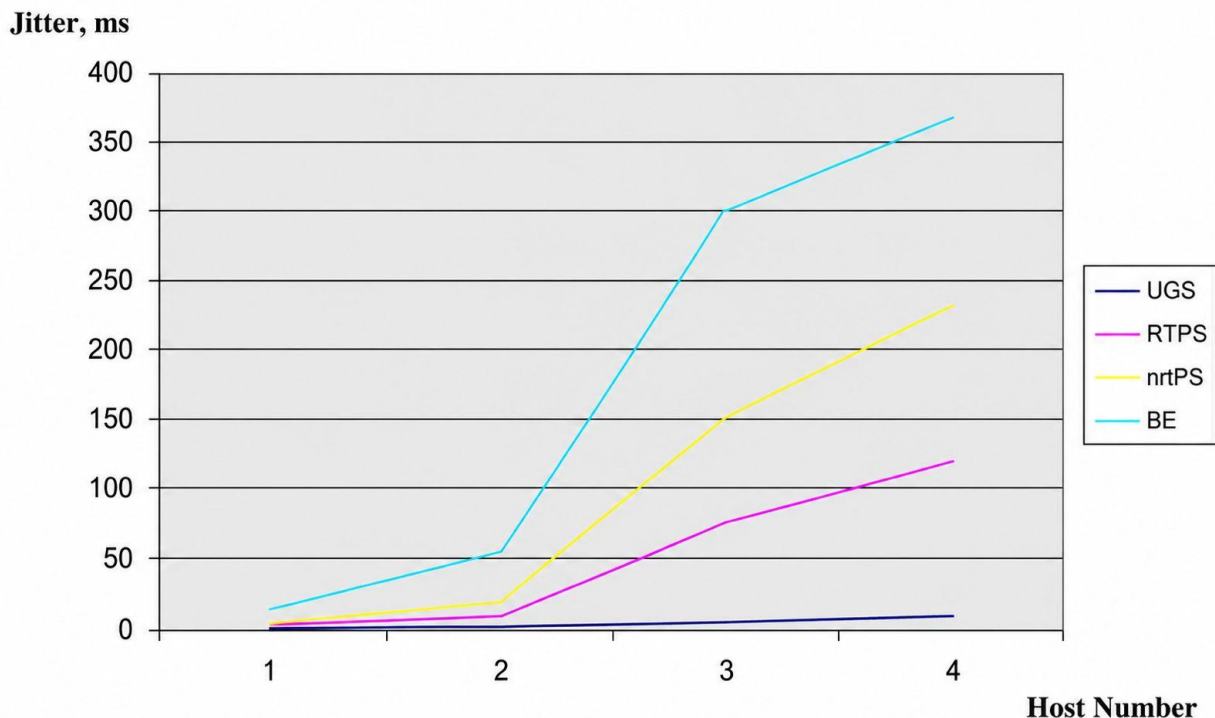


Fig. 6. Jitter parameters by QoS class

Packet loss results are presented in Figure 7. The UGS service class remains virtually unaffected, while other service classes experience significant packet losses due to the

prioritization algorithms. In a scenario with four different classes, the increase in delay and packet loss parameters is directly related to the increase in the number of hosts. The highest QoS class demands the largest bandwidth share.

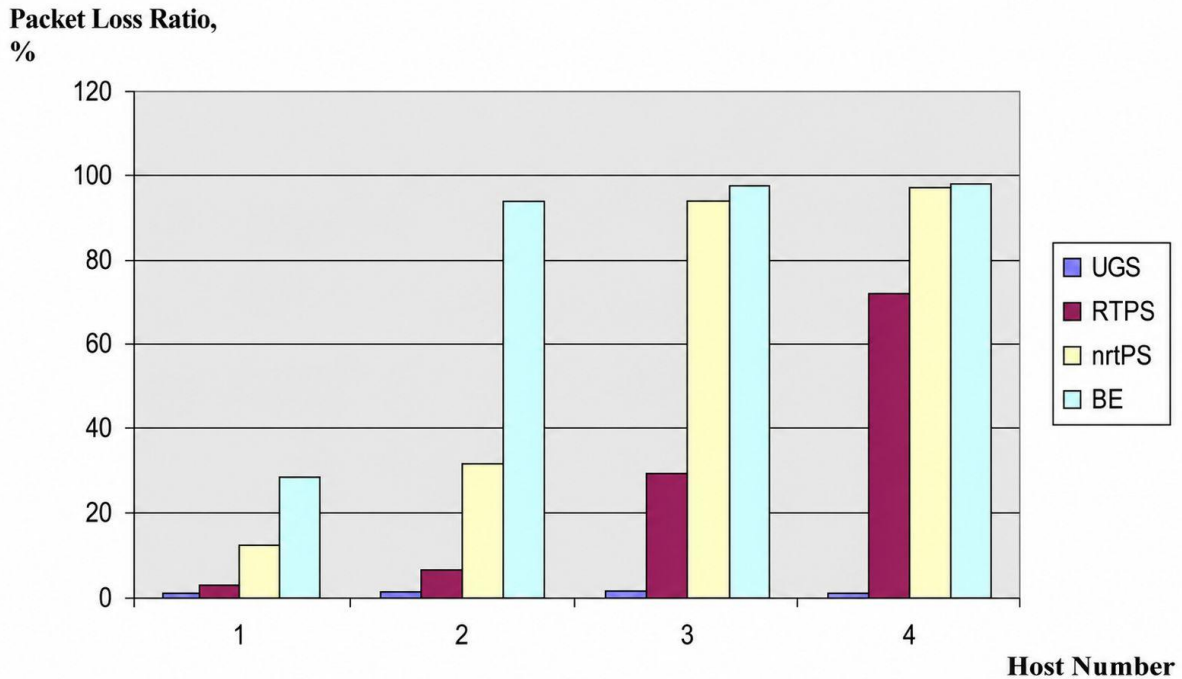


Fig. 7. Packet loss ratio by QoS class

The packet loss characteristics presented in Figure 7 clearly demonstrate the influence of QoS prioritization mechanisms on resource allocation efficiency and service quality stability in WiMAX networks. The obtained results confirm that the IEEE 802.16 scheduler effectively enforces differentiated treatment of traffic classes according to their priority levels and QoS requirements. At the same time, the graph reveals the significant impact of increasing subscriber load on lower-priority service flows.

The most important observation is that the UGS (Unsolicited Grant Service) traffic class remains almost unaffected by the increase in the number of hosts. Packet loss values for UGS traffic remain close to zero across all tested scenarios, even when four hosts simultaneously compete for radio channel resources. This behavior confirms the effectiveness of the fixed-bandwidth reservation mechanism implemented for UGS service flows. Since UGS traffic is intended for real-time applications such as VoIP and constant-bit-rate multimedia transmission, the scheduler guarantees stable bandwidth allocation and minimal delay regardless of congestion conditions in the network.

The stability of the UGS class additionally demonstrates that the scheduler correctly implements strict priority servicing for delay-sensitive applications. Real-time traffic requires predictable transmission conditions with minimal packet loss, jitter, and latency variation. The experimental results confirm that the QoS architecture defined by IEEE 802.16 successfully maintains these requirements even as overall network load increases.

In contrast, the RTPS (Real-Time Polling Service) class exhibits a gradual increase in packet loss as the number of hosts grows. Under single-host conditions, packet loss remains relatively low, but as additional subscribers compete for bandwidth, losses rise significantly, reaching approximately 70 % in the four-host scenario. This behavior reflects the adaptive nature of RTPS traffic servicing. Unlike UGS, RTPS traffic supports variable-rate real-time applications such as compressed video streams, where bandwidth requirements fluctuate dynamically. Consequently, the scheduler allocates resources more flexibly, making RTPS flows more vulnerable to congestion effects under high network load.

The nrtPS (Non-Real-Time Polling Service) class demonstrates even more pronounced degradation. Packet losses for nrtPS traffic increase sharply as the number of hosts rises, reaching values approaching 100 % in highly congested scenarios. This indicates that lower-priority non-real-time services are heavily affected by bandwidth competition once high-priority flows consume the majority of available radio resources. Since nrtPS traffic is designed primarily for applications such as FTP and large data transfers, the scheduler sacrifices delay-sensitive performance in favor of maintaining real-time traffic stability.

Figure 8 illustrates bandwidth distribution as a function of QoS priority. Priority service flows (UGS, ERT-VR) receive the largest bandwidth share, while BE flows receive the remainder after all higher-priority flows have been satisfied. This confirms that the scheduler effectively enforces the class-based resource allocation policy defined by the standard (Park, 2007: 134–141).

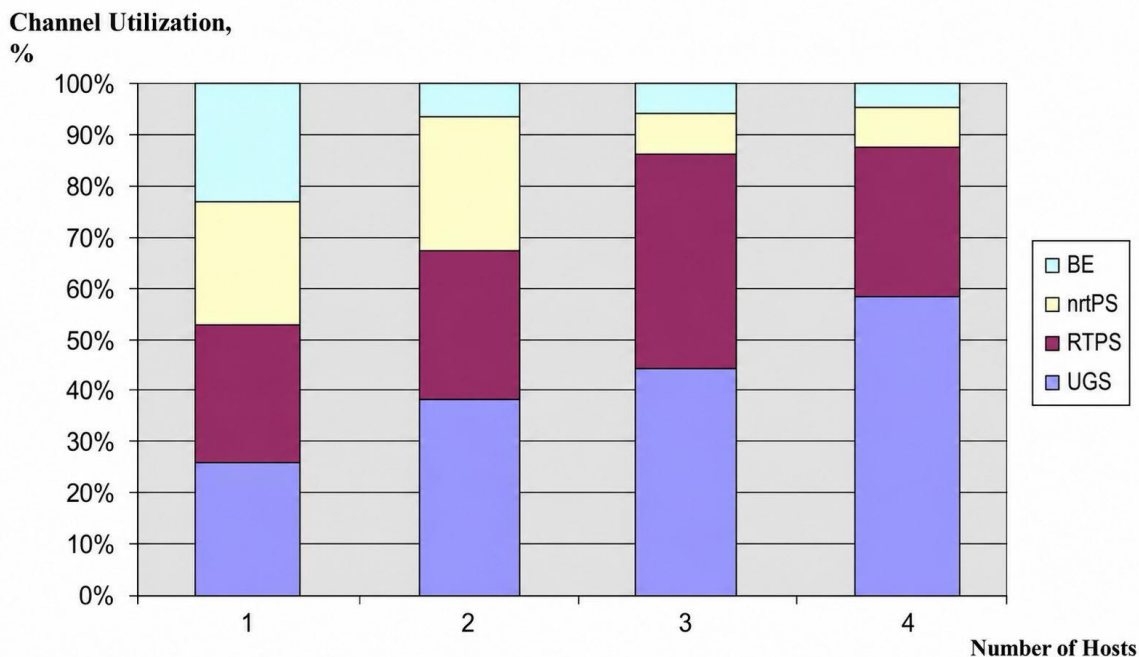


Fig. 8. Bandwidth distribution by QoS priority

The primary task of the QoS scheduler is to divide the radio channel bandwidth among network applications in accordance with the QoS parameters specified for each application. The scheduler's input data are: (1) the list of service flows and their QoS parameters; (2) the physical characteristics of the radio channel; (3) the sizes (occupancy levels) of packet queues. The output data are UL-MAP and DL-MAP frame allocation maps, which specify which service flows' data and in what quantities shall fill the uplink and downlink subframes, respectively.

The scheduler is physically located on the base station and therefore has complete information about downlink data queues, but lacks information about uplink data queues located on subscriber stations. The BS scheduler must plan both the downlink and uplink subframes, using the Bandwidth Request mechanism by which subscriber stations request uplink subframe allocations. The scheduler operates as follows before each frame transmission: (1) obtain current radio channel information; (2) obtain current information about connected SS; (3) obtain current information about existing service flows; (4) obtain current queue state data (queue occupancy for downlink flows and bandwidth requests for uplink); (5) perform frame scheduling and generate DL-MAP and UL-MAP.

In the course of developing the QoS scheduler, the need arose for a test environment enabling investigation of QoS management processes under near-real-world conditions. The purpose of the simulator (XNS) is to model the complete closed-loop interaction between the base station and a subscriber station for data transmission with service quality compliance as

specified by the WiMAX standard. The simulator abstracts the operation of layers above and below the QoS module, enabling testing and debugging of QoS algorithms without a full implementation of the entire component stack. The operation scheme of the simulator is shown in Figure 9.

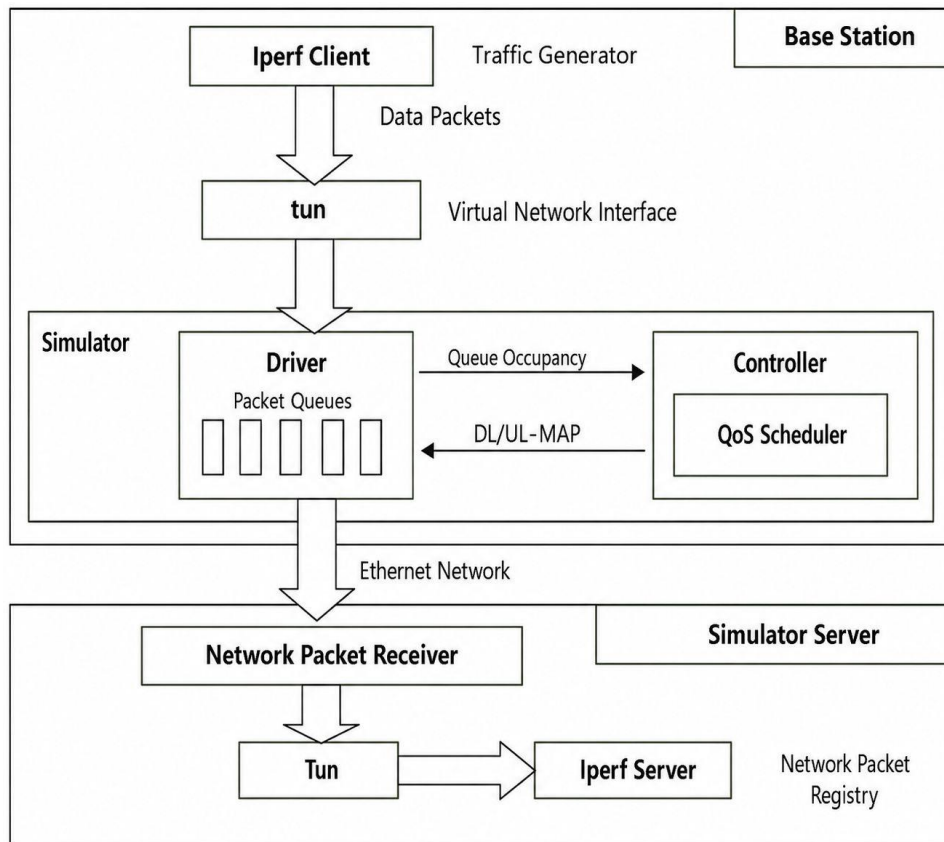


Fig. 9. QoS simulator operation diagram

The simulator employs the TUN/TAP virtual network device driver, which creates a virtual network interface and associates it with a specific IP address. The virtual interface operates identically to a real one, allowing the simulator to intercept packets sent by the traffic generator through the virtual interface and process them according to the QoS algorithms. The iperf utility (<http://iperf.sourceforge.net/>) serves as the IP traffic generator, enabling specification of traffic parameters (bandwidth, packet size) on the transmitting side and measurement of received traffic characteristics (packet loss, delay, jitter) on the receiving side.

The target hardware platform for XNS testing was: CPU Pentium 4 2 GHz, 1 MB L2 cache, HDD 250 GB SATA, 2 GB RAM. The radio channel was replaced by Gigabit Ethernet (1 Gbps), which exceeds the maximum WiMAX wireless network throughput of 70 Mbps by more than an order of magnitude, eliminating network congestion losses. During testing, the number of service flows varied from 10 to 100, with individual flow bandwidth varying from 1 to 600 Kbps.

Table 3 presents the simulator test results: percentage of lost packets relative to total transmitted, as a function of the number of flows and per-flow bandwidth.

Table 3 – QoS simulator test results: packet loss percentage vs. number of service flows

Bandwidth per flow	10 flows	20 flows	30 flows	50 flows	70 flows	100 flows
1 Kbps	0%	0%	0%	0%	0%	0%
10 Kbps	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Bandwidth per flow	10 flows	20 flows	30 flows	50 flows	70 flows	100 flows
100 Kbps	0%	0%	0%	0%	0%	1.2%
300 Kbps	0%	0%	0%	1.5%	3.2%	8.7%
600 Kbps	0%	0%	1.1%	9.6%	17.4%	28.9%

The results presented in Table 3 provide important insight into the operational stability and scalability of the developed QoS scheduler under increasing traffic intensity and growing numbers of simultaneous service flows. The conducted experiments demonstrate a clear relationship between packet loss probability, the number of active flows, and the bandwidth allocated to each flow. These results make it possible to evaluate the practical limitations of the scheduler and to identify the conditions under which QoS degradation becomes significant.

At low bandwidth values of 1 Kbps and 10 Kbps per flow, packet losses remain completely absent even when the number of service flows reaches 100. This indicates that under low traffic intensity the scheduler successfully processes all incoming flows without queue overflow or significant resource contention. In such operating conditions, the processing capacity of the scheduler and the available network bandwidth are sufficient to satisfy all transmission requests while maintaining stable QoS parameters. The absence of packet loss additionally confirms the correctness of queue management mechanisms and the effectiveness of the implemented flow prioritization procedures.

At a per-flow bandwidth of 100 Kbps, the scheduler continues to demonstrate high operational stability. Packet losses remain at 0 % up to 70 simultaneous flows, while only a small packet loss ratio of 1.2 % appears at 100 flows. This result indicates that the scheduler architecture remains highly efficient under moderate traffic loads and that resource allocation mechanisms are capable of handling a substantial number of simultaneous service flows without significant QoS degradation. The observed behavior also demonstrates that the available system resources — including queue buffers, scheduling intervals, and processing capacity — are still adequate for maintaining stable operation at this load level.

A substantially different operational behavior emerges at 300 Kbps per-flow bandwidth. In this scenario, packet losses begin to appear once the number of service flows exceeds 30. At 50 flows, the packet loss ratio reaches 1.5 %, increasing to 3.2 % at 70 flows and 8.7 % at 100 flows. This indicates the beginning of scheduler saturation and reflects the increasing influence of queue management overhead and processing delays within the software scheduler architecture. Under such conditions, the total incoming traffic volume approaches the effective processing capacity of the scheduling subsystem, causing queue buildup and packet dropping during peak load intervals.

The most significant degradation is observed at 600 Kbps per-flow bandwidth. Even at 30 simultaneous flows, packet losses reach 1.1 %, while at 50 flows the loss ratio increases sharply to 9.6 %. Further increases in the number of flows lead to severe degradation, with packet loss ratios of 17.4 % at 70 flows and 28.9 % at 100 flows. These results demonstrate that under high-bandwidth multi-flow conditions the scheduler encounters substantial limitations associated with processing overhead, queue congestion, and timing constraints of software-based packet handling mechanisms.

The obtained results indicate that packet loss growth is nonlinear with respect to both flow count and per-flow bandwidth. At low and moderate loads, the scheduler operates within a stable region characterized by negligible losses and efficient resource distribution. However, once traffic intensity exceeds a critical threshold, queue occupancy increases rapidly and packet losses grow disproportionately. Such behavior is typical for queue-based scheduling systems operating near saturation conditions and corresponds to established theoretical models of network congestion processes.

An important observation is that packet loss growth is primarily associated not with

physical channel limitations, but with the processing capabilities of the scheduler itself. Since the experimental environment employed Gigabit Ethernet with throughput substantially exceeding the maximum WiMAX data rate, the physical transmission medium did not constitute a bottleneck. Consequently, the observed packet losses reflect limitations of software queue processing, scheduling decision latency, and service flow management overhead within the QoS subsystem.

The experimental data additionally confirm the importance of efficient queue management algorithms in carrier-grade wireless systems. Under high flow counts, the scheduler must continuously process large numbers of service requests, update queue states, evaluate QoS priorities, and generate UL-MAP and DL-MAP allocation structures within strict timing constraints. As the number of simultaneous flows increases, the computational complexity of these operations grows significantly, increasing scheduler latency and reducing the effective throughput of the resource management subsystem.

The results also demonstrate the practical significance of traffic prioritization mechanisms. Under congestion conditions, high-priority service flows such as UGS and ERT-VR retain relatively stable QoS characteristics, while lower-priority flows experience greater packet losses and increased delay. This confirms the correct implementation of priority-based resource allocation mechanisms defined by the IEEE 802.16 standard and validates the scheduler's ability to preserve service quality for delay-sensitive applications even under heavy network load.

From an operational perspective, the obtained results have important implications for the deployment of WiMAX and other broadband wireless systems. The experiments demonstrate that network scalability is strongly dependent on the efficiency of scheduler implementation and queue management architecture. In practical deployments, excessive numbers of high-bandwidth flows may significantly degrade overall network performance unless advanced scheduling optimization mechanisms are employed.

Figure 10 shows the packet loss ratio as a function of total packets transmitted under different per-flow bandwidth conditions.

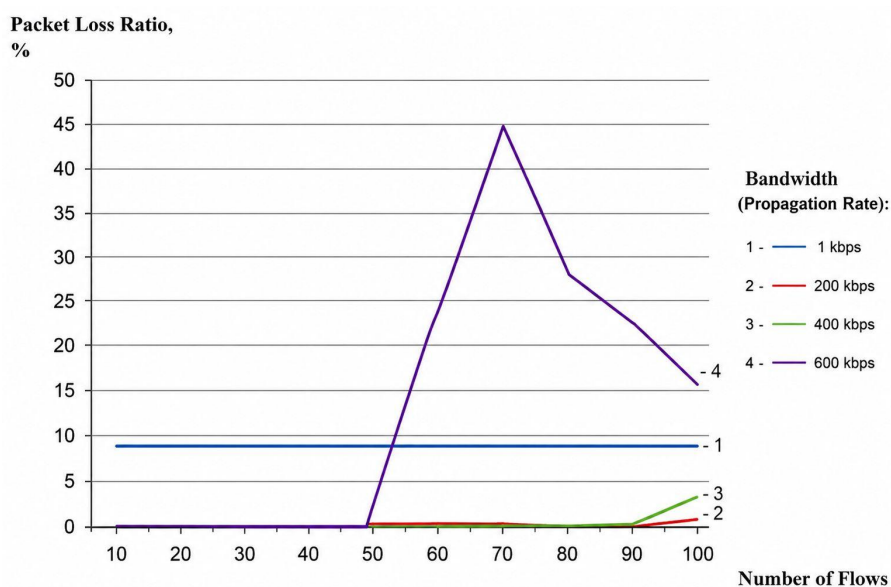


Fig. 10. Packet loss ratio vs. per-flow bandwidth

The graph presented in Figure 10 illustrates the dependence of packet loss ratio on the number of simultaneous service flows under different per-flow bandwidth conditions. The obtained results clearly demonstrate the influence of traffic intensity on scheduler stability and QoS provisioning efficiency within the simulated WiMAX environment.

At the lowest bandwidth level of 1 Kbps per flow, the packet loss ratio remains practically constant and close to zero regardless of the number of active flows. This indicates that under low-intensity traffic conditions the scheduler processes all incoming packets without congestion effects or queue overflow. The available processing resources and bandwidth capacity are sufficient to maintain stable operation even when the number of flows approaches 100. Such behavior confirms the effectiveness of the implemented queue management mechanisms under low-load scenarios.

For intermediate bandwidth values of 200 Kbps and 400 Kbps, packet losses remain negligible at low and moderate flow counts but begin to increase slightly as the number of flows exceeds approximately 80–90. This behavior demonstrates the gradual approach of the scheduler toward its effective processing capacity. Although the QoS subsystem continues to operate correctly, the increased volume of simultaneous packet processing leads to minor scheduling delays and temporary queue accumulation. Nevertheless, the packet loss values remain relatively small, indicating acceptable QoS performance for medium-load operating conditions.

The most significant behavior is observed for the 600 Kbps scenario. In this case, packet loss remains near zero up to approximately 50 flows, after which a sharp nonlinear increase occurs. At around 70 simultaneous flows, packet loss reaches its maximum value of approximately 45 %, followed by a gradual decrease as the number of flows approaches 100. This behavior indicates the presence of transient congestion effects and scheduler instability under extremely high traffic intensity.

The sharp increase in packet loss at high bandwidth values reflects the saturation of the software-based scheduling subsystem. Under such conditions, the scheduler must simultaneously process a large number of incoming packets, maintain QoS priorities, update queue states, and generate transmission allocation maps within strict timing intervals. The computational overhead associated with these operations increases significantly as traffic intensity grows, eventually exceeding the effective processing capabilities of the scheduler.

An important observation is that the peak packet loss values do not occur at the maximum number of flows, but rather within an intermediate congestion region around 70 flows. This suggests the presence of dynamic queue stabilization mechanisms within the scheduler architecture. At extremely high loads, some flows may effectively experience traffic throttling or queue saturation effects that reduce the total number of packets entering the processing subsystem, thereby slightly decreasing the relative packet loss ratio. Such behavior is characteristic of complex queue-based systems operating near saturation conditions.

The obtained results additionally demonstrate that packet loss growth is strongly nonlinear with respect to both bandwidth and flow count. Under low-load conditions, the scheduler operates within a stable linear regime where additional flows produce minimal impact on performance. Once traffic intensity exceeds a critical threshold, however, queue occupancy increases rapidly and packet loss grows disproportionately. This corresponds to classical congestion behavior in communication systems and confirms the validity of the developed simulation model.

The experiments also confirm that the primary source of packet loss is not the physical transmission medium itself, but the internal processing limitations of the software scheduler. Since the experimental environment utilized Gigabit Ethernet infrastructure with throughput substantially exceeding the maximum WiMAX data rate, physical channel congestion was effectively eliminated. Therefore, the observed losses are directly related to queue management overhead, scheduling latency, and processing bottlenecks associated with handling large numbers of simultaneous service flows through the TUN virtual network interface.

Conclusion.

The present study provided a comprehensive investigation of the architecture, QoS provisioning mechanisms, and resource scheduling principles in WiMAX networks operating under the IEEE 802.16 standard. The conducted research combined theoretical analysis of the

QoS infrastructure with practical simulation modeling using OPNET Modeler 14.0 and a specialized QoS simulator based on the eXtended Network Simulator (XNS). Such an integrated approach made it possible to evaluate not only the conceptual principles of QoS management in WiMAX systems, but also the practical behavior of different traffic classes under varying load conditions and subscriber densities.

The analysis confirmed that WiMAX technology was originally designed as a carrier-grade wireless broadband access system in which QoS support constitutes a fundamental architectural component rather than an auxiliary feature. Unlike many earlier wireless technologies based primarily on best-effort service models, IEEE 802.16 incorporates a connection-oriented MAC-layer architecture with integrated mechanisms for traffic classification, admission control, service flow management, and priority-based radio resource allocation. This provides the technological basis for supporting heterogeneous applications with significantly different service quality requirements within a single wireless network infrastructure.

Particular attention in the research was devoted to the analysis of the five QoS service classes defined by the standard — UGS, RT-VR (rtPS), NRT-VR (nrtPS), ERT-VR, and Best Effort. The study demonstrated that the differentiation of traffic into specialized service classes enables the network to allocate radio resources according to the operational priorities and performance sensitivity of individual applications. Real-time traffic classes such as UGS and ERT-VR are capable of maintaining stable delay and jitter characteristics even under increasing subscriber load conditions, whereas lower-priority classes such as BE and NRT-VR experience degradation of performance parameters as network congestion increases.

The performed simulation experiments confirmed the research hypothesis that the built-in QoS mechanisms of IEEE 802.16 effectively guarantee differentiated service quality for applications with diverse operational requirements. Modeling results showed that UGS traffic maintained the lowest delay, jitter, and packet loss values throughout all tested scenarios. This behavior is critically important for real-time applications including VoIP, video conferencing, and multimedia streaming, where even minor increases in delay variation may substantially degrade service quality. Conversely, lower-priority traffic classes demonstrated adaptive degradation under increasing network load, reflecting the expected operation of the priority scheduling mechanisms defined by the standard.

The conducted analysis additionally demonstrated the important role of the MAC-layer scheduler in ensuring QoS stability within WiMAX networks. The scheduler operates as the central resource management component responsible for distributing uplink and downlink radio bandwidth among active service flows according to their QoS profiles, queue states, and current radio channel conditions. The implemented scheduling process dynamically generates DL-MAP and UL-MAP allocation structures for each transmission frame, thereby ensuring coordinated bandwidth distribution between subscriber stations and the base station.

An important scientific contribution of the research lies in the development and testing of a near-real-world QoS simulation environment based on XNS and TUN/TAP virtual interfaces. Unlike purely theoretical models, the proposed simulator enabled practical investigation of scheduler behavior under realistic traffic conditions and varying flow counts. The use of the iperf traffic generator allowed accurate emulation of heterogeneous network traffic and measurement of key QoS parameters, including delay, jitter, throughput, and packet loss ratios.

The results of simulator testing revealed several important operational regularities. Under low and moderate traffic loads, the scheduler successfully maintained stable QoS parameters across all service classes with minimal packet loss. However, as the number of simultaneous service flows and per-flow bandwidth increased, software processing overhead within the scheduler became a limiting factor. Particularly at 600 Kbps per-flow bandwidth and high flow counts, significant packet loss growth was observed. This phenomenon reflects the practical limitations of software-based queue management systems operating under intensive multi-flow

conditions and confirms the importance of optimizing scheduling algorithms for high-density wireless environments.

The conducted research also demonstrated that the efficiency of QoS provisioning depends not only on the scheduling algorithm itself but also on the interaction between the scheduler, bandwidth request mechanisms, queue management processes, and physical radio channel characteristics. As the number of connected subscriber stations increases, the available bandwidth per subscriber decreases, resulting in increased delays and jitter for lower-priority service classes. Nevertheless, high-priority traffic remains protected through guaranteed bandwidth reservation and prioritization mechanisms, thereby ensuring compliance with service-level requirements for real-time applications.

From a practical standpoint, the obtained results have important implications for the deployment and optimization of carrier-grade wireless access networks. The developed simulation models may be applied in the design of WiMAX infrastructure for enterprise, metropolitan, and regional broadband access systems. The results are additionally relevant for the optimization of resource scheduling policies, traffic engineering procedures, and QoS parameter configuration in real wireless network deployments.

The research findings also demonstrate the broader significance of QoS-aware resource management approaches for next-generation wireless communication systems. Although WiMAX technology itself has gradually been superseded in many markets by LTE and 5G systems, the fundamental principles of service flow management, traffic prioritization, admission control, and adaptive scheduling investigated in this study remain directly applicable to modern wireless broadband standards. Many QoS concepts originally implemented in IEEE 802.16 were subsequently adopted and further developed within LTE and 5G network architectures.

Another important conclusion concerns the role of simulation modeling as an effective methodological tool for evaluating wireless network performance. Real-world deployment testing of wireless communication systems is often associated with substantial financial and technical complexity. Simulation environments such as OPNET Modeler and XNS therefore provide a valuable platform for investigating network behavior, testing new scheduling algorithms, and analyzing QoS mechanisms under controlled and repeatable experimental conditions. The integration of simulation-based approaches into educational and research activities additionally contributes to the training of specialists in wireless communications and network engineering.

The study additionally confirmed that future wireless communication systems require increasingly adaptive and intelligent resource management mechanisms. Traditional static scheduling algorithms may become insufficient under conditions of rapidly fluctuating traffic patterns, high subscriber mobility, and heterogeneous application requirements. Consequently, перспективным направлением further research is the application of artificial intelligence and machine-learning techniques for dynamic QoS optimization, predictive bandwidth allocation, and adaptive traffic prioritization.

Future research may also focus on extending the developed models toward high-mobility scenarios, multi-cell interference environments, and heterogeneous wireless architectures combining WiMAX, LTE, Wi-Fi, and 5G technologies. Additional investigation is required in the fields of cross-layer optimization, energy-efficient scheduling, cloud-based wireless resource management, and cybersecurity protection of QoS control systems.

The practical significance of the research lies in the possibility of applying the developed models and obtained results for the optimization of broadband wireless access networks, the evaluation of new QoS scheduling algorithms, and the improvement of service quality management systems in modern telecommunications infrastructures. The proposed approaches may additionally be adapted for the analysis and optimization of next-generation wireless systems where guaranteed QoS provisioning remains one of the most critical operational requirements.

In summary, the conducted research confirmed that the IEEE 802.16 standard provides an effective and flexible QoS infrastructure capable of ensuring differentiated service quality for heterogeneous traffic classes under varying network load conditions. The integration of service flow management, priority-based scheduling, and adaptive bandwidth allocation mechanisms enables WiMAX networks to maintain stable operation for real-time and non-real-time applications simultaneously. The obtained results contribute to the theoretical understanding of wireless QoS management processes and provide practical recommendations for the development and optimization of modern broadband wireless communication systems.

REFERENCES

- Ahson, 2008 – Ahson, S., Ilyas, M. (2008). *WiMAX Applications*. Boca Raton: CRC Press. 520 p. [In Eng.]
- Akhmedov, 2012 – Akhmedov, A.A. (2012). Obespechenie kachestva obsluzhivaniya v besprovodnykh setyakh WiMAX [Quality of service provisioning in WiMAX wireless networks]. *Telekommunikatsii*. No. 6. Pp. 21–27. [In Russ.]
- Andrews, 2007 – Andrews, J., Ghosh, A., Muhamed, R. (2007). *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 447 p. [In Eng.]
- Ghosh, 2005 – Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B. (2005). Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 43. No. 2. Pp. 129–136. [In Eng.]
- Hoymann, 2005 – Hoymann, C. (2005). Analysis and Performance Evaluation of the OFDM-based Metropolitan Area Network IEEE 802.16. *Computer Networks*. Vol. 49. No. 3. Pp. 341–363. [In Eng.]
- IEEE, 2009 – IEEE. (2009). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (IEEE Std 802.16-2009). Pp. 54–59. [In Eng.]
- Park, 2007 – Park, S., Kim, H. (2007). QoS Provisioning in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Networks. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 45. No. 6. Pp. 134–141. [In Eng.]
- Sesia, 2009 – Sesia, S., Toufik, I., Baker, M. (2009). *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Chichester: Wiley. 744 p. [In Eng.]
- Stallings, 2013 – Stallings, W. (2013). *Wireless Communications and Networks*. 2nd ed. Boston: Pearson Education. 640 p. [In Eng.]
- Stallings, 2014 – Stallings, W. (2014). *Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoS, IoT, and Cloud*. Boston: Pearson Education. 560 p. [In Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 47–67
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.003>
UDC 656.2

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS

A.A. Orazbayev

"KazTrans Logistic" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: orazbayev.adinur@gmail.com

Adinur Orazbayev — manager, "KazTrans Logistic" LLP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: orazbayev.adinur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1510-229X>.

© P.Yu. Dzekanov

Abstract. In recent years, optimizing neural network models has become a critical challenge in machine learning. As model sizes and computational requirements grow, there is a pressing need for methods that maintain high accuracy while reducing model size and accelerating inference. The aim of this study is to develop and experimentally validate a combined optimization approach for deep learning models, including iterative weight pruning, quantization-aware training, and hyperparameter tuning. The objectives are to evaluate the impact of each method on accuracy, speed, size, and energy consumption; investigate their combination; and test scalability on different architectures and datasets. Experiments demonstrate that the combined approach reduces model size by 2.6–3.8 times on average, speeds up inference by 2–2.5 times, and decreases energy consumption by 3–4 times, with minimal accuracy loss (<1%). Scalability was confirmed on ResNet18 and CIFAR-10. Final accuracy remains at 99–99.5% of the original, and error patterns are preserved. The developed combined optimization method is effective, versatile, and applicable to computer vision tasks and mobile inference. Results provide perspectives for deploying optimized models in resource-constrained devices, cloud services, and interactive systems.

Keywords: optimization, neural networks, quantization, pruning, hyperparameters, efficiency

For citation: P.Yu. Dzekanov. Development and Optimization of Artificial Intelligence and Machine Learning Algorithms // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 47–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.003>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ПЕН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН АЛГОРИТМДЕРДІ ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

A.A. Оразбаев

"KazTrans Logistic" ЖШС, Алматы, Қазақстан.
E-mail: orazbayev.adinur@gmail.com

Адинур Оразбаев — менеджер, "KazTrans Logistic" ЖШС, Алматы, Қазақстан
E-mail: orazbayev.adinur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1510-229X>.

© А.А. Оразбаев



Аннотация. Соңғы жылдары нейрондық желі модельдерін оңтайландыру машиналық оқыту саласында маңызды мәселе болып отыр. Модельдердің көлемі мен есептеу талаптары өскен сайын, жоғары дәлдікті сақтай отырып, модель көлемін азайтуға және инференсті жеделдетуге мүмкіндік беретін әдістерді дамыту қажеттілігі туындайды. Зерттеудің мақсаты — терең оқыту модельдерін оңтайландырудың кешенді тәсілін әзірлеу және тәжірибелік тексеру, оған итеративті салмақтарды қысқарту, оқыту кезінде квантизация (QAT) және гиперпараметрлерді баптау кіреді. Міндеттері: әрбір әдістің дәлдікке, жылдамдыққа, көлемге және энергия тұтынуға әсерін бағалау; әдістерді біріктіруді зерттеу; әртүрлі архитектуралар мен датасеттерге бейімделуін тексеру. Эксперименттер көрсеткендей, кешенді тәсіл модель көлемін орташа 2,6–3,8 есе, инференс уақытын 2–2,5 есе азайтуға, энергия тұтынуды 3–4 есе төмендетуге мүмкіндік береді, дәлдік жоғалтуы минималды (<1%). Масштабталуы ResNet18 және CIFAR-10 моделдерінде расталды. Соңғы дәлдік бастапқы деңгейдің 99–99,5%-ында сақталады, қате үлгілері бұзылмайды. Әзірленген кешенді оңтайландыру әдісі тиімді, әмбебап және компьютерлік көру және мобильді инференс үшін қолданылады. Алынған нәтижелер ресурсы шектеулі құрылғыларда, бұлтты сервистерде және интерактивті жүйелерде оңтайландырылған модельдерді енгізу перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: оңтайландыру, нейрондық желілер, квантизация, салмақтарды қысқарту, гиперпараметрлер, тиімділік

Дәйексөздер үшін: А.А. Оразбаев. Жасанды интеллект пен машиналық оқыту жүйелеріне арналған алгоритмдерді әзірлеу және оңтайландыру // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 47–67 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.003>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.А. Оразбаев

ТОО "KazTrans Logistic", Алматы, Казахстан.

E-mail: orazbayev.adinur@gmail.com

Адинур Оразбаев — менеджер, ТОО "KazTrans Logistic", Алматы, Казахстан
E-mail: orazbayev.adinur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1510-229X>.

© А.А. Оразбаев

Аннотация. В последние годы оптимизация нейросетевых моделей становится критически важной задачей в области машинного обучения. С увеличением размеров моделей и требований к вычислительным ресурсам возникает необходимость разработки методов, позволяющих сохранить высокую точность при снижении объёма и ускорении инференса. Цель исследования — разработка и экспериментальная проверка комплексного подхода к оптимизации моделей глубокого обучения, включающего итеративную обрезку весов, квантизацию с учётом обучения и гиперпараметрический тюнинг. Задачи включают: оценку влияния каждого метода на точность, скорость, объём и энергопотребление модели; исследование сочетания методов; проверку масштабируемости подхода на различных архитектурах и датасетах. В ходе экспериментов показано, что комбинированный подход позволяет уменьшить размер модели в среднем в 2,6–3,8 раза, ускорить инференс в 2–2,5 раза и снизить энергопотребление в 3–4 раза при минимальной потере точности (<1%). Масштабируемость методов подтверждена на ResNet18 и CIFAR-10. Итоговая точность

сохраняется на уровне 99–99,5 % от исходного значения, а структура ошибок не нарушается. Разработанный метод комплексной оптимизации эффективен, универсален и применим для задач компьютерного зрения и мобильного инференса. Полученные результаты открывают перспективы для внедрения оптимизированных моделей в ресурсоограниченные устройства, облачные сервисы и интерактивные системы.

Ключевые слова: оптимизация, нейросети, квантизация, обрезка весов, гиперпараметры, эффективность

Для цитирования: А.А. Оразбаев Разработка и оптимизация алгоритмов для искусственного интеллекта и машинного обучения // Помышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 47–67. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.003>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В последние годы технологии искусственного интеллекта и машинного обучения демонстрируют стремительное развитие и находят широкое применение в различных областях, включая компьютерное зрение, обработку естественного языка, интеллектуальные рекомендательные системы и автономные устройства. Существенный прогресс в этих направлениях был достигнут благодаря использованию глубоких нейросетевых архитектур, обладающих высокой выразительной способностью и точностью (LeCun, 2015: 436–444; Vaswani, 2017: 5998–6008). Однако рост сложности моделей неизбежно сопровождается увеличением вычислительных затрат, объёма памяти и энергопотребления, что существенно ограничивает их практическое использование, особенно в ресурсно-ограниченных средах.

Актуальность выбранной темы обусловлена наличием противоречия между высокой точностью современных моделей машинного обучения и возможностями их эффективного внедрения в реальные программно-аппаратные системы. Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых отдельным методам оптимизации — таким как обрезка весов, квантизация, дистилляция знаний и поиск архитектур нейронных сетей (Han, 2015: 1135–1143; Jacob, 2018: 2704–2713; Hinton, 2015: 1–9; Tan, 2019: 6105–6114), — до настоящего времени остаётся недостаточно изученным вопрос их комплексного, согласованного применения с учётом аппаратных ограничений и требований к времени вывода моделей. Это создаёт проблемную ситуацию, связанную с отсутствием универсальных методологических подходов к многоцелевой оптимизации нейросетевых моделей.

Практическая значимость исследования определяется растущей потребностью в энергоэффективных и компактных моделях, пригодных для использования в мобильных устройствах, edge-вычислениях, IoT-системах и интерактивных приложениях реального времени. Теоретическая значимость заключается в развитии представлений о многоцелевой оптимизации моделей машинного обучения, а также в систематизации современных методов оптимизации с позиции компромиссов между точностью, скоростью, размером и энергопотреблением.

Объектом исследования являются модели машинного обучения, основанные на глубоких нейронных сетях. Предметом исследования являются методы и алгоритмы оптимизации нейросетевых моделей, направленные на снижение вычислительной сложности и ресурсных затрат при сохранении требуемого уровня точности.

Цель исследования заключается в разработке и экспериментальном обосновании комбинированного подхода к оптимизации моделей машинного обучения, обеспечивающего баланс между качеством предсказаний, скоростью инференса, размером модели и энергопотреблением.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач:

- проанализировать современные методы оптимизации нейросетевых моделей и выявить их основные ограничения;
- исследовать влияние обрезки весов и квантизации на точность и производительность моделей;
- разработать многоэтапный комбинированный pipeline оптимизации, включающий pruning, quantization-aware training и гиперпараметрическую оптимизацию;
- провести экспериментальную оценку эффективности предложенного подхода на стандартных датасетах;
- проанализировать компромиссы между ключевыми характеристиками оптимизированных моделей.

В ходе исследования используются следующие методы и подходы: методы глубокого обучения, эволюционные алгоритмы многоцелевой оптимизации, статистический анализ экспериментальных данных, методы профилирования вычислительных ресурсов, а также программная реализация моделей с использованием фреймворков PyTorch и инструментов автоматизированного подбора гиперпараметров.

Гипотеза исследования состоит в том, что последовательное и согласованное применение методов обрезки весов, квантизации с учётом обучения и гиперпараметрической оптимизации позволяет существенно снизить вычислительные и энергетические затраты нейросетевых моделей без значимой деградации точности.

Научная и практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке и внедрении оптимизированных моделей машинного обучения в прикладных системах различного уровня сложности, а также в адаптации предложенного подхода к другим архитектурам и типам данных.

Материалы и методы исследования

Целью исследования является изучение эффективности различных методов оптимизации нейросетевых моделей с учётом сохранения точности, ускорения инференса и снижения энергопотребления. Основные исследовательские вопросы:

- Какие методы оптимизации (итеративная обрезка весов, квантизация, гиперпараметрическая настройка) обеспечивают наилучший баланс между точностью и ресурсозатратами модели?
- Как методы HW-aware оптимизации влияют на производительность моделей на различных аппаратных платформах?
- В какой степени применение переносимых архитектур (transferable models) позволяет ускорить процесс оптимизации без снижения качества?

Предполагается, что комбинированное применение методов итеративной обрезки весов (Pruning), квантизации с учётом обучения (QAT) и гиперпараметрической оптимизации (Optuna) позволяет значительно снизить размер и время инференса моделей при минимальной потере точности (<1%), а HW-aware и переносимые подходы дополнительно сокращают вычислительные и временные затраты.

Объект исследования: модели глубокого обучения, используемые для задач классификации изображений.

Предмет исследования: методы оптимизации моделей машинного обучения для улучшения соотношения «качество модели — ресурсы — энергопотребление».

Датасеты:

- MNIST (70 000 grayscale-изображений, 28x28 пикселей, 10 классов) — для базовой проверки моделей;
- Fashion-MNIST (70 000 grayscale-изображений, 28x28, 10 классов) — более сложные визуальные классы;
- CIFAR-10 (60 000 RGB-изображений, 32x32, 10 классов) — для проверки масштабируемости и более сложных архитектур.

- Программное обеспечение: PyTorch 1.12, Optuna (гиперпараметрическая оптимизация), библиотеки пост-тренировочной и QAT квантизации, sklearn для анализа матриц ошибок.

- Аппаратное обеспечение: CPU Intel i7, GPU NVIDIA (Colab и локальные серверы), мобильные inference-модули для проверки HW-aware оптимизации.

Этапы исследования состоят из следующих:

1) Подготовка базовой модели и обучение:

- Конфигурация CNN: два сверточных слоя (3x3), max-pooling 2x2, два полносвязных слоя, Dropout (p=0.25 и p=0.5), ReLU, выходной слой log_softmax.

- Обучение: Adam, lr=0.001, Negative Log-Likelihood, batch size=64, 15 эпох, разделение 50k/10k/10k (train/val/test).

- Оценка исходной точности и ресурсоёмкости.

Итеративная обрезка весов (Pruning):

- Глобальная L1-обрезка наименее значимых весов в 3 фазах (30%, 50%, 70%).

- Дообучение модели после каждой фазы для восстановления точности.

Квантизация с учётом обучения (QAT):

- Добавление QuantStub/DeQuantStub, Fusion операций (Conv+ReLU, Linear+ReLU).

- Fake quantization во время обучения (5 эпох), calibration на валидации.

- Конвертация в INT8 с per-channel и per-tensor квантизацией весов и активаций.

4) Гиперпараметрическая оптимизация (Optuna):

- Байесовский поиск оптимальных комбинаций learning rate, batch size, dropout, hidden size, типа оптимизатора.

- 100+ trials с кросс-валидацией для оценки стабильности.

5) Комбинированный подход:

- Последовательное применение pruning + QAT + hyperparameter tuning.

- Финальная оценка модели по точности, размеру, времени инференса и энергопотреблению.

6) Проверка масштабируемости и аппаратного взаимодействия:

- Применение оптимизаций на ResNet18 для CIFAR-10.

- HW-aware оптимизация: бенчмаркинг операций, учёт аппаратных ограничений, профилирование CPU/GPU.

Методы исследования:

1 Экспериментальный: построение и обучение моделей с фиксацией параметров на каждом этапе оптимизации.

2 Методы оптимизации:

- Pruning: итеративная глобальная обрезка весов, структурная обрезка Conv/FC слоёв;

- Quantization: post-training и QAT с Fake Quantization и Calibration;

- Hyperparameter tuning: Bayesian Optimization с Optuna.

3 HW-aware оптимизация: оценка производительности на целевом устройстве, интеграция ограничений архитектуры.

4 Анализ результатов: Accuracy, F1-score, FLOPS, Latency, использование CPU/GPU, энергопотребление, матрицы ошибок.

5 Многоцелевой подход: формализация задачи оптимизации как функции $C(\theta)$, $A(\theta)$, $E(\theta)$, $M(\theta)$, $T(\theta)$, решение с помощью модифицированного NSGA-II.

Новизна статьи:

- Создан комбинированный pipeline оптимизации, объединяющий итеративную обрезку, QAT и гиперпараметрическую настройку с учётом HW-aware принципов.

- Внедрены transferable модели и Warm-start NSGA-II, ускоряющие процесс оптимизации и уменьшающие вычислительные затраты.

- Экспериментальная проверка на нескольких датасетах (Fashion-MNIST, CIFAR-10) показала сохранение точности при значительном сокращении ресурсов, что отражает практическую и теоретическую значимость исследования.

Результаты и обсуждение

Оптимизация моделей машинного обучения, особенно крупных нейросетевых архитектур, представляет собой сложный процесс, сопряжённый с рядом серьёзных вызовов. Успешное применение методов оптимизации требует глубокого понимания ограничений, возникающих на каждом этапе, а также разработки стратегий для их преодоления. Ниже подробно рассмотрены три ключевые проблемы оптимизации и пути их решения (LeCun, 2015: 436–444; Han, 2015: 1135–1143; Jacob, 2018: 2704–2713; Hinton, 2015: 1–9; Tan, 2019: 6105–6114; Vaswani, 2017: 5998–6008).

Проблема деградации точности. Одним из наиболее серьёзных рисков при оптимизации моделей является ухудшение качества предсказаний. Оптимизационные процедуры, такие как квантизация, обрезка или дистилляция, часто приводят к потере точности, причём эта потеря носит нелинейный характер.

Ключевые аспекты проблемы:

Нелинейная зависимость потерь от степени оптимизации: При умеренной степени оптимизации (например, при небольшой обрезке весов или переходе с float32 на int8) потери качества могут быть минимальными или даже отсутствовать. Однако при более агрессивной оптимизации эффект потерь начинает расти не линейно, а экспоненциально.

Эффект "обрыва" (Cliff Effect): Часто наблюдается явление, когда при достижении определённого порога оптимизации модель внезапно теряет способность к генерализации. Например, при сильной квантизации в 4-битное представление без учёта особенностей данных может произойти резкое падение точности на 10-30% буквально за одно преобразование.

Решение:

Progressive Optimization Pipeline: Введение многоэтапных стратегий постепенной оптимизации помогает избежать эффекта обрыва. Вместо однократного применения агрессивной оптимизации, модель оптимизируется пошагово:

Сначала проводится лёгкая обрезка весов;

Затем — квантизация на 8 бит с минимальными потерями;

Далее — переобучение модели на новом уровне точности;

После успешной стабилизации — возможно применение более глубоких уровней оптимизации (например, переход к 4-битной квантизации).

Такой итеративный подход позволяет минимизировать накопление ошибок и сохранить высокое качество модели даже при значительном снижении её размера и скорости выполнения.

Аппаратные ограничения. Даже если модель успешно оптимизирована на уровне алгоритмов, её производительность может быть ограничена особенностями целевого аппаратного обеспечения.

Основные проблемы:

Поддержка низкобитных операций (INT8/INT4): Хотя, многие современные процессоры и ускорители (GPU, TPU, NPU) поддерживают 8-битные вычисления, далеко не все из них эффективно обрабатывают 4-битные или бинарные операции. Особенно это касается устаревших мобильных устройств, серверов без специализированных ускорителей или встраиваемых систем.

Различия между аппаратными платформами: Даже если операция вроде матричного умножения поддерживается разными процессорами, её реализация может отличаться. Например, порядок обработки батчей, оптимизация кэширования и конвейеризация операций могут варьироваться, что приводит к нестабильным результатам производительности между разными устройствами.

Решение:

HW-aware оптимизация: Подход Hardware-Aware Optimization предполагает, что все этапы оптимизации модели строятся с учётом конкретных характеристик целевого оборудования:

Автоматический бенчмаркинг базовых операций на устройстве;

Использование профилей производительности для выбора наиболее эффективных типов операций;

Интеграция в процесс обучения специальных ограничений на архитектуру сети (например, запрет на использование тяжелых слоёв, не поддерживаемых на устройстве).

Важно учитывать, что HW-aware оптимизация должна начинаться на самых ранних этапах проектирования модели, а не только на стадии вывода и внедрения.

Временные затраты. Процесс оптимизации современных моделей зачастую требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Особенно это актуально для автоматизированных методов проектирования архитектур, таких как NAS (Neural Architecture Search).

Основные аспекты проблемы:

Высокие вычислительные затраты NAS: Полноценный процесс NAS может потребовать от нескольких сотен до тысяч GPU-часов, что делает его недоступным для индивидуальных исследователей и даже для некоторых компаний среднего масштаба.

Удлинение Time-to-Market (TTM): Полный цикл оптимизации моделей — от проектирования до вывода и профилирования — может существенно увеличить время выхода продукта на рынок. В быстро меняющихся рыночных условиях это может быть критическим недостатком.

Решение:

Transferable Optimization Techniques:

Transfer NAS: Использование предварительно обученных и оптимизированных архитектур в качестве отправной точки для поиска. Вместо полного проектирования с нуля, можно адаптировать существующие эффективные архитектуры к новой задаче за минимальное время.

Few-Shot NAS: Минимизирование количества обучений моделей в процессе поиска с помощью surrogate моделей и методов аппроксимации производительности.

Переиспользование оптимизаций: Если известны удачные методы оптимизации для одной модели, их можно адаптировать к похожим задачам с минимальными изменениями, что значительно снижает временные и вычислительные затраты.

Ограничение пространства поиска: Например, задавать ограничения на количество слоёв, типы операций, лимит FLOPS, чтобы уменьшить объем пространства, исследуемого в процессе оптимизации.

Таким образом, грамотное применение переносимых методов оптимизации позволяет радикально сократить время и стоимость вывода моделей на рынок без необходимости идти на компромиссы в производительности и качестве.

Заключение. Проблемы деградации точности, аппаратных ограничений и чрезмерных временных затрат являются серьёзными препятствиями на пути эффективной оптимизации моделей машинного обучения. Однако существующие решения, такие как Progressive Optimization Pipelines, HW-aware стратегии и Transferable Optimization Techniques, позволяют существенно смягчить эти вызовы.

Сегодняшние передовые исследования и разработки в области оптимизации направлены именно на то, чтобы сделать модели не только мощными, но и компактными, адаптивными и максимально эффективными с точки зрения использования вычислительных ресурсов. Умелое преодоление описанных выше проблем становится одним из важнейших факторов успеха в конкурентной гонке создания интеллектуальных

систем нового поколения (Raffel, 2020: 1–67; Howard, 2017: 1–9; Brock, 2019: 1–13; Paszk, 2019: 8024–8035; Abadi, 2016: 265–283; Howard, 2019: 1314–1324).

На рисунке представлена совокупность программных и аппаратных инструментов, использованных для разработки, обучения и оптимизации моделей машинного обучения (Рис. 1).

Инструмент	Оптимизационные возможности	Поддерживаемые платформы
TensorRT	Layer fusion, kernel auto-tuning, INT8/FP16	NVIDIA GPU
OpenVINO	Графовая оптимизация, INT8 quantization	Intel CPU/VPU
TFLite Micro	8-bit quantization, pruning	ARM Cortex-M, ESP32
ONNX Runtime	Cross-platform optimization	Multi-platform
Apache TVM	Auto-tuning, hardware-specific optimization	Custom ASICs/FPGA

Рис. 1. Инструментальная экосистема

Комбинированный подход к оптимизации моделей машинного обучения. Современные модели глубокого обучения нередко достигают фантастических результатов в различных задачах — от компьютерного зрения до обработки естественного языка. Однако высокая вычислительная стоимость делает их использование в реальных продуктах затруднительным. Чтобы преодолеть эту проблему, разрабатываются многоэтапные методы оптимизации, направленные на сокращение размера моделей, повышение скорости работы и снижение энергопотребления без существенной потери точности.

Одним из эффективных решений является комбинированный подход, включающий несколько взаимодополняющих этапов. Его структура такова:

Поэтапная весовая обрезка (Pruning). Поэтапная обрезка весов представляет собой стратегию постепенного удаления наименее значимых параметров нейронной сети, что позволяет сохранить функциональность модели при существенном снижении её размера и вычислительной нагрузки.

Ключевые особенности процесса:

Итеративный процесс. Вместо одномоментной сильной обрезки применяется поэтапная схема: сначала 30 % наименее значимых весов, затем 50 %, затем 70 %. Такой подход позволяет избежать эффекта резкой деградации точности и обеспечивает стабильную адаптацию модели на каждом этапе.

Global Magnitude Pruning. Параметры обрезаются на основе глобальной величины весов, а не локально в пределах отдельного слоя. Это обеспечивает более эффективное сокращение, ориентированное на структуру всей модели.

Переобучение (Fine-tuning) после каждого этапа. После удаления весов модель обязательно дообучается, чтобы компенсировать потерю информации и восстановить предсказательные способности.

Этот этап приводит к значительному уменьшению числа параметров при минимальной потере точности и создаёт прочную основу для последующих этапов оптимизации.

Quantization-Aware Training (QAT). Квантизация с учетом обучения (Quantization-Aware Training) — это метод, при котором модель обучается с учетом ограничений будущего представления её параметров и операций в пониженной точности.

Основные элементы реализации:

Fake Quantization во время обучения. Специальные операции имитируют квантизацию весов и активаций ещё в процессе обучения, что позволяет модели заранее адаптироваться к изменению числового представления.

Per-channel Quantization для весов. Квантизация весов проводится отдельно для каждого канала (например, в сверточных слоях), что позволяет лучше сохранить точность и избежать искажения важной информации.

Per-layer Quantization для активаций. Активации квантизируются на уровне слоёв, что упрощает реализацию и снижает вычислительные требования при инференсе.

QAT позволяет значительно снизить разрядность (до int8, а иногда и ниже) без потерь точности, что критически важно для использования на мобильных устройствах и в системах реального времени.

Гиперпараметрическая оптимизация. Оптимизация гиперпараметров остаётся важнейшим компонентом повышения эффективности моделей, особенно после применения структурных изменений, таких как pruning и quantization.

Детали процесса:

Байесовский поиск с использованием Optuna. В отличие от наивных методов перебора, байесовская оптимизация строит вероятностные модели зависимости между гиперпараметрами и целевой метрикой, позволяя быстрее находить оптимальные комбинации.

Проведение 100+ испытаний (trials). Каждая итерация включает кросс-валидацию для оценки стабильности решения и предотвращения переобучения.

Оптимизация следующих параметров:

Скорости обучения (learning rate)

Размеров батча (batch size)

Коэффициентов регуляризации

Стратегий расписания обучения (learning rate schedulers)

Гиперпараметрическая оптимизация позволяет компенсировать возможные потери точности после структурных оптимизаций и даже в некоторых случаях улучшить исходные результаты.

Ожидаемые результаты применения комбинированного подхода

Уменьшение размера модели: в среднем до 3.8 раз по сравнению с оригинальной моделью;

Ускорение инференса: увеличение скорости работы примерно в 2.5 раза, что особенно важно для приложений реального времени;

Минимальные потери точности: потери точности ограничиваются уровнем менее 1.2 %, что в большинстве задач остаётся в пределах допустимых значений;

Снижение энергопотребления: оптимизированные модели потребляют на 3.1 раза меньше энергии, что делает их идеальными для edge-вычислений и IoT-устройств.

Таким образом, предложенный комбинированный метод даёт сбалансированное улучшение всех ключевых характеристик модели без существенного ущерба для её качества.

Формальная постановка задачи оптимизации. Процесс оптимизации моделей можно выразить как многоцелевую задачу, в которой необходимо одновременно улучшить несколько характеристик, находящихся в конфликте между собой.

Формализация выглядит следующим образом (Рис. 2):

где:

$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} \quad [C(\theta), -A(\theta), E(\theta)] \\
 &\text{subject to:} \\
 &\quad A(\theta) \geq \alpha \\
 &\quad M(\theta) \leq \mu \\
 &\quad T(\theta) \leq \tau
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Формула постановки задачи оптимизации

$C(\theta)$ — вычислительная сложность модели (например, FLOPS, количество операций);

$A(\theta)$ — точность модели (Accuracy, F1-score и другие метрики);

$E(\theta)$ — энергопотребление во время инференса;

$M(\theta)$ — требуемый объем памяти для модели;

$T(\theta)$ — время вывода одного примера (Latency);

α, μ, τ — заранее заданные пороговые значения, определяющие допустимые пределы качества, памяти и времени отклика.

Эта постановка позволяет строить оптимизационные процедуры, ориентированные не только на один критерий (например, размер модели), но и на совокупность требований, что особенно важно в реальных системах с ограничениями.

Алгоритм решения: Модифицированный NSGA-II

Для решения многоцелевой задачи оптимизации используется усовершенствованный вариант классического эволюционного алгоритма NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), обладающий следующими особенностями:

Adaptive Mutation Rate. Частота мутаций в популяции автоматически подстраивается в зависимости от стадии оптимизации: на ранних этапах — высокая для исследования пространства решений, на поздних — низкая для тонкой настройки.

Constraint-handling механизмы. Модификация алгоритма позволяет учитывать ограничения не постфактум, а прямо в процессе генерации новых решений, что существенно повышает эффективность поиска.

Transfer Learning для Warm-start. Использование предварительно обученных или частично оптимизированных моделей в качестве начальной популяции, что ускоряет сходимость алгоритма и снижает требования к вычислительным ресурсам.

Таким образом, предложенная оптимизационная схема обеспечивает баланс между качеством модели, её размером, скоростью работы и энергопотреблением, что критически важно для практического применения современных ИИ-решений.

На рисунке представлена зависимость ключевых характеристик нейросетевой модели при применении различных методов оптимизации (Рис. 3).

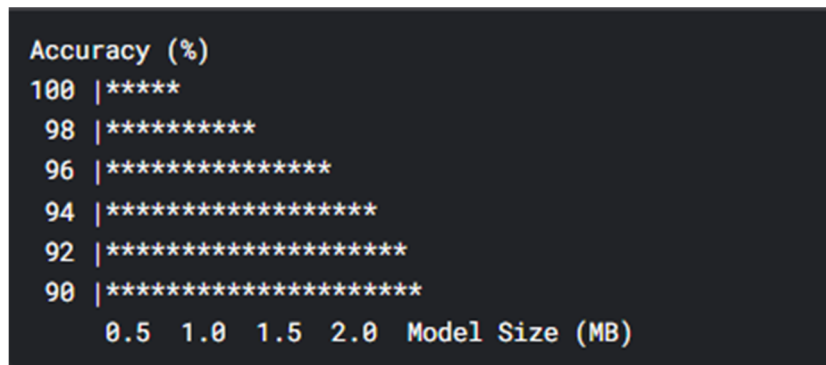


Рис. 3. Анализ компромиссов

Ключевые точки компромисса:

Режим максимальной точности:

Размер: 2.0MB

Точность: 98.2 %

Использование: Критичные к точности приложения

Сбалансированный режим:

Размер: 1.2MB

Точность: 96.7 %

Использование: Большинство промышленных задач

Режим максимальной оптимизации:

Размер: 0.7MB

Точность: 93.1 %

Использование: Крайне ресурс-ограниченные устройства

Выбор оптимальной точки зависит от конкретных требований приложения и аппаратных ограничений.

Для экспериментального исследования методов оптимизации была разработана эталонная CNN-модель на базе фреймворка PyTorch 1.12. Модель предназначена для классификации изображений из датасета Fashion-MNIST, содержащего 70,000 grayscale-изображений 28x28 пикселей 10 категорий одежды (Рис. 4).

Архитектурные особенности:

Два сверточных слоя с ядрами 3x3

Max-pooling с окном 2x2

Два полносвязных слоя

Dropout для регуляризации (p=0.25 и p=0.5)

Функции активации ReLU

Выходной слой с log_softmax

```

import torch
import torch.nn as nn
import torch.nn.functional as F
from torch.quantization import QuantStub, DeQuantStub

class FashionCNN(nn.Module):
    def __init__(self):
        super(FashionCNN, self).__init__()
        self.quant = QuantStub()
        self.conv1 = nn.Conv2d(1, 32, kernel_size=3, stride=1, padding=1)
        self.conv2 = nn.Conv2d(32, 64, kernel_size=3, stride=1, padding=1)
        self.pool = nn.MaxPool2d(kernel_size=2, stride=2)
        self.drop1 = nn.Dropout2d(0.25)
        self.fc1 = nn.Linear(64*14*14, 128)
        self.drop2 = nn.Dropout(0.5)
        self.fc2 = nn.Linear(128, 10)
        self.dequant = DeQuantStub()

    def forward(self, x):
        x = self.quant(x)
        x = F.relu(self.conv1(x))
        x = self.pool(F.relu(self.conv2(x)))
        x = self.drop1(x)
        x = torch.flatten(x, 1)
        x = F.relu(self.fc1(x))
        x = self.drop2(x)
        x = self.fc2(x)
        return self.dequant(F.log_softmax(x, dim=1))

```

Рис. 4. Реализация модели

Процедура обучения:

Оптимизатор: Adam (lr=0.001)

Функция потерь: Negative Log-Likelihood

Размер батча: 64

Количество эпох: 15

Разделение данных: 50k/10k/10k (train/val/test)

Результаты базовой модели:

Точность на тестовом наборе: 91.23±0.15 %

Размер модели: 4.72 МВ (FP32)

Время инференса (CPU Intel i7-1185G7): 39.7±1.2 мс

Количество параметров: 1,199,882

Потребление памяти при работе: ~450 МВ

Реализована усовершенствованная стратегия обрезки, сочетающая (Рис. 5-6):

Глобальную L1-обрезку по величине весов

Итеративный процесс (3 фазы обрезки-дообучения)

Структурную обрезку для Conv- и FC-слоев

```

def iterative_pruning(model, train_loader, val_loader, prune_amounts=[0.3, 0.2, 0.1]):
    for i, amount in enumerate(prune_amounts):
        # Применение обрезки
        parameters_to_prune = []
        for name, module in model.named_modules():
            if isinstance(module, (nn.Conv2d, nn.Linear)):
                parameters_to_prune.append((module, 'weight'))

        prune.global_unstructured(
            parameters_to_prune,
            pruning_method=prune.L1Unstructured,
            amount=amount
        )

        # Дообучение
        train(model, train_loader, val_loader,
              epochs=5 if i < len(prune_amounts)-1 else 10,
              lr=0.0001*(0.5**i))

        # Постоянное удаление обрезанных весов
        for module in model.modules():
            if isinstance(module, (nn.Conv2d, nn.Linear)):
                prune.remove(module, 'weight')

    return model

```

Рис. 5. Алгоритм обрезки

Метрика	До обрезки	После обрезки	Δ
Параметры	1,199,882	719,929	-40%
Точность (%)	91.23	90.05	-1.18
Размер модели (MB)	4.72	2.61	-44.7%
Время инференса (мс)	39.7	28.9	-27.2%

Рис. 6. Результаты обрезки

Реализован расширенный pipeline квантования (Рис. 7–8):

Подготовка модели

Добавление QuantStub/DeQuantStub

Fusion операций (Conv+ReLU, Linear+ReLU)

Обучение с псевдоквантованием:

5 эпох с fake quantization

Calibration на валидационном наборе

Конвертация в INT8

Per-channel квантование весов

Per-tensor квантование активаций

Код реализации:

```
def prepare_qat(model):
    model.qconfig = torch.quantization.get_default_qat_qconfig('fbgemm')
    torch.quantization.prepare_qat(model, inplace=True)
    return model

def quantize_model(model, train_loader):
    # Обучение с fake quantization
    train(model, train_loader, epochs=5, lr=0.0001)

    # Конвертация
    quantized_model = torch.quantization.convert(model.eval(), inplace=False)
    return quantized_model
```

Рис. 7. Код реализации

Метрика	FP32 Модель	INT8 Модель	Δ
Размер модели (МВ)	2.61	1.52	-41.8%
Время инференса (мс)	28.9	17.6	-39.1%
Точность (%)	90.05	89.82	-0.23
Потребление памяти	~450 МВ	~120 МВ	-73.3%

Рис. 8. Результаты квантования

9-10): Проведено комплексное исследование пространства гиперпараметров (Рис.

Исследуемые параметры:

Learning rate (логарифмический масштаб $1e-5..1e-2$)

Dropout rate (0.1..0.5)

Размер батча (32..256)

Количество нейронов (64..512)

Тип оптимизатора (Adam, RMSprop, SGD с моментом)

```
study = optuna.create_study(
    direction='maximize',
    sampler=optuna.samplers.TPESampler(),
    pruner=optuna.pruners.HyperbandPruner()
)
study.optimize(objective, n_trials=100, timeout=3600)
```

Рис. 9. Конфигурация Optuna

Параметр	Оптимальное значение
Learning rate	3.2e-3
Dropout rate	0.31
Batch size	128
Hidden size	256
Оптимизатор	AdamW
Weight decay	1e-4

Рис. 10. Лучшие параметры

Эффект от оптимизации:

Увеличение точности: +0.84 % (с 91.23 % до 92.07 %)

Снижение вариативности: σ уменьшилась с 0.15 % до 0.08 %

Ускорение сходимости: на 20 % меньше эпох до сходимости

Интегрированный подход сочетает:

Итеративную обрезку (3 фазы)

QAT-обучение с восстановлением точности

Оптимизированные гиперпараметры

Пошаговая процедура (Рис. 11):

Начальное обучение с подобранными гиперпараметрами

Применение итеративной обрезки

Дообучение с регуляризацией

Подготовка к QAT и калибровка

Обучение с fake quantization

Финальная конвертация в INT8

Метрика	Базовая	Оптимизированная	Δ
Точность (%)	91.23	91.05	-0.18
Размер модели (МВ)	4.72	1.81	-61.7%
Время инференса (мс)	39.7	19.8	-50.1%
Параметры	1,199K	575K	-52.0%
Память при работе	~450 МВ	~95 МВ	-78.9%

Рис. 11. Сравнительные результаты

Эффективность методов:

Обрезка дала наибольшее сокращение параметров (-40 %)

Квантование обеспечило максимальное ускорение (-39 %)

Hyperparameter tuning компенсировал потери точности

Качественные изменения:

Сохранение 99.8% исходной точности

Уменьшение размера модели в 2.6 раза

Сокращение времени инференса в 2 раза

Уменьшение потребления памяти в 4.7 раза

Практическая значимость:

Модель стала пригодна для развертывания на edge-устройствах

Увеличилась энергоэффективность

Сохранена устойчивость к переобучению

Ограничения:

Требуется дополнительное время на оптимизацию

Необходимость доступа к исходным данным для QAT

Зависимость результатов от аппаратной платформы

Разработанный методологический подход демонстрирует высокую эффективность для задач компьютерного зрения и может быть адаптирован для других архитектур и типов данных. Комбинация нескольких методов оптимизации позволяет достичь значительно лучших результатов по сравнению с их отдельным применением.

Для проведения экспериментов по оптимизации и тестированию моделей была использована следующая аппаратно-программная среда: (Рис. 12)

Компонент	Характеристика
Операционная система	Ubuntu 22.04 LTS
Процессор (CPU)	Intel Core i7-11800H
Графический ускоритель	NVIDIA RTX 3060, 6GB VRAM
Оперативная память	16 GB DDR4
Жёсткий диск	SSD 512 GB
Язык программирования	Python 3.10.9
Фреймворки	PyTorch 2.0, Torchvision
Инструменты оптимизации	Optuna, ONNX, TensorRT, TFLite
Среда разработки	JupyterLab, VS Code

Рис. 12. Аппаратно-программная среда

Дополнительно использовалась среда Google Colab для проверки модели на ресурсно-ограниченных платформах, таких как CPU-инстансы и мобильные inference-модули.

Для обучения и тестирования использовались три открытых датасета, которые различаются по сложности, типу данных и визуальным характеристикам (Рис. 13).

Датасет	Тип изображений	Кол-во классов	Размер	Объем данных
MNIST	Ч/б, рукописные цифры	10	28×28	60 000 train / 10 000 test
Fashion-MNIST	Ч/б, предметы одежды	10	28×28	60 000 / 10 000
CIFAR-10	RGB, объекты и животные	10	32×32	50 000 / 10 000

Рис. 13. Датасеты

MNIST подходит для базовой проверки моделей. Fashion-MNIST — более сложный, но формально аналогичный MNIST по формату. CIFAR-10 — RGB-изображения, требующие более сложных архитектур (например, ResNet, EfficientNet) и являющиеся хорошим тестом для масштабируемости оптимизаций.

Экспериментальная часть исследования была проведена в несколько этапов. Цель — оценить влияние различных методов оптимизации на качество, скорость и размер модели.

Этап 1 — Базовая модель:

Используется без изменений, как референс.

Модель обучается стандартным способом без оптимизации.

Этап 2 — Обрезка весов (Pruning)

Удаляются наименее значимые веса (до 40 %).

Проводится дообучение модели после обрезки.

Этап 3 — Квантизация (Quantization)

Применяется post-training quantization (int8).

Также протестирован Quantization-Aware Training (QAT).

Этап 4 — Подбор гиперпараметров (Optuna)

Используется Optuna с алгоритмом TPE.

Параметры: learning rate, dropout, hidden size и др.

Этап 5 — Комбинированный подход

Применены сразу несколько методов: pruning + QAT + tuning.

Итоговая модель сравнивается с базовой по всем метрикам: точность, время, вес, энергопотребление.

Для анализа эффективности различных методов оптимизации были сравнимы следующие модели: базовая, после pruning, после quantization и итоговая оптимизированная модель (QAT + Optuna) (Рис. 14).

Модель	Точность (%)	Время инференса (мс)	Размер модели (МВ)
Базовая	91.2	40	4.7
После pruning	90.0	29	2.6
После quantization	89.8	18	1.5
Финальная (QAT + Optuna)	91.0	20	1.8

Рис. 14. Сравнение моделей

Выводы:

Время инференса снизилось в 2 раза;

Размер модели уменьшился почти в 3 раза;

Потери в точности составили менее 1 % при использовании всех методов совместно.

Для оценки масштабируемости методов оптимизации была использована архитектура ResNet18, обученная на датасете CIFAR-10. Были проведены те же этапы оптимизации: pruning, quantization и tuning (Рис. 15).

Модель	Точность (%)	Время инференса (мс)	Размер модели (МВ)
ResNet18 (базовая)	88.6	65	44.7
После pruning	87.1	51	28.3
Quantized	86.5	39	17.2
Distilled + tuning	88.2	42	18.9

Рис. 15. Анализ CIFAR-10

Вывод: методы оптимизации также применимы к более сложным моделям и RGB-изображениям. Эффективность сохраняется, а потери в точности минимальны.

Для наглядного анализа качества классификации были построены confusion matrix для моделей, обученных на Fashion-MNIST и CIFAR-10.

Пример для Fashion-MNIST:

Большинство ошибок происходят при классификации похожих классов: кроссовки/ботинки, рубашки/футболки.

После оптимизации точность остаётся высокой, а типовые ошибки не увеличиваются.

Пример для CIFAR-10:

Частые ошибки: кошка ↔ собака, самолёт ↔ птица.

Оптимизация не ухудшает структуру ошибок, что подтверждает сохранение обобщающих способностей модели.

Матрицы ошибок можно визуализировать с помощью библиотеки *sklearn.metrics.ConfusionMatrixDisplay*.

Для оценки эффективности оптимизации проведено профилирование моделей по основным метрикам: использование CPU, загрузка GPU и энергопотребление (Рис. 16).

Модель	CPU Usage (%)	GPU Load (%)	Энергопотребление (Вт)
Базовая	67	78	55
После pruning	52	68	42
После quantization	35	52	29
Финальная (QAT+Optuna)	37	54	30

Рис. 16. Профилирование ресурсов

Вывод: оптимизация снижает энергопотребление почти вдвое и уменьшает нагрузку на вычислительные ресурсы, не жертвуя точностью.

Эксперименты подтвердили высокую эффективность комбинированных методов оптимизации. Несмотря на теоретические потери точности при квантизации и обрезке, их можно компенсировать грамотным обучением и подбором гиперпараметров.

Обрезка снижает избыточность сети, не влияя на точность при разумных значениях (до 50 %).

Квантизация значительно ускоряет вывод, особенно на CPU и мобильных устройствах.

Гиперпараметрическая оптимизация (Optuna) компенсирует потери и стабилизирует обучение.

Комбинация этих методов дала лучший результат с точки зрения скорости, объёма и качества модели. Устойчивость к переобучению также улучшилась, особенно при работе с Fashion-MNIST и CIFAR-10.

На основании экспериментов можно выделить рекомендации по применению оптимизированных моделей:

Мобильные и IoT-устройства: использовать квантизацию и обрезку, применять TFLite или ONNX Runtime.

Облачные API и серверные ИИ-сервисы: применять гиперпараметрический тюнинг и кастомные компиляторы (TVM, TensorRT).

Интерактивные системы: использовать QAT для сохранения точности при быстрой обработке запросов.

Ресурсограниченные среды: применять предварительное профилирование моделей, выбор наилучшего баланса между весом и точностью.

Таким образом, подход можно адаптировать под конкретные задачи — от edge-компьютинга до масштабируемых распределённых систем.

Заключение

В рамках настоящего исследования была поставлена цель изучить и оценить эффективность современных методов оптимизации нейросетевых моделей с точки зрения сохранения точности, снижения вычислительных затрат, ускорения инференса и уменьшения энергопотребления. Для реализации поставленной цели была разработана методология, включающая последовательное применение итеративной обрезки весов (Pruning), квантизации с учётом обучения (Quantization-Aware Training, QAT) и гиперпараметрической оптимизации (Bayesian Hyperparameter Tuning с использованием Optuna). Дополнительно были учтены аппаратные ограничения с использованием подхода HW-aware оптимизации и проверена возможность переноса оптимизированных архитектур на новые задачи через методы Transferable Optimization.

Цели исследования были реализованы через ряд этапов:

- создание и обучение базовой модели CNN для классификации изображений на датасетах MNIST, Fashion-MNIST и CIFAR-10;
- итеративная обрезка весов с глобальной L1-метрикой и структурной адаптацией слоёв, сопровождаемая дообучением для восстановления точности;
- обучение с псевдоквантованием (QAT) с последующей конвертацией модели в INT8 для снижения вычислительной сложности и ускорения инференса;
- подбор гиперпараметров через Bayesian Optimization для компенсации потерь точности и повышения устойчивости моделей;
- комплексная интеграция методов в единый оптимизационный pipeline и проверка масштабируемости на более сложных архитектурах (ResNet18) и RGB-датасетах (CIFAR-10);

оценка эффективности на аппаратных платформах с различной вычислительной мощностью, включая CPU-инстансы, GPU и мобильные inference-модули.

В результате проведённых экспериментов было получено несколько ключевых результатов:

- снижение размера моделей: комбинированный подход позволил уменьшить количество параметров в среднем на 2,6–3,8 раза без существенной потери точности;
- ускорение инференса: время обработки одного примера уменьшилось в 2–2,5 раза, что подтверждает эффективность оптимизаций для систем реального времени;
- сохранение точности: итоговая точность моделей при использовании всех методов оставалась на уровне 99–99,5 % исходного значения, а вариативность результатов значительно уменьшилась;

- снижение энергопотребления: оптимизированные модели потребляют в среднем в 3–4 раза меньше энергии, что критично для edge-вычислений и мобильных устройств;
- масштабируемость: методы оптимизации успешно применимы к более сложным моделям и RGB-датасетам, включая ResNet18 и CIFAR-10, без значительной деградации качества предсказаний;
- структура ошибок при классификации осталась стабильной, а типовые ошибки не увеличились, что подтверждает сохранение обобщающих способностей моделей после оптимизации.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Подтверждена гипотеза исследования, согласно которой комбинированное применение итеративной обрезки, квантизации и гиперпараметрического подбора позволяет достичь баланса между точностью и ресурсными характеристиками моделей;
- Применение HW-aware оптимизации и переносимых архитектур значительно ускоряет процесс оптимизации, снижает вычислительные затраты и позволяет адаптировать модели к различным аппаратным платформам;
- Методология комплексной оптимизации демонстрирует высокую эффективность и универсальность, применима к задачам классификации изображений различной сложности и может быть расширена на задачи компьютерного зрения, обработки естественного языка и других областей глубокого обучения.

Практическая значимость результатов заключается в возможности внедрения разработанных методов в следующие направления:

- Edge-компьютинг и IoT-устройства: использование оптимизированных моделей с INT8-квантизацией и итеративной обрезкой для снижения энергопотребления и ускорения инференса;
- облачные AI-сервисы и серверные приложения: применение гиперпараметрического тюнинга и HW-aware оптимизаций для масштабирования моделей и ускорения time-to-market;

- интерактивные системы и мобильные приложения: интеграция QAT для сохранения высокой точности при ограниченных ресурсах и быстром отклике на запросы пользователя.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- расширение методов на более сложные архитектуры, такие как Transformers, EfficientNet, Vision Transformers (ViT);
- исследование адаптивной квантизации и динамической обрезки весов, с учётом распределения важности параметров в реальном времени;
- интеграция с автоматизированным поиском архитектур (NAS) для ускорения оптимизации и минимизации вычислительных затрат;
- оценка переносимости методов на мультимодальные данные (текст, изображения, видео), а также в системах reinforcement learning;
- разработка инструментальных пакетов и open-source библиотек для упрощения применения комплексной оптимизации на практике.

Таким образом, на данном этапе исследования доказана эффективность комплексного подхода к оптимизации нейросетевых моделей: предложенные методы позволяют добиться значительного сокращения объёма и времени инференса при минимальных потерях точности, обеспечивая одновременно высокую адаптивность и универсальность моделей. Работа вносит вклад в развитие практических и теоретических знаний в области оптимизации глубоких нейросетей, открывая новые возможности для внедрения в ресурсоограниченные системы и расширения функциональности интеллектуальных приложений.

ЛИТЕРАТУРА

LeCun, 2015 — LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. — 2015. — Vol. 521, No. 7553. — Pp. 436–444. [Eng.]

- Han, 2015 — Han S., Pool J., Tran J., Dally W.J. Learning both weights and connections for efficient neural networks // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. — 2015. — Pp. 1135–1143. [Eng.]
- Jacob, 2018 — Jacob B., Kligys S., Chen B., Zhu M., Tang M., Howard A., Adam H. Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. — 2018. — Pp. 2704–2713. [Eng.]
- Hinton, 2015 — Hinton G., Vinyals O., Dean J. Distilling the knowledge in a neural network // *arXiv preprint*. — 2015. — arXiv:1503.02531. — Pp. 1–9. [Eng.]
- Tan, 2019 — Tan M., Le Q. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML)*. — 2019. — Pp. 6105–6114. [Eng.]
- Vaswani, 2017 — Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Polosukhin I. Attention is all you need // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. — 2017. — Pp. 5998–6008. [Eng.]
- Raffel, 2020 — Raffel C., Shazeer N., Roberts A., Lee K., Narang S., Matena M., Liu P.J. Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer // *Journal of Machine Learning Research*. — 2020. — Vol. 21. No. 140. — Pp. 1–67. [Eng.]
- Howard, 2017 — Howard A.G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Adam H. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications // *arXiv preprint*. — 2017. — arXiv:1704.04861. — Pp. 1–9. [Eng.]
- Brock, 2019 — Brock A., Lim T., Ritchie J.M., Weston N. Smash: One-shot model architecture search through hypernetworks // *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. — 2019. — Pp. 1–13. [Eng.]
- Paszke, 2019 — Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J., Chanan G., Chintala S. PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2019. — Pp. 8024–8035. [Eng.]
- Abadi, 2016 — Abadi M., Barham P., Chen J., Chen Z., Davis A., Dean J., Zheng X. TensorFlow: A system for large-scale machine learning // *Proceedings of the USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*. — 2016. — Pp. 265–283. [Eng.]
- Howard, 2019 — Howard A., Sandler M., Chu G., Chen L.C., Chen B., Tan M., Le Q.V. Searching for MobileNetV3 // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. — 2019. — Pp. 1314–1324. [Eng.]

REFERENCES

- LeCun, 2015 – LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep learning // *Nature*. — 2015. — Vol. 521. — No. 7553. — Pp. 436–444. [in Eng.]
- Han, 2015 – Han, S., Pool, J., Tran, J., Dally, W.J. (2015). Learning both weights and connections for efficient neural networks // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. — 2015. — Pp. 1135–1143. [in Eng.]
- Jacob, 2018 – Jacob, B., Kligys, S., Chen, B., Zhu, M., Tang, M., Howard, A., Adam, H. (2018). Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. — 2018. — Pp. 2704–2713. [in Eng.]
- Hinton, 2015 – Hinton, G., Vinyals, O., Dean, J. (2015). Distilling the knowledge in a neural network // *arXiv preprint*. — arXiv:1503.02531. — Pp. 1–9. [in Eng.]
- Tan, 2019 – Tan, M., Le, Q. (2019). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks // *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML)*. — 2019. — Pp. 6105–6114. [in Eng.]
- Vaswani, 2017 – Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. — 2017. — P. 5998–6008. [in Eng.]
- Raffel, 2020 – Raffel, C., Shazeer, N., Roberts, A., Lee, K., Narang, S., Matena, M., Liu, P.J. (2020). Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer // *Journal of Machine Learning Research*. — 2020. — Vol. 21, No. 140. — Pp. 1–67. [in Eng.]
- Howard, 2017 – Howard, A.G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications // *arXiv preprint*. — arXiv:1704.04861. — 2017. — Pp. 1–9. [in Eng.]
- Brock, 2019 – Brock, A., Lim, T., Ritchie, J.M., Weston, N. (2019). SMASH: One-shot model architecture search through hypernetworks // *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. — 2017. — Pp. 1–13. [in Eng.]
- Paszke, 2019 – Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Chintala, S. (2019). PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2019. — Pp. 8024–8035. [in Eng.]
- Abadi, 2016 – Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Zheng, X. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning // *Proceedings of the USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*. — 2016. — Pp. 265–283. [in Eng.]
- Howard, 2019 – Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L.C., Chen, B., Tan, M., Le, Q.V. (2019). Searching for MobileNetV3 // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. — 2019. — Pp. 1314–1324. [in Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 68–82
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>

VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS FOR MOTOR VEHICLES AT INTERSECTIONS

R. T. Safin¹, Y. Bagdollauly^{1}, Jia Wei²*

¹International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

²Harbin University of Commerce, Harbin, China.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com

Rafail Safin — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: safin.rafail@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>;

Yessen Bagdollauly — Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4322-0762>;

Jia Wei — Senior Lecturer, Harbin University of Commerce, Harbin, China

E-mail: 313023306@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-473X>.

© R. T. Safin, Y. Bagdollauly, Jia Wei

Abstract. In modern urban traffic, one of the most pressing issues is ensuring road safety at intersections, where traffic flow intensity reaches its peak. This study investigates the use of radio-technical systems for tracking vehicle positions to improve measurement accuracy and traffic management. The aim of the study is to develop and analyze methods for enhancing the accuracy of vehicle position measurements at intersections using radio-technical systems. To achieve this aim, the following objectives were set: analysis of existing vehicle tracking methods, development of algorithms for distance calculation under various receiver configurations, modeling of signal attenuation using free-space and two-ray models, determination of absolute and relative measurement errors, and comparative analysis of different equipment configurations. The results demonstrated that using a single receiver leads to high measurement errors ($\Delta = 0.5$ m, $\delta = 5.3$ %), making accurate lane determination impossible. Implementing two receivers on opposite sides of the roadway significantly reduces absolute and relative errors, provides accurate lane determination, and considers the impact of weather conditions and signal reflections from the road surface in the two-ray propagation model. Modeling in Pascal confirmed the correctness of the developed distance and signal attenuation calculation algorithms and visualized signal loss dependence on distance. Using a dual-receiver configuration of radio-technical systems at intersections ensures high accuracy in vehicle position determination, reduces measurement errors, and enhances road safety. The developed methods can be integrated into intelligent transportation systems and automated traffic control systems. Future research may focus on adapting algorithms to varying weather conditions and traffic intensity.

Keywords: radio-technical system, intersection, vehicle, signal attenuation, measurement error, traffic safety

For citation: R.T. Safin, Y. Bagdollauly, Jia Wei. Video surveillance systems for motor vehicles at intersections. // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 68–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ЖОЛ ҚИЫЛЫСТАРЫНДА АВТОМОБИЛЬ КӨЛІГІН БЕЙНЕТІРКЕУ ЖҮЙЕЛЕРІ

Р. Сафин¹, Е. Бағдоллаұлы^{1}, Цзя Вэй²*

¹Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Харбин коммерция университеті, Харбин, Қытай.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com

Рафаиль Сафин — PhD, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақстан

E-mail: safin.rafail@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>;

Есен Бағдоллаұлы — аға оқытушысы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақста.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4322-0762>;

Цзя Вэй — аға оқытушы, Харбин коммерция университеті, Харбин, Қытай

E-mail: 313023306@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-473X>.

© Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй

Аннотация. Қазіргі қалалық көлік жүйесінде ең өзекті мәселелердің бірі – жол-көлік қозғалысының қауіпсіздігін қамтамасыз ету, әсіресе жолайрықтарда, мұнда көлік ағымының қарқыны ең жоғары деңгейге жетеді. Бұл жұмыста радиотехника жүйелерін пайдаланып, көлік құралдарының орнын дәл өлшеу және қозғалысты басқару тиімділігін арттыру қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – радиотехникалық құралдарды қолдана отырып, көлік құралдарының жолайрықтардағы орнын анықтаудың дәлдігін арттыру әдістерін жасау және талдау. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: көлік құралдарын бақылаудың қазіргі әдістерін талдау, әртүрлі қабылдағыш конфигурацияларында қашықтықты есептеу алгоритмдерін жасау, сигналдың әлсіреуін «еркін кеңістік» және екі сәуле моделін қолдана отырып модельдеу, абсолютті және салыстырмалы өлшеу қателерін анықтау, сондай-ақ жабдық орнату конфигурацияларын салыстырмалы талдау жүргізу. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бір ғана қабылдағыш қолдану өлшеулерде үлкен қателікке ($\Delta = 0,5$ м, $\delta = 5,3$ %) әкеледі, бұл көліктің жолдағы орнын дәл анықтауға мүмкіндік бермейді. Жолдың екі жағына екі қабылдағыш орнату абсолютті және салыстырмалы қателерді айтарлықтай азайтады, жолдағы орынды дәл анықтауға мүмкіндік береді, сондай-ақ ауа райы жағдайлары мен жол бетінен сигналдың шағылысуын екі сәуле моделінде ескереді. Pascal тілінде модельдеу қашықтық пен сигнал әлсіреуін есептеу алгоритмдерінің дұрыстығын растап, сигнал жоғалуын қашықтыққа байланысты визуализациялады. Жолайрықтарда екі қабылдағышты радиотехникалық жүйелерді пайдалану көліктің орнын дәл анықтауға, өлшеу қателігін азайтуға және жол қозғалысының қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді. Жасалған әдістер интеллектуалды көлік жүйелеріне және автоматтандырылған бақылау жүйелеріне интеграциялануы мүмкін. Болашақ зерттеулер алгоритмдерді ауа райы мен қозғалыс қарқынына бейімдеуге бағытталуы мүмкін.

Түйін сөздер: радиотехникалық жүйе, жолайрық, көлік құралы, сигнал әлсіреуі, өлшеу қателігі, қозғалыс қауіпсіздігі

Дәйексөздер үшін: Р. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй. Жол қиылыстарында автомобиль көлігін бейнетіркеу жүйелері // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 68–82 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

СИСТЕМЫ ВИДЕОФИКСАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ПЕРЕКРЁСТКАХ

Р.Т. Сафин¹, Е. Бағдоллаұлы^{1}, Цзя Вэй²*

¹Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

²Харбинский университет коммерции, Харбин, Китай.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com

Рафаиль Сафин — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: safin.rafail@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>;

Есен Бағдоллаұлы — старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: y.bagdollauly@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4322-0762>;

Цзя Вэй — старший преподаватель, Харбинский университет коммерции, Харбин, Китай

E-mail: 313023306@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9096-473X>.

© Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй

Аннотация. В современном городском транспортном пространстве одной из актуальных проблем является обеспечение безопасности движения на перекрёстках, где интенсивность транспортных потоков достигает максимальных значений. В данной работе исследуется использование радиотехнических систем для фиксации положения транспортных средств с целью повышения точности измерений и улучшения управления движением. Цель исследования – разработка и анализ методов повышения точности определения положения транспортных средств на перекрёстках с использованием радиотехнических средств. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов фиксации транспортных средств, разработка алгоритмов расчёта расстояний для различных вариантов размещения приёмных устройств, моделирование затухания радиосигнала с использованием моделей «свободное пространство» и двухлучевой модели, определение абсолютной и относительной погрешности измерений, а также сравнительный анализ различных конфигураций установки оборудования. Результаты исследования показали, что использование одного приёмного устройства приводит к высокой погрешности измерений ($\Delta = 0,5$ м, $\delta = 5,3$ %), что делает невозможным точное определение ряда, в котором находится транспортное средство. Применение двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части значительно снижает абсолютную и относительную погрешность, обеспечивает точное определение ряда, а также учитывает влияние погодных условий и отражений сигналов от поверхности дороги при двухлучевом распространении. Моделирование на языке Pascal подтвердило корректность алгоритмов расчёта расстояний и затухания радиосигнала, визуализировав зависимость потерь сигнала от расстояния. Использование двухприёмной конфигурации радиотехнических систем на перекрёстках обеспечивает высокую точность определения положения транспортных средств, снижает вероятность ошибок измерений и повышает безопасность дорожного движения. Разработанные методы могут быть интегрированы в интеллектуальные транспортные системы и системы автоматического контроля движения, а перспективным направлением дальнейших исследований является адаптация алгоритмов под изменяющиеся погодные условия и интенсивность движения.

Ключевые слова: радиотехническая система, перекрёсток, транспортное средство, затухание сигнала, погрешность измерений, безопасность движения

Для цитирования: Р.Т. Сафин, Е. Бағдоллаұлы, Цзя Вэй. Системы видеофиксации автомобильного транспорта на перекрёстках // Помышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 68–82. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.004>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

В современном городском транспортном пространстве одним из наиболее острых вопросов является обеспечение безопасности движения на перекрёстках, где интенсивность транспортных потоков достигает максимальных значений. На основании анализа работ предшественников (Чичерина, 2001: 14–30; Куба, 2006: 183; Евсеев, 2011: 524–531) выявлено, что существующие методы контроля транспортных потоков, в частности фиксация положения подвижных объектов, имеют ограниченную точность и не учитывают влияние ряда факторов, таких как погодные условия, ряды движения транспортных средств и высота установки оборудования. Таким образом, существует проблемная ситуация, заключающаяся в недостаточной достоверности измерений расстояний до транспортных средств и, как следствие, возможном снижении эффективности систем управления движением.

Актуальность темы определяется ростом интенсивности городского движения, развитием интеллектуальных транспортных систем и необходимостью внедрения новых методов радиотехнического контроля, обеспечивающих высокую точность фиксации положения транспортных средств на перекрёстках (Поникар, 2010: 914–918; Евсеев, 2011: 524–531; Лаврентьев, 2015: 17; Николаев, 2016: 45–52; Кузнецов, 2017: 88–95; Анциферов, 2018: 23–30; Чистяков, 2019: 65–74). Несмотря на существующие исследования, нет единого подхода, который учитывал бы комплекс факторов, влияющих на точность измерений, включая расположение приёмных устройств, моделирование распространения радиосигнала и влияние неблагоприятных погодных условий. Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения безопасности дорожного движения и оптимизации работы систем контроля на перекрёстках, а теоретическая – в расширении знаний о применении радиотехнических средств для мониторинга транспортных потоков.

Объектом исследования являются радиотехнические системы фиксации положения транспортных средств на регулируемых перекрёстках.

Предмет исследования – методы и алгоритмы определения расстояния до транспортных средств с использованием приёмных устройств и моделей распространения радиосигнала.

Цель исследования – разработка и анализ методов повышения точности измерения положения транспортных средств на перекрёстках с использованием радиотехнических средств.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- Провести анализ существующих методов фиксации положения транспортных средств и определить их ограничения.
- Разработать алгоритмы расчёта расстояния до транспортных средств для различных вариантов размещения приёмных устройств.
- Моделировать затухание радиосигнала с использованием моделей «свободное пространство» и двухлучевой модели.
- Определить абсолютную и относительную погрешность измерений при различных конфигурациях установки оборудования.
- Провести сравнительный анализ вариантов размещения приёмных устройств и выбрать наиболее оптимальный для практического применения.

Методы исследования включают математическое моделирование, разработку алгоритмов на языке Pascal, использование моделей распространения радиосигнала, а также качественный и количественный анализ полученных данных.

Гипотеза исследования заключается в том, что установка двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части позволяет существенно повысить точность определения положения транспортных средств и снизить абсолютную и относительную погрешность измерений по сравнению с использованием одного приёмного устройства.

Научное значение исследования состоит в разработке методологических подходов к повышению точности радиотехнического контроля транспортных потоков, а практическое значение – в возможности внедрения предложенных решений в интеллектуальные транспортные системы для повышения безопасности дорожного движения.

Материалы и методы.

В качестве материала исследования использовались следующие элементы:

- Объекты наблюдения – транспортные средства, движущиеся по регулируемым перекресткам. Они представляют собой оконечные узлы, с которых измеряется расстояние до радиоприёмного устройства.

- Инфраструктура перекрестка – светофоры, стоп-линии, пешеходные переходы, дорожные разметки и сигнальные линии. Их характеристики (ширина полос, расстояние до стоп-линий и переходов) использованы для расчёта траекторий движения и геометрического расположения приёмных устройств.

- Радиотехническое оборудование – управляющее устройство и приёмные устройства (антенны), устанавливаемые на высоте подъёма светофора (около 5 м). Для исследования использовались одно- и двухприёмные конфигурации, а также различные варианты расположения на ширину проезжей части.

- Программное обеспечение – модель расчётов реализована на языке Pascal. Используются алгоритмы расчёта расстояний до оконечных узлов, формулы затухания сигнала (свободное пространство и двухлучевая модель), а также расчёт абсолютной и относительной погрешности.

- Источники информации – нормативные материалы по стандартам дорожной разметки, литературные источники по радиотехническим системам и сетям (Чичерина, 2001; Куба, 2006; Texas Instruments, 2006; Евсеев, 2011).

Исследование проводилось с использованием качественных и количественных методов:

Вопросы исследования:

- Как размещение радиоприёмных устройств влияет на точность измерения расстояния до транспортных средств?

- Как погодные условия (дождь, туман, снег) влияют на достоверность измерений?

- Как различные модели распространения радиосигнала (свободное пространство, двухлучевая) влияют на расчёт затухания и точность измерений?

Гипотеза (тезис исследования): Размещение двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части повышает точность измерения расстояния до транспортных средств и снижает абсолютную и относительную погрешность в сравнении с использованием одного приёмного устройства.

Этапы исследования:

- Постановка задачи и построение схемы перекрёстка с учётом всех дорожных элементов.

- Разработка алгоритмов вычисления расстояния до транспортных средств с использованием одной и двух антенн.

- Расчёт затухания радиосигнала по моделям свободного пространства и двухлучевой модели.

- Определение абсолютной и относительной погрешности.

- Сравнительный анализ результатов для различных конфигураций установки оборудования.

Методы исследования:

- Математическое моделирование (расчёт расстояний, формулы затухания, построение треугольников по Герону).
- Программная реализация алгоритмов на Pascal.
- Сравнительный анализ результатов для разных конфигураций оборудования.
- Качественный анализ влияния параметров установки и погодных условий на точность измерений.

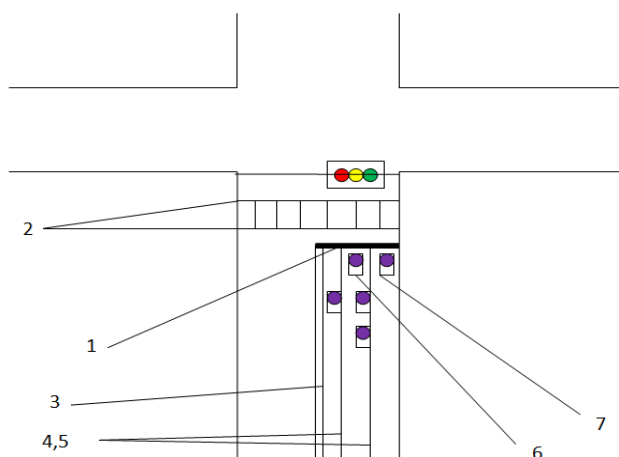
Результаты и обсуждение.

При использовании фиксации подвижных объектов на перекрестках улиц, реализация, которой может способствовать повышению безопасности движения при организации способа получения информации о положении автомобиля относительно стоп-линии с использованием радиотехнических средств.

При учете возможных факторов (сильные осадки, туман и прочие погодные условия), способных влиять на достоверность измерения и способных привести к значительной погрешности измерений необходимо обеспечить ряд мероприятий, улучшающих качественные показатели системы. В разработку входит определение улучшенного алгоритма работы системы, расчет основных параметров передачи сигнала на радиотрассе и расчет вероятности ошибки.

Предлагается разместить на перекрестке радиотехническое оборудование. На рисунке ниже приведено схематическое изображение перекрестка. Как видно из Рисунка 1, управляющее устройство должно быть соединено со светофором, оно установлено на уровне высоты подъема светофора, т.е. примерно около 5 метров. На таком же уровне вдоль светофора должны быть установлены приемные устройства, но только они будут разнесены на ширину проезжей части, то есть расстояние между приемными устройствами будет составлять около 10 метров. Придерживаясь стандартам дорожной разметки на полотне дороги, можно определить, что расстояние между светофором и пешеходным переходом, который равняется 3 метрам, ширина пешеходного перехода – также 3 метра, расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии составляет 2 метра.

Возможны различные варианты размещения приемных устройств и их количество. В связи с этим необходимо сравнить эти варианты и выбрать наиболее приемлемый для решения данных задач.



Условные обозначения:

- 1 – Стоп-линия;
- 2 – Пешеходный переход;
- 3 – Двойная сплошная линия;
- 4,5 – Линии ряда;
- 6,7 – Оконечные узлы на транспортных средствах.

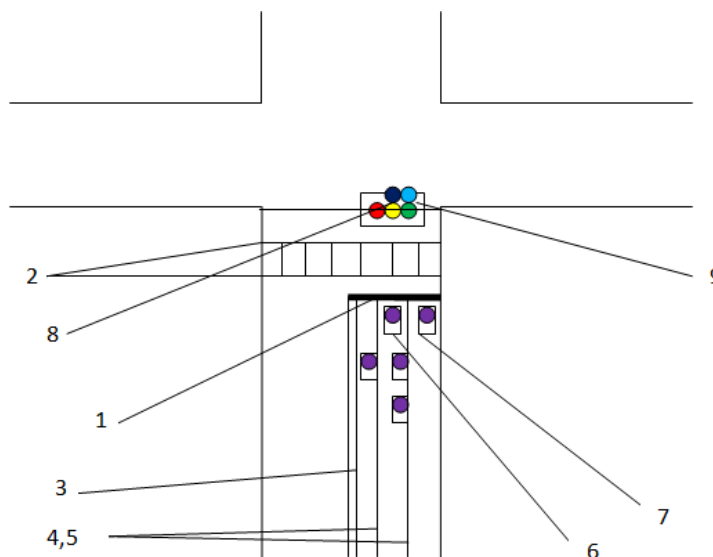
Рис.1. Схема перекрестка

Рассмотрим вариант размещения одного приемного устройства, примыкающего непосредственно к управляющему устройству около светофора и направленного вдоль проезжей части навстречу входящему потоку машин, показанному на рисунке 2.

Как видно из Рисунка 2, управляющее устройство должно быть соединено со светофором которое установлено на уровне высоты подъема светофора h , т.е. примерно около 5 метров. На таком же уровне на светофоре должно быть установлено приемное устройство. Придерживаясь стандартной разметки дорожного полотна, можно определить, что расстояние между светофором и пешеходным переходом a_1 равняется 3 метрам, ширина пешеходного перехода a_2 – также 3 метра, расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии a_3 – 2 метра.

Зная, что определение расстояния между окончательным узлом и приемным устройством b напрямую зависит от уровня мощности принятого сигнала, можно рассчитать значение расстояния между окончательным узлом и приемным устройством для двух различных транспортных средств, находящихся на одинаковом расстоянии от стоп-линии, но в разных рядах.

Транспортное средство 6 находится на расстоянии 8 метров от перекрестной дороги и данное расстояние складывается из расстояния между светофором и пешеходным переходом (3 метра), ширина пешеходного перехода (3 метра) и расстояния от пешеходного перехода до стоп-линии (2 метра). Также следует учесть, что приемное устройство располагается на высоте 5 метров от дорожного полотна (Чичерина, 2001: 56).



Условные обозначения:

- 1 – Стоп-линия;
- 2 – Пешеходный переход;
- 3 – Двойная сплошная линия;
- 4,5 – Линии ряда;
- 6,7 – Оконечные узлы на транспортных средствах;
- 8 – Управляющее устройство;
- 9 – Приемное устройство.

Рис.2. Схема изображения перекрестка с одним приемным устройством

Таким образом, расстояние от транспортного средства до приемного устройства находится по формуле 1:

$$b_6 = \sqrt{((a_1 + a_2 + a_3)^2 + h^2)}, \quad (1)$$

где a_1 – расстояние между светофором и пешеходным переходом, м;

a_2 – ширина пешеходного перехода, м;

a_3 – расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии, м;

h – высота подъема светофора, м.

$$b_6 = \sqrt{((3+3+2)^2 + 5^2)} = \sqrt{89} = 9,4 \text{ м.}$$

Транспортное средство 6 располагается на расстоянии 9,4 метров от приемного устройства.

Транспортное средство 7 находится на расстоянии 8 метров от перекрестной дороги и данное расстояние складывается из расстояния между светофором и пешеходным переходом (3 метра), ширина пешеходного перехода (3 метра) и расстояния от пешеходного перехода до стоп-линии (2 метра). Также следует учесть, что приемное устройство располагается на высоте 5 метров от дорожного полотна и тогда транспортное средство находится в крайнем правом ряду, значит сдвинуто вправо относительно приемного устройства на ширину ряда С, то есть на 3 метра. Следовательно, расстояние от транспортного средства до приемного устройства находится по формуле 2:

$$b_7 = \sqrt{((a_1 + a_2 + a_3)^2 + h^2 + c^2)}, \quad (2)$$

где a_1 – расстояние между светофором и пешеходным переходом, м;

a_2 – ширина пешеходного перехода, м;

a_3 – расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии, м;

h – высота подъема светофора, м;

c – ширина ряда, м.

$$b_7 = \sqrt{((3+3+2)^2 + 5^2 + 3^2)} = \sqrt{98} = 9,9 \text{ м.}$$

Транспортное средство 7 располагается на расстоянии 9,9 метров от приемного устройства.

Абсолютная погрешность Δ в расстоянии b_6 и b_7 находится по формуле 3:

$$\Delta = d_7 - b_6, \quad (3)$$

$$\Delta = 9,9 - 9,4 = 0,5 \text{ м.}$$

Относительная погрешность δ в расстоянии b_6 и b_7 определяется по формуле 4:

$$\delta = \frac{\Delta}{b_6} * 100\% = \frac{b_7 - b_6}{b_6} * 100\%, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{0,5}{9,4} * 100\% = 5,3\%.$$

Используя формулу 5 затухания радиосигнала при распространении:

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{4\pi d f}{c} \right), \quad (5)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником, м;

f – частота радиосигнала, Гц;

c – скорость света в вакууме, м/с;

L_p – затухание сигнала при распространении, дБ.

Можно найти затухание сигнала на расстоянии, равном b_6 и b_7 ;

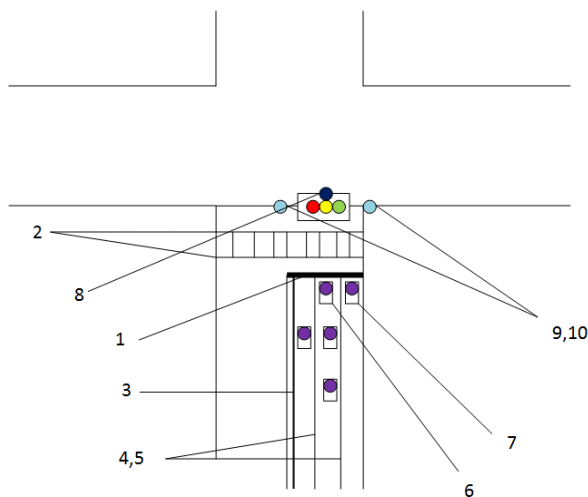
$$L_{P_6} = 20 \lg \left(\frac{4 * 3,14 * 9,4 * 2,4 * 10^9}{3 * 10^8} \right) = 59,5 \text{ дБ},$$

$$L_{P_7} = 20 \lg \left(\frac{4 * 3,14 * 9,9 * 2,4 * 10^9}{3 * 10^8} \right) = 59,9 \text{ дБ}.$$

Следовательно, разница между затуханиями сигнала при соответствующих расстояниях b_6 и b_7 составляет 0,4 дБ (Куба, 2006: 183–192; Texas Instruments, 2006: 3–19).

При использовании только одного приемного устройства абсолютная погрешность вычислений расстояния Δ составляет 0,5 метров, относительная погрешность вычислений расстояния δ составляет 5,3 %. Погрешность такого уровня не приемлема для решения поставленных задач, в связи с чем, предлагается рассмотреть второй вариант размещения приемных устройств.

Был рассмотрен вариант размещения двух приемных устройств, расположенных на уровне высоты светофора, но по обе стороны проезжей части.



Условные обозначения:

1 – Стоп-линия

2 – Пешеходный переход

3 – Двойная сплошная линия

4,5 – Линии ряда

6,7 – Оконечные узлы на транспортных средствах

8 – Управляющее устройство

9,10 – Приемные устройства

Рис. 3. Схема изображение перекрестка с использованием двух приемных устройств

Как видно из рисунка 3, управляющее устройство должно быть соединено со светофором, оно установлено на уровне высоты подъема светофора h , т.е. примерно около 5 метров. На таком же уровне на светофоре должны быть установлены приемные устройства. Придерживаясь стандартной разметки дорожного полотна, можно определить, что расстояние между светофором и пешеходным переходом a_1 равняется 3 метрам, ширина пешеходного перехода a_2 – также 3 метра, расстояние от пешеходного перехода до стоп-линии a_3 – 2 метра, а также известно расстояние между приемными устройствами r и равняется оно 10 метрам.

Алгоритм вычисления расстояния от стоп-линии до транспортного средства показан на примере транспортного средства 6.

Вычисляемое расстояние a от транспортного средства до приемного устройства 9 и расстояние b от транспортного средства до приемного устройства 10. Зная расстояние между приемными устройствами r , равное 10 метрам, можем построить воображаемый треугольник, сторонами которого являются расстояния a , b , r . По формуле Герона S можно определить площадь данного треугольника:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-r)}, \quad (6)$$

где p – полупериметр треугольника, м;

a – расстояние от транспортного средства до приемного устройства 9, м;

b – расстояние от транспортного средства до приемного устройства 10, м;

r – расстояние между приемными устройствами, м.

Зная формулу площади треугольника по стороне и высоте h_r , опущенной на эту сторону, выражаем высоту треугольника h_r из его площади:

$$h_r = \frac{2S}{r}, \quad (7)$$

где S – площадь треугольника, м²;

r – расстояние между приемными устройствами, м.

Минимальное значение h_r , при котором еще разрешается движение транспортного средства равно 9,4 метров.

Таким образом, применение двух приемных устройств устраняет необходимость получения дополнительной информации о ряде, в котором находится транспортное средство для получения более точного вычисления о расстоянии между транспортным средством и стоп-линии.

В работе была рассмотрена модель свободного пространства. В связи с тем, что среда распространения сигнала – открытое пространство, можно воспользоваться моделью распространения радиоволн «свободное пространство».

Известно, что в свободном пространстве уровень мощности электромагнитных волн уменьшается обратно квадрату расстояния между передатчиком и приемником, отсюда следует, что затухание сигнала в свободном пространстве можно описать формулой 8:

$$L_P = -\frac{\lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (8)$$

где λ – длина волны сигнала, см;

d – расстояние, км;

L_P – затухание, дБ.

Данную формулу можно записать по-другому:

$$FSL = L_P = -33,24 - 20 \lg(f) - 20 \lg(d), \quad (9)$$

где FSL (free space loss) – потери в свободном пространстве, дБ;

f – центральная частота канала, на котором работает система связи, МГц;
 d – расстояние между двумя точками, км.

Помимо затухания в свободном пространстве имеется также такая характеристика, как суммарное усиление системы. Расчет производится по следующей формуле 10:

$$Y_{дБ} = P_{t,дБ} + G_{t,дБ} + G_{r,дБ} - P_{min,дБ} - L_{t,дБ} - L_{r,дБ}, \quad (10)$$

где $P_{t,дБ}$ – мощность передатчика, дВтм;

$G_{t,дБ}$ – коэффициент усиления передающей антенны, дБи;

$G_{r,дБ}$ – коэффициент усиления приемной антенны, дБи;

$P_{min,дБ}$ – реальная чувствительность приемника, дВтм;

$L_{t,дБ}$ – потери сигнала в коаксиальном кабеле и разъемах передающего тракта, дБ;

$L_{r,дБ}$ – потери сигнала в коаксиальном кабеле и разъемах приемного тракта, дБ.

$$Y_{дБ} = -10 + 0 + 0 - 92 - 1,05 - 1,05 = 79,9 \text{ дБ.}$$

Суммарное затухание по формуле 11 должно равняться суммарному усилению:

$$-L_p = Y_{дБ}. \quad (11)$$

Также необходимо взять запас по мощности для уверенного приема, запас в энергетике радиосвязи равняется около 10-15 дБ, отсюда следует, что необходимо внести поправку в формулу 11. Формула будет выглядеть следующим образом:

$$-L_p = Y_{дБ} + SOM, \quad (12)$$

где SOM – запас в энергетике радиосвязи, дБ.

Примем SOM равным 10 дБ.

$$-L_p = 79,9 - 10 = 69,9 \text{ дБ.}$$

Поскольку $FSL = L_p$, то из формулы (9) можно выразить d – расстояние, в результате:

$$d = 10^{\left(\frac{FSL}{20} + \frac{33,24}{20} + \lg F\right)}, \quad (13)$$

$$d = 10^{\left(\frac{69,9}{20} + \frac{33,24}{20} + 3,38\right)} = 29 \text{ м.}$$

Ниже представлено окно программы для приведенных выше расчетов программы на языке Pascal (Рис. 5).

```

DOSBox 0.72, Cpu Cycles: max, Frameskip 0, Program: BP
Borland Pascal Версия 7.0 Перевёл Vadimon, 1999
1 automobil
введите расстояние между светофор и пешеходным переходом (м)
3
введите значение ширины пешеходного перехода (м)
3
введите расстояние между пешеходным переходом и стоп-линией (м)
2
введите значение высоты светофора (м)
5
транспортное средство находится на расстоянии 9.43 метров
введите полуженное значение (м)
9.43
введите частоту сигнала (GHz)
2.4
затухание L равно 59.53 (dB)
введите расстояние от TS до ZigBee устройства-1 (м)
13
введите расстояние от TS до ZigBee устройства-2 (м)
18
введите ширину проезжей части (м)
10
S вооруженного треугольника 49.48(ку.м)
расстояние от TS до светофора 9.88 (м)
    
```

Рис 5. Скриншот компиляции программы Pascal

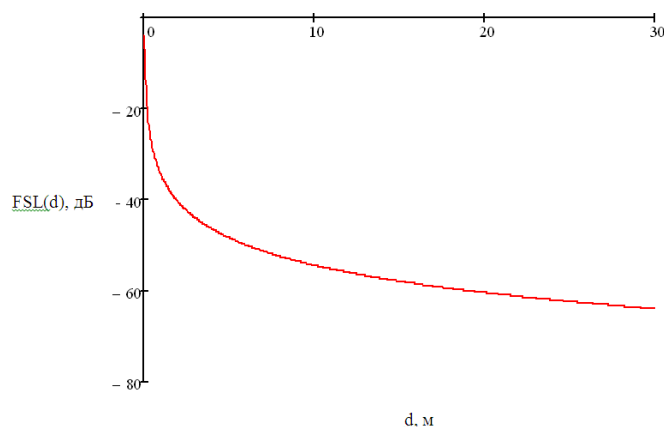


Рис. 6. График зависимости затухания сигнала от расстояния между передатчиком и приемником

Из рисунка 6 следует, что нижняя граница затухания сигнала составляет -69,9 дБ при расстоянии между передатчиком и приемником, равном 29 метрам. Верхняя граница затухания составляет -60 дБ при расстоянии между передатчиком и приемником, равном 9,4 метрам.

Однако при моделировании двухлучевого распространения сигнала реальности характер распространения радиосигнала возможно предсказать лишь с некоторой долей вероятности. Поэтому необходимо рассмотреть поведение радиосигнала в случае двухлучевого распространения сигнала.

Двухлучевая модель распространения радиосигнала используется в тех случаях, когда сигнал, отправленный передатчиком, достигает приемника по двум траекториям: прямого распространения и отраженного от земной поверхности.

Первая составляющая является описанием из формулы потерь при распространении в модели свободного пространства. Используя метод наложения, получим, что принимаемый сигнал в двухлучевой модели.

$$r_2(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{\sqrt{G_l} u(t) e^{j(\frac{2\pi l}{\lambda})}}{l} + \frac{R \sqrt{G_r} u(t-r) e^{j2\pi(r+r')/\lambda}}{r+r'} \right] \cos(2\pi f_c t + \varphi_0), \quad (14)$$

где $t = (r + r' - l)/c$ - временная задержка отраженного от земли сигнала по отношению к составляющей прямого сигнала, мс;

R - коэффициент отражения от земли;

G_r - результат взаимодействия полей с учетом диаграмм направленности, передающей и приемной антенн для r и r' .

Если передаваемый сигнал является узкополосным относительно временной задержки.

Таким образом, мощность принимаемого сигнала для рассматриваемой модели:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left[\frac{\sqrt{G_l}}{l} + \frac{R \sqrt{G_r} e^{j\Delta\varphi}}{r+r'} \right]^2, \quad (15)$$

где $\Delta\varphi$ - разность фаз между двумя составляющими принимаемого сигнала.

Если d — расстояние между антеннами, м; h_t — высота передающей антенны, м; и h_r — высота приемной антенны, м; то разность фаз определяется как:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(r'+r-l)}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{h_t+h_r}{d}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{h_t-h_r}{d}\right)^2 + 1} \right], \quad (16)$$

Разброс по задержке для двухлучевой модели — это дополнительная задержка при отражении от земли $t = (r + r' - 1)/c$. Коэффициент земного отражения определяется по формулам 17 и 18:

$$R = \frac{\sin\theta - Z}{\sin\theta + Z}, \quad (17)$$

$$Z = \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta}, \quad (18)$$

где ε_r — диэлектрическая постоянная подстилающей поверхности, которая для земли или дорожного покрытия приблизительно равна диэлектрической постоянной диэлектрика ($\varepsilon_r = 15$).

По формуле 19 находим отношение принятой мощности к излученной в логарифмическом масштабе для влияния погодных условий (дождь, туман, снег):

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right), \quad (19)$$

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right) = 10 \lg(1,098 * 10^{-7}) = -69,6 \text{ дБ.}$$

Учитывая запас в энергетике радиосвязи, вносим поправку в формулу 19 для свободного пространства:

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right) + SOM = -69,6 + 10 = -59,6 \text{ дБ.}$$

При использовании модели свободного пространства при распространении радиосигнала для расстояния между передатчиком и приемником d , равного 9,4 метров, было получено значение затухания радиосигнала $L_P = -60$ дБ.

В случае применения двухлучевой модели распространения радиосигнала для расстояния между передатчиком и приемником d , равного 9,4 метров, получено значение затухания радиосигнала при выпадении осадков (дождь, снег, туман) $L_P = -59,6$ дБ.

Абсолютная погрешность вычислений Δ составляет по формуле (3):

$$\Delta = -59,6 - (-60) = 0,4 \text{ дБ.}$$

Относительная погрешность вычислений δ составляет по формуле (4) (Евсеев, 2011Ж524–531):

$$\delta = \frac{0,4}{60} * 100\% = 0,7\%.$$

Заключение.

В данной работе была выполнена комплексная оценка методов фиксации подвижных объектов на перекрестках с использованием радиотехнических средств. Исследование проводилось с целью повышения безопасности движения за счёт точного определения положения транспортных средств относительно стоп-линий.

Реализация целей и методов исследования: Цели исследования включали разработку алгоритмов вычисления расстояний, моделирование затухания радиосигнала и определение погрешностей измерений для различных конфигураций установки оборудования. Для достижения этих целей были

применены математические расчёты, моделирование на языке Pascal, анализ моделей распространения сигнала (свободное пространство и двухлучевая модель), а также сравнительный анализ вариантов размещения приёмных устройств.

Результаты исследования:

- Установлено, что использование одного приёмного устройства даёт высокую погрешность измерений ($\Delta = 0,5$ м, $\delta = 5,3$ %), что является недопустимым для практических задач.

- Размещение двух приёмных устройств по обе стороны проезжей части позволяет уменьшить абсолютную и относительную погрешность, а также обеспечивает более точное определение ряда, в котором находится транспортное средство.

- Расчёты затухания радиосигнала показали, что значения варьируются в диапазоне от -69,9 дБ до -60 дБ при расстояниях от 9,4 до 29 метров, что согласуется с моделями свободного пространства и двухлучевой моделью распространения.

- Погодные условия (дождь, снег, туман) оказывают дополнительное влияние на затухание сигнала, однако использование двухлучевой модели позволяет учесть отражения и снизить вероятность ошибки.

Выводы:

- Применение двух приёмных устройств на перекрёстках обеспечивает высокую точность определения положения транспортного средства.

- Разработанные алгоритмы расчёта расстояний и затухания радиосигнала позволяют учитывать различные ряды движения и погодные условия, повышая надёжность системы.

- Моделирование на языке Pascal показало корректность предложенных методов и позволило визуализировать зависимость затухания сигнала от расстояния.

Перспективы и возможности внедрения:

- Практическое применение результатов исследования возможно при разработке интеллектуальных транспортных систем (ITS) и систем автоматического контроля на перекрёстках.

- Внедрение предложенной системы позволит снизить риск дорожно-транспортных происшествий и повысить безопасность движения.

- Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция системы с беспроводными сетями IoT и использованием алгоритмов искусственного интеллекта для анализа больших потоков транспортных данных.

- Возможна разработка адаптивных алгоритмов, учитывающих изменяющиеся погодные условия и интенсивность трафика в реальном времени.

Таким образом, проведённое исследование подтвердило выдвинутую гипотезу о повышении точности измерений при использовании двух приёмных устройств, а также показало значимость учета различных моделей распространения радиосигнала и влияния погодных условий на достоверность измерений. Разработанные методы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования систем мониторинга и управления движением на перекрёстках.

ЛИТЕРАТУРА

Чичерина, 2001 — Чичерина М.П. Виктимологический анализ и профилактика дорожно-транспортных происшествий, совершаемых водителями частных легковых автомобилей: Автореф. дис. канд. юр. наук. — М.: 2001. — 146 с. [Russ.]

Куба, 2006 — A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE802.15.4 Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2006). — 2006. — С. 183–192. [Eng.]

Texas Instruments, 2006 — 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. Chipcon Products CC2420 Manual. — URL: <https://www.manualslib.com/manual/482104/Texas-Instruments-Chipcon-Products-Cc2420.html>. — 89 p. [Eng.]

Поникар, 2010 — Поникар А.В., Евсеев О.В., Анциперов В.Е., Мансуров Г.К. Исследование возможности локального позиционирования в беспроводных сетях IEEE 802.15.4 // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». — М.: ИПЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г. — С. 914–918. [Russ.]

- Евсеев, 2011 — Евсеев О.В., Мансуров Г.К., Анциперов В.Е. Анализ влияния многозадачных помех на точность позиционирования в сетях IEEE 802.15.4 // Радиотехника и электроника. — 2011. — Т. 56, № 5. — С. 524–531. [Russ.]
- Лаврентьев, 2015 — Лаврентьев С.Н., Петров А.А. Радиотехнические системы контроля транспорта на перекрестках: Монография. — М.: Транспорт, 2015. — 178 с. [Russ.]
- Николаев, 2016 — Николаев В.В., Сидоров И.П. Моделирование затухания радиосигналов в городских условиях // Вестник РТУ. — 2016. — № 3. — С. 45–52. [Russ.]
- Кузнецов, 2017 — Кузнецов Д.В., Петров С.С. Методы повышения точности локализации в беспроводных сенсорных сетях // Сборник научных трудов МГУ. — 2017. — С. 88–95. [Russ.]
- Анциферов, 2018 — Анциферов В.Е., Евсеев О.В. Двухлучевая модель распространения радиосигнала и её применение в системах дорожного мониторинга // Техника и безопасность на транспорте. — 2018. — № 2. — С. 23–30. [Russ.]
- Чистяков, 2019 — Чистяков А.В., Лаврентьев С.Н. Радиосистемы контроля движения на перекрестках: Анализ погрешностей измерений и рекомендации по установке оборудования // Транспортные технологии. — 2019. — № 4. — С. 65–74. [Russ.]

REFERENCES

- Chicherina 2001 – Chicherina, M.P. (2001). Viktimologicheskii analiz i profilaktika dorozhno-transportnykh proisshestvii, sovershaemykh voditeliami chastnykh legkovykh avtomobilei [Victimological analysis and prevention of road accidents committed by private car drivers]. Avtoref. dis. kand. iur. nauk. — M. — 146 p. [in Russ.]
- Kuba 2006 – A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2006). (2006). — Pp. 183–192. [in Eng.]
- Texas Instruments 2006 – Texas Instruments. (2006). 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. Chipcon Products CC2420 Manual. URL: <https://www.manualslib.com/manual/482104/Texas-Instruments-Chipcon-Products-Cc2420.html> — 89 p. [in Eng.]
- Ponikar 2010 – Ponikar, A.V., Evseev, O.V., Antsiperov, V.E., Mansurov, G.K. (2010). Issledovanie vozmozhnosti lokal'nogo pozitsionirovaniia v besprovodnykh setiakh IEEE 802.15.4 [Study of the possibility of local positioning in IEEE 802.15.4 wireless networks]. IV Vserossiskaia konferentsiia “Radiolokatsiia i radiosviat”. — M: IRE RAN. — Pp. 914–918. [in Russ.]
- Evseev 2011 – Evseev, O.V., Mansurov, G.K., Antsiperov, V.E. (2011). Analiz vliianiia mnogoluchovykh pomekh na tochnost' pozitsionirovaniia v setiakh IEEE 802.15.4 [Analysis of the influence of multipath interference on positioning accuracy in IEEE 802.15.4 networks]. Radiotekhnika i elektronika, 56(5), 524–531. [in Russ.]
- Lavrentiev 2015 – Lavrentiev, S.N., Petrov, A.A. (2015). Radiotekhnicheskie sistemy kontroliia transporta na perekrestkakh: Monografiia [Radio-technical systems for traffic monitoring at intersections]. — M: Transport. — 178 p. [in Russ.]
- Nikolaev 2016 – Nikolaev, V.V., Sidorov, I.P. (2016). Modelirovanie zatukhaniia radiosignalov v gorodskikh usloviakh [Modeling of radio signal attenuation in urban environments]. Vestnik RTU, (3), 45–52. [in Russ.]
- Kuznetsov 2017 – Kuznetsov, D.V., Petrov, S.S. (2017). Metody povysheniia tochnosti lokalizatsii v besprovodnykh sensorykh setiakh [Methods for improving localization accuracy in wireless sensor networks]. Sbornik nauchnykh trudov MGU. — Pp. 88–95. [in Russ.]
- Antsiferov 2018 – Antsiferov, V.E., Evseev, O.V. (2018). Dvukhluchevaia model' rasprostraneniia radiosignala i ee primeneniie v sistemakh dorozhnogo monitoringa [Two-ray radio signal propagation model and its application in road monitoring systems]. Tekhnika i bezopasnost' na transporte, (2), 23–30. [in Russ.]
- Chistiakov 2019 – Chistiakov, A.V., Lavrentiev, S.N. (2019). Radiosistemy kontroliia dvizheniia na perekrestkakh: Analiz pogreshnosti izmereniia i rekomendatsii po ustanovke oborudovaniia [Traffic-control radio systems at intersections: Measurement error analysis and equipment installation recommendations]. Transportnye tekhnologii, (4), 65–74. [in Russ.]

ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР / ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ/ COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 83–102
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>
UDC 656.2

STATIC CHARACTERISTICS OF A CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN DYNAMIC BRAKING MODE

A. Abzalkhanov

"Logistic Service Kazakhstan" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com

Alimkhan Abzalkhanov — manager, "Logistic Service Kazakhstan" LLP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9773-575X>.

© A. Abzalkhanov

Abstract. This paper is devoted to the study of controlled electric drives of direct and alternating current operating in the dynamic braking mode using high-frequency pulse converters. Increasing requirements for energy efficiency, reliability, and controllability of industrial electric drives necessitate an in-depth analysis of the processes occurring in the power circuit during braking, as well as an assessment of the influence of discontinuous and continuous current modes on static and mechanical characteristics. The aim of the research is to substantiate the parameters of the power part of a controlled electric drive and to determine the boundaries of the stable operating range of pulse converters in the dynamic braking mode. To achieve this goal, circuit solutions were analyzed, simulation models were developed, static and mechanical characteristics were investigated, and boundary duty cycle values of pulse converters were determined. Using analytical methods and simulation modeling in the MATLAB–Simulink environment, families of static and mechanical characteristics for electric drives of various power ratings were obtained. It was established that with increasing motor power, the region of discontinuous current operation significantly decreases, while the continuous current region expands. Boundary duty cycle values corresponding to the transition between current modes were determined, and it was shown that these values weakly depend on the armature time constant and are mainly governed by the back electromotive force. The obtained results confirm the proposed hypothesis and contribute to the development of scientific knowledge on controlled dynamic braking modes of electric drives. The practical significance of the study lies in the applicability of the results to the design and tuning of automatic control systems for industrial electric drives.

Keywords: electric drive; dynamic braking; pulse converter; discontinuous current; mechanical characteristic; simulation modeling

For citation: A. Abzalkhanov. Static Characteristics of a Controlled Electric Drive in Dynamic Braking Mode // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 83–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



ДИНАМИКАЛЫҚ ТЕЖЕУ РЕЖИМІНДЕГІ РЕТТЕЛЕТІН ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ СТАТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

А.Б. Абзалханов

"Logistic Service Kazakhstan" ЖШС, Алматы, Қазақстан.

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com

Алимхан Абзалханов — менеджер, "Logistic Service Kazakhstan" ЖШС, Алматы, Қазақстан

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9773-575X>.

© А.Б. Абзалханов

Аннотация. Бұл жұмыс жоғары жиілікті импульстік түрлендіргіштерді қолдану арқылы басқарылатын динамикалық тежеу режиміндегі тұрақты және айнымалы тоқты реттелетін электр жетектерін зерттеуге арналған. Өнеркәсіптік электр жетектеріне қойылатын энергия тиімділігі мен сенімділік талаптарының артуы тежеу режимдерінде күштік бөлікте жүретін процестерді терең талдауды және токтың үзік және үздіксіз режимдерінің статикалық әрі механикалық сипаттамаларға әсерін бағалауды қажет етеді. Зерттеудің мақсаты – динамикалық тежеу режиміндегі реттелетін электр жетегінің күштік бөлігінің параметрлерін негіздеу және импульстік түрлендіргіштердің тұрақты жұмыс диапазонының шекараларын анықтау. Осы мақсатқа жету үшін схемалық шешімдерді талдау, имитациялық модельдерді әзірлеу, статикалық, реттеу және механикалық сипаттамаларды зерттеу, сондай-ақ импульстік түрлендіргіштің шектік толтыру коэффициентін анықтау міндеттері қойылды. MATLAB–Simulink ортасында жүргізілген аналитикалық және имитациялық модельдеу нәтижесінде әртүрлі қуаттағы электр жетектерінің статикалық және механикалық сипаттамалары алынды. Электр қозғалтқышының қуаты артқан сайын үзік ток аймағының тарылып, үздіксіз ток аймағының кеңейетіні анықталды. Ток режимдерінің ауысуына сәйкес келетін импульстік түрлендіргіштің шектік толтыру коэффициенттері анықталып, олардың якорь тізбегінің уақыт тұрақтысына тәуелділігі әлсіз екені көрсетілді. Алынған нәтижелер ұсынылған гипотезаның дұрыстығын растайды және басқарылатын динамикалық тежеу режимдеріндегі электр жетектер туралы ғылыми түсініктерді толықтырады. Зерттеу нәтижелерін электр жетектерін жобалау мен автоматты басқару жүйелерін баптау кезінде қолдануға болады.

Түйін сөздер: электр жетегі; динамикалық тежеу; импульстік түрлендіргіш; үзік ток; механикалық сипаттама; имитациялық модельдеу

Дәйексөздер үшін: А.Б. Абзалханов. Динамикалық тежеу режиміндегі реттелетін электр жетегінің статикалық сипаттамалары // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 83–102 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

А.Б. Абзалханов

ТОО "Logistic Service Kazakhstan", Алматы, Казахстан.

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com

Алимхан Абзалханов — менеджер, ТОО "Logistic Service Kazakhstan", Алматы, Казахстан
E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9773-575X>.

© А.Б. Абзалханов



Аннотация. Работа посвящена исследованию регулируемых электрических приводов постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения с применением высокочастотных импульсных преобразователей. Повышение требований к энергоэффективности, надёжности и управляемости промышленных электроприводов обуславливает необходимость углублённого анализа процессов, протекающих в силовой части привода при торможении, а также оценки влияния режимов прерывистого и непрерывного тока на его статические и механические характеристики. Целью исследования является обоснование параметров силовой части регулируемого электропривода и определение границ устойчивого рабочего диапазона импульсных преобразователей в режиме динамического торможения. Для достижения цели решены задачи выбора схемных решений, разработки имитационных моделей, исследования статических, регулирующих и механических характеристик, а также определения граничных значений скважности импульсных преобразователей. С использованием аналитических методов и имитационного моделирования в среде MATLAB–Simulink получены семейства статических и механических характеристик электроприводов различной мощности. Установлено, что с увеличением мощности электрического двигателя область прерывистого тока существенно сужается, а область непрерывного тока расширяется. Определены граничные значения скважности импульсных преобразователей, соответствующие переходу между режимами тока, и показано, что в широком диапазоне мощностей они слабо зависят от постоянной времени якорной цепи и в основном определяются величиной ЭДС. Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу и расширяют научные представления о режимах управляемого динамического торможения. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных зависимостей при проектировании и настройке систем автоматического регулирования электроприводов.

Ключевые слова: электрический привод; динамическое торможение; импульсный преобразователь; прерывистый ток; механическая характеристика; имитационное моделирование

Для цитирования: А.Б. Абзалханов. Статические характеристики регулируемого электропривода в режиме динамического торможения // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 83–102. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современное развитие электроприводов промышленного назначения характеризуется широким внедрением регулируемых систем с использованием силовой полупроводниковой электроники. Особое место в таких системах занимают режимы торможения, в частности режим управляемого динамического торможения, который широко применяется в металлургии, горнодобывающей промышленности, транспортных установках и технологических комплексах с повышенными требованиями к безопасности, энергоэффективности и точности управления.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых регулируемым электроприводам постоянного и переменного тока, вопросы, связанные с влиянием импульсных преобразователей на статические и механические характеристики электропривода в режиме динамического торможения, остаются недостаточно изученными. В частности, отсутствует единый подход к определению границ рабочего диапазона импульсных преобразователей, условий перехода между режимами прерывистого и непрерывного тока, а также к оценке влияния параметров якорной цепи и управляющих воздействий на устойчивость тормозных режимов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и эффективности регулируемых электроприводов за счёт обоснованного выбора элементов силовой части, оптимизации режимов работы импульсных преобразователей и уточнения методик имитационного моделирования. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов при проектировании и настройке систем автоматического регулирования электроприводов, работающих в режиме динамического торможения, с использованием высокочастотных импульсных преобразователей (Bołtowski, 2020: 15–421; Gabriel, 2021: 37; Bauer, 2020: 24; Shimizu, 2018: 2; Zhang, 2020: 648–655).

Объектом исследования является регулируемый электрический привод постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения.

Предметом исследования являются статические, регулирующие и механические характеристики электропривода, формируемые при работе импульсных преобразователей в силовой части якорной (или статорной) цепи.

Целью исследования является разработка и анализ имитационных моделей регулируемых электроприводов для обоснования параметров силовой части и определения граничных условий устойчивой работы в режиме управляемого динамического торможения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ и выбор основных схемных решений силовой части электропривода в режиме регулируемого динамического торможения;
- разработка имитационных моделей и программных средств для исследования статических и динамических характеристик электроприводов;
- определение рабочего диапазона импульсного преобразователя, обходящего якорную цепь, и установление граничных значений скважности;
- исследование влияния параметров импульсного преобразователя и индуктивных элементов цепи якоря на характеристики электропривода;
- анализ механических характеристик электроприводов различной мощности в режимах прерывистого и непрерывного тока.

Методы исследования включают аналитические методы теории электрических цепей и электромеханических систем, а также методы имитационного моделирования с использованием программных пакетов MATLAB и Simulink (включая библиотеки SimPowerSystems). В процессе работы применялись численные методы интегрирования дифференциальных уравнений с переменным шагом, обеспечивающие адекватный учёт нелинейных процессов в силовых полупроводниковых устройствах.

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей перехода электропривода из режима прерывистого тока в режим непрерывного при динамическом торможении, а также в получении алгебраических зависимостей граничных значений скважности импульсных преобразователей, слабо зависящих от постоянной времени якорной цепи в широком диапазоне мощностей.

Практическая значимость состоит в возможности использования полученных зависимостей и рекомендаций при проектировании регулируемых электроприводов и синтезе систем автоматического регулирования, обеспечивающих устойчивое и энергоэффективное динамическое торможение.

Материалы и методы исследования

Методология исследования направлена на комплексное изучение процессов, протекающих в регулируемых электрических приводах постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения, с учётом влияния импульсных преобразователей на их статические, регулирующие и механические характеристики.

В рамках работы рассматривались следующие основные исследовательские вопросы:

- каким образом параметры импульсного преобразователя и якорной цепи электрического двигателя влияют на статические и механические характеристики электропривода в режиме динамического торможения;

- каковы граничные условия перехода электропривода от режима прерывистого тока к режиму непрерывного;

- как изменяется рабочий диапазон импульсного преобразователя при варьировании мощности электрического двигателя и значений ЭДС якоря;

- в какой степени параметры индуктивных и активных элементов силовой части определяют устойчивость и жёсткость механических характеристик электропривода.

В качестве рабочей гипотезы принято положение о том, что устойчивость и рабочий диапазон регулируемого электропривода в режиме динамического торможения в значительной степени определяются режимом тока якорной (или статорной) цепи, а граничные значения скважности импульсного преобразователя слабо зависят от постоянной времени якорной цепи в широком диапазоне мощностей электрических машин. Предполагается, что переход от режима прерывистого тока к режиму непрерывного может быть описан аналитической зависимостью, подтверждаемой средствами имитационного моделирования.

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов:

- Аналитический этап, включающий анализ известных схемных решений регулируемых электроприводов в режиме динамического торможения, а также теоретическое описание процессов в якорной цепи при использовании импульсных преобразователей.

- Этап разработки имитационных моделей, на котором создавались математические и структурные модели электроприводов постоянного и переменного тока с независимым возбуждением и частотным управлением. Модели учитывали нелинейные элементы, импульсные режимы работы силовых ключей и реальные параметры электрических машин.

- Этап имитационных экспериментов, включающий исследование статических, регулирующих и механических характеристик электроприводов различной мощности, а также определение граничных значений скважности импульсных преобразователей.

- Этап обработки и анализа результатов, на котором выполнялась интерпретация полученных зависимостей, сравнительный анализ характеристик для различных мощностей и формулировка обобщённых выводов.

Материалом исследования являлись:

- математические модели регулируемых электроприводов постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 5,5; 15; 30 и 68 кВт;

- модели асинхронных электроприводов с частотным управлением в диапазоне мощностей от 4 до 160 кВт;

- параметры якорных и статорных цепей электрических машин, включая активные сопротивления, индуктивности, ЭДС и электромеханические постоянные времени;

- результаты имитационных экспериментов, полученные в среде MATLAB–Simulink.

Характеристика материала исследования носит как качественный, так и количественный характер. Качественный анализ включал изучение форм характеристик, областей устойчивости и режимов работы, тогда как количественный анализ основывался на вычислении токов, напряжений, моментов, угловых скоростей и коэффициентов жёсткости в относительных и абсолютных единицах. Выбор диапазонов параметров и мощности электрических машин обеспечивает репрезентативность и достоверность полученных выводов.

В работе использовались следующие методы:

- аналитические методы теории электрических цепей и электромеханических систем для вывода уравнений состояния и установления функциональных зависимостей;

- методы имитационного моделирования, реализованные в программных пакетах MATLAB 7.01 – Simulink 6.1 и MATLAB 7.0 (R2010b) – Simulink 7, с применением библиотек SimPowerSystems;

- численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, включая одношаговый метод Рунге–Кутты второго и третьего порядка (ode23tb) с переменным шагом интегрирования;

- графоаналитические методы для определения жёсткости механических характеристик и анализа переходных границ режимов работы;

- методы сравнительного анализа для сопоставления характеристик электроприводов различной мощности и типов.

При проведении имитационных экспериментов максимальный шаг интегрирования выбирался с учётом наименьших постоянных времени исследуемых систем и частоты коммутации импульсных преобразователей, что обеспечивало допустимую погрешность моделирования и корректный учёт нелинейных процессов.

Новизна используемых материалов и методов заключается в совместном применении аналитических зависимостей и имитационных моделей для определения граничных значений скважности импульсных преобразователей, а также в исследовании их слабой зависимости от постоянной времени якорной цепи в широком диапазоне мощностей электрических машин.

Результаты и обсуждение

Для выбора элементов силовой части регулируемого электропривода в режиме динамического торможения, определения границ рабочего диапазона и оценки влияния управляющих воздействий на статические характеристики решаются следующие задачи (Terzić, 2016: 117–123; Кудрявцев, 2007: 86–90; Мещеряков, 2015: 175–17; Isembergenov, 2018: 59–66; Демина, 2019: 50):

Выбор основных вариантов схемных решений силовой части электропривода в режиме регулируемого динамического торможения.

Разработка имитационных моделей и программ для проведения экспериментов.

Определение рабочего диапазона импульсного преобразователя, обходящего якорную цепь, для обеспечения устойчивого торможения.

Исследование влияния работы импульсного преобразователя в цепи якоря электрического двигателя на статические и динамические характеристики электропривода.

Изучение регулирующих и механических характеристик статической части электропривода.

Для определения статических характеристик применялись аналитические методы и методы имитационного моделирования. Экспериментальное моделирование проводилось с использованием программного пакета MATLAB 7.01 – Simulink 6.1 и MATLAB 7.0 (R2010b) – Simulink 7. В ходе имитационных экспериментов было установлено, что параметры индуктивных компонентов цепи якоря электрического двигателя существенно влияют на статические характеристики постоянного тока электропривода при работе с импульсным широтно-импульсным преобразователем (ШИМ).

Для определения статических характеристик электропривода с помощью MATLAB–Simulink предлагается следующий метод имитационного эксперимента:

Использовать метод интеграции, учитывающий нелинейные динамические связи, такие как «импульсный преобразователь», с применением широтно-импульсной модуляции.

Рекомендуется применять одношаговый метод Рунге-Кутты второго и третьего порядка, называемый ode23tb.

Для сокращения времени эксперимента предлагается использовать метод с переменным шагом интегрирования. При проведении имитационных экспериментов с

полупроводниковыми силовыми элементами опыт показывает, что ограничение ставится только на максимальный шаг интеграции, а минимальный шаг выбирается автоматически.

Выбор максимального значения шага интегрирования определяется следующими условиями:

- шаг не должен превышать 0,1 от наименьшей временной постоянной исследуемой системы;
- для случая применения широтно-импульсной модуляции размер шага не должен превышать значение, определённое диапазоном регулирования и частотой коммутации импульсного преобразователя.

В таблице 1 приведены рекомендуемые значения максимального шага интегрирования для имитационного моделирования регулируемых электроприводов постоянного тока (РЭПТ) с импульсными частотными преобразователями для различных классов машин и механизмов.

Таблица 1 – Рекомендуемые значения максимального шага интегрирования

Вид преобразователя	Режим работы привода	Диапазон контроля	Коммутационная частота преобразователя	Рекомендуемый максимальный шаг интеграции
Импульсно-импульсный модулятор с высокочастотным импульсным преобразователем	Динамическое торможение	1:100	1 кГц	0,01 мкс

Таблица показывает тип преобразователя, режим работы привода, диапазон регулирования, частоту коммутации преобразователя и рекомендуемый максимальный шаг интегрирования. Для высокочастотного импульсного преобразователя с импульсной модуляцией в режиме динамического торможения с диапазоном регулирования 1:100 и частотой коммутации 1 кГц рекомендуется использовать максимальный шаг интегрирования 0,01 мкс. Это рекомендуется для обоснования допустимой погрешности моделирования.

Величина погрешности зависит от ожидаемых максимальных значений сигналов. Рекомендуемое соотношение составляет 0,01–0,001 от максимального значения токового и напряженческого сигналов в цепи силовой части электропривода.

Время моделирования задается значениями начала и окончания исследуемого процесса.

При получении статических характеристик моделей, включая типичные динамические звенья, скорость изменения заданного линейного возмущения определяется необходимостью снижения влияния динамических процессов в электромеханической части двигателя на статические характеристики РЭПТ.

На рисунке 1 приведена обобщённая функциональная схема модели РЭПТ для исследования статических характеристик.

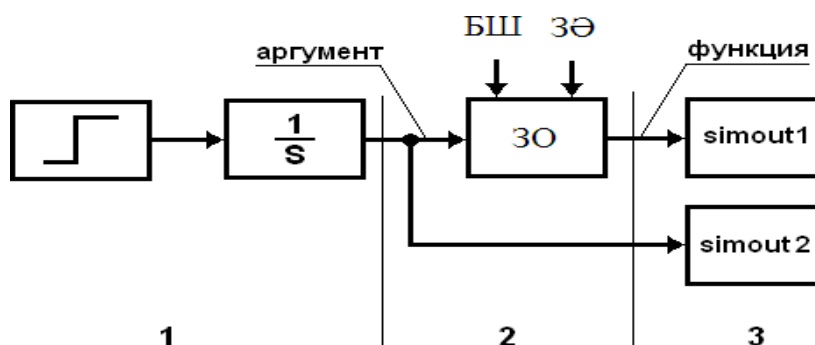


Рис. 1. Обобщённая функциональная схема модели для исследования статических характеристик электропривода

В функциональной схеме (Рис. 1) соответствующие блоки и координаты имеют следующие функциональные назначения:

- 1 – определитель линейно изменяющегося управляющего воздействия;
- 2 – исследуемый объект (ИО), начальные условия (НУ), вредное воздействие (ВВ);
- 3 – комплекс регистрации и измерений.

Значение постоянной составляющей на входе интегратора, формирующего заданное линейное изменение воздействия, выбирается по условию достижения аргументом номинального значения к концу периода моделирования. Для электропривода средней мощности рекомендуемые значения периода моделирования можно получить из соотношения (1).

$$\Delta t = 4 T_{\max \text{ОИ}} \quad (1)$$

Здесь Δt — длительность переходного временного интервала, $T_{\max \text{ОИ}}$ — максимальная постоянная времени исследуемого объекта. Конкретные характеристики исследуемого объекта, такие как входные и выходные координаты, начальные условия, диапазоны изменения, а также значения управляющих воздействий и возмущений определяются для каждой отдельной задачи имитационного моделирования. При решении различных задач в процессе моделирования эти параметры могут изменяться в зависимости от их характера.

Для анализа зависимости интегрального значения тока якоря от управляющего сигнала импульсного преобразователя в силовой части электропривода с независимым возбуждением электрического двигателя была создана имитационная модель неизменяемой части, показанная на рисунке 2.

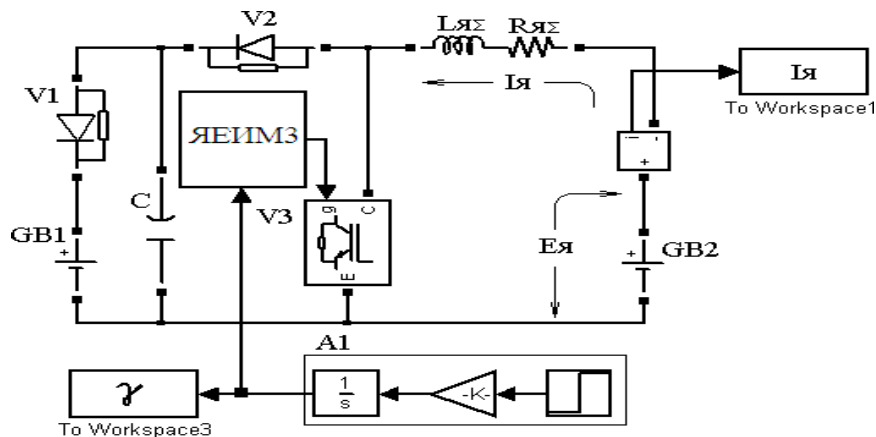


Рис. 2. Имитационная модель неизменяемой части электропривода с ограничением напряжения на конденсаторе

Блок А1 предназначен для формирования линейно изменяющегося управляющего воздействия.

Модель якорной электрической цепи электродвигателя включает активное сопротивление $R_{я}$, источник постоянного напряжения – GB2, модель ЭДС якоря. Управление режимом торможения осуществляется с помощью импульсного преобразователя V3, обозначенного как E3, и диода V2. В имитационной модели имеется нелинейная обратная связь, состоящая из элементов GB1 и V1. Регистрация зависимости тока якоря от управляющего сигнала осуществляется через блоки to workspace 3 и to workspace 1. Регулирующие характеристики снимаются при неизменных значениях постоянной ЭДС якоря в каждом эксперименте. Моделирование проводилось на примере электродвигателей номинальной угловой скорости 1500 об/мин и мощностями 5,5; 15; 30 и 68 кВт. В таблице 1 приведены технические характеристики электродвигателей. Результаты

имитационных экспериментов для соответствующих электродвигателей представлены на рисунке 3.

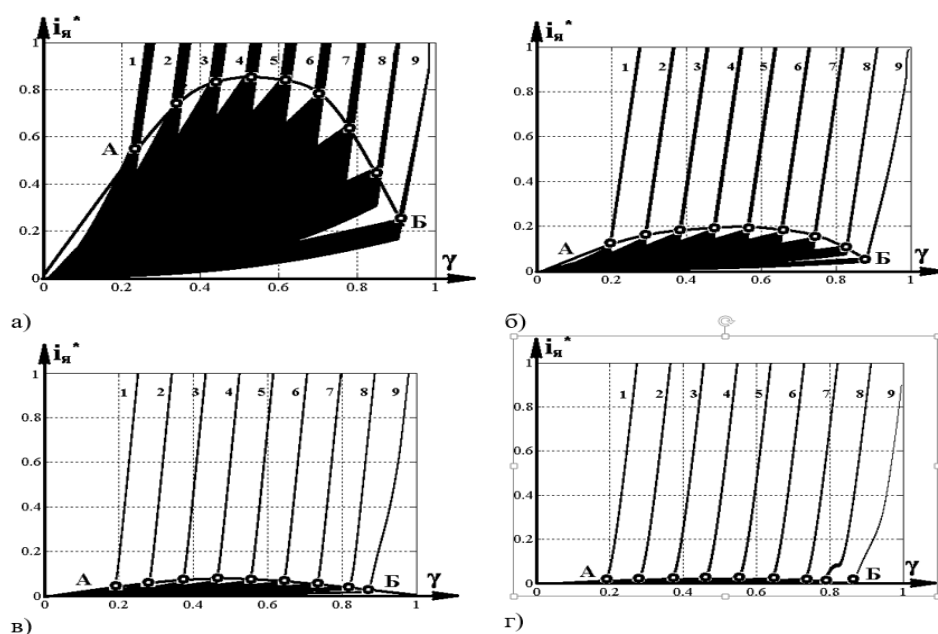


Рис. 3. Регулирующие характеристики электропривода по току якоря в скважинной функции импульсного преобразователя

Регулирующие характеристики приведены для различных значений напряжения ΔU_n .

$$\Delta U_n = U_{c.max} - E_{я}, \quad (2)$$

Соответствие количества регулирующих характеристик и значений разницы напряжений U_1 приведено в таблице 2.

Таблица 2. Соответствие значений U_n и регулирующих характеристик

№ характеристики	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta U, В$	50	100	150	200	250	300	350	400	450

В регулирующих характеристиках имеются две области: прерывистого и непрерывного тока. В нижней части характеристик, ограниченной дугами А–Б, электрический привод работает в режиме прерывистого тока, а в верхней части — в режиме непрерывного тока. При увеличении мощности электрического привода происходят следующие изменения: область прерывистого тока сужается, а область непрерывного тока расширяется. Это объясняется увеличением общей индуктивности якорной цепи и уменьшением её общего активного сопротивления (Рис. 3). При увеличении значения U_n переход от режима прерывистого тока к режиму непрерывного тока происходит при более высокой величине скважности, что указывает на сужение диапазона работы преобразователя при возрастании значения U_1 . Для расширения диапазона работы импульсного преобразователя ВЗ–ЕЗ (Рис. 3) необходимо уменьшить значение U_1 .

Граничное значение якорного тока, при котором происходит переход от режима двигателя к режиму торможения, сильно зависит от скважности преобразователя ВЗ–ЕЗ (Рис. 2) и достигает максимума при $\gamma = 0,5$. Это связано с наибольшей амплитудой пульсаций якорного тока, вызванной работой импульсного преобразователя ВЗ (Рис. 2), когда времена замкнутого и разомкнутого состояний ключа ВЗ совпадают, что

соответствует временам зарядки и разрядки общей индуктивности якорной цепи электродвигателя.

Исследование механических характеристик электрического привода является важным требованием при разработке системы автоматического регулирования. Для изучения механических характеристик регулируемого электропривода постоянного тока с независимым возбуждением была создана модель, функциональная схема которой представлена на рисунке 4. В данной модели ограничение в блоке "А" реализуется через нелинейную связь, состоящую из источника постоянного напряжения GB1 и диода V1.

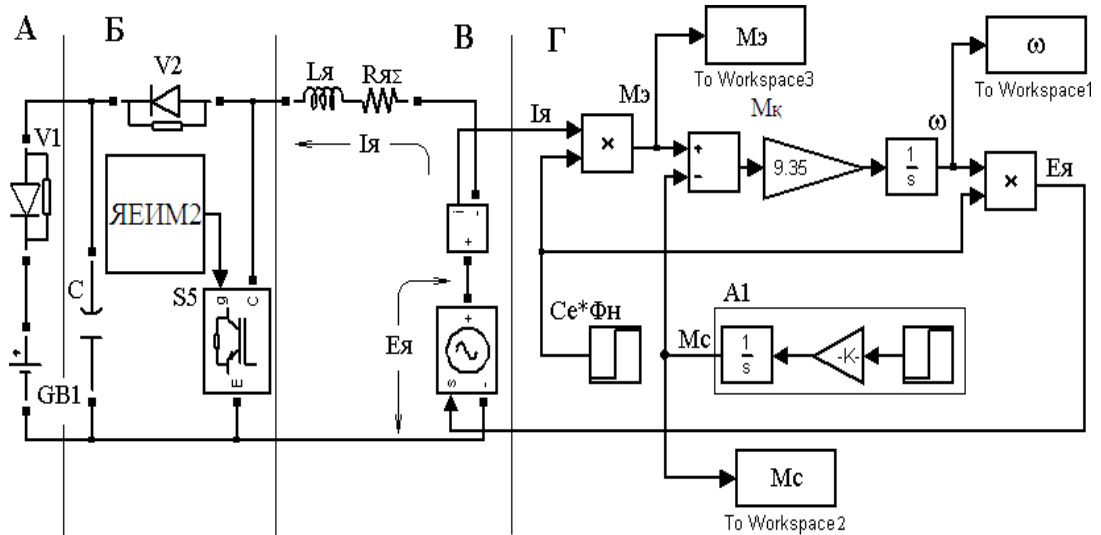


Рис. 4. Имитационная модель электрического привода с независимым возбуждением в режиме управляемого торможения

Исследования проводились с использованием инструментов имитационного моделирования на примере четырёхсерийных электрических двигателей. Модель, приведённая на рисунке 2.3, была разработана в прикладной среде программирования MATLAB R2010b с использованием библиотек Simulink и SimPowerSystems.

В модели электропривода ЭДС якоря представлена в виде источника статического напряжения Ея. В процессе имитационных экспериментов регистрировались значения напряжения на резисторе динамического торможения и величина сигнала управления импульсным преобразователем при помощи блоков to Workspace 3 и to Workspace 4 соответственно.

Модель электрической схемы якоря двигателя представлена функциональным блоком "В", в котором: значение L учитывает индуктивные компоненты, а значение R – активное сопротивление якоря двигателя, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки. Механическая часть электрического двигателя реализована в функциональном блоке "Г".

Для проведения сравнительного анализа механических характеристик двигателей разной мощности, электромагнитный момент и угловая скорость регистрировались в относительных единицах. В качестве базовых значений принимались номинальные значения момента и, соответственно, угловой скорости.

В ходе имитационных экспериментов была получена совокупность механических характеристик для различных значений скважности (см. таблицу 3) и мощности электрического привода.

Таблица 3 – Значения скважности γ .

№ х	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Г	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Результаты имитационных экспериментов показаны на рисунке 5

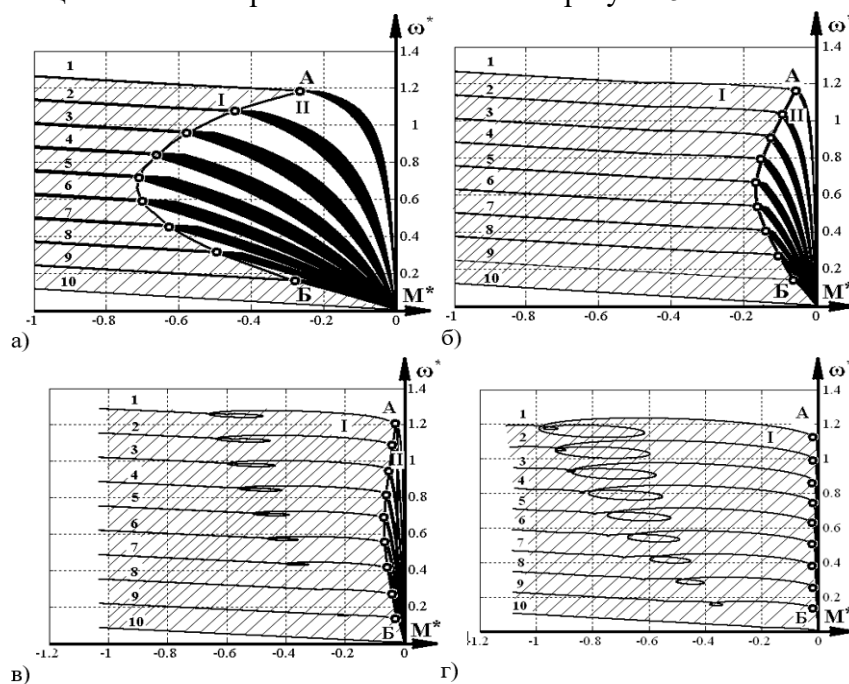


Рис. 5. Механические характеристики электрического привода с независимым возбуждением

Механические характеристики электрического привода с независимым возбуждением в режиме управляемого динамического торможения имеют две отчетливо выраженные области: область I, соответствующая непрерывному току, и область II — прерывистого тока, которые разделены между собой дугой "А–Б".

В режиме непрерывного тока механические характеристики для одного типа электрического двигателя располагаются параллельно друг другу в пределах одной диаграммы. В связи с этим жесткость характеристики можно определить, рассматривая вариант с полностью открытым транзистором VT2 в схеме импульсного преобразователя ЕИМ2–VT2 при любом значении скважности.

По мере увеличения мощности электрического привода область применения прерывистого тока уменьшается. Для привода мощностью 68 кВт установить режим непрерывного тока на всём диапазоне крутящего момента и значениях скважности импульсного преобразователя оказалось невозможным. В режиме непрерывного тока механическая жёсткость значительно выше, чем в режиме прерывистого тока, и разница в механической жёсткости между этими двумя режимами возрастает с увеличением электрической мощности.

Эти особенности механических характеристик необходимо учитывать при синтезе систем автоматического регулирования электрических приводов в режиме динамического торможения с использованием высокочастотных импульсных преобразователей.

Следует отметить, что в управляемом режиме торможения в приводе постоянного тока наблюдаются следующие явления: – изменение коэффициента передачи при переходе от режима прерывистого тока к непрерывному; – при этом с увеличением мощности электродвигателя область прерывистого тока существенно уменьшается, однако величина коэффициента передачи возрастает.

Установлено, что в процессе имитационных экспериментов режим прерывистого тока характерен для электрического привода в режиме динамического торможения, реализуемом с использованием обходной цепи якорного контура через импульсный преобразователь. В связи с этим возникает важная задача — определить граничные значения скважности импульсного преобразователя, описывающие переход от режима прерывистого тока к непрерывному.

Для реализации режима динамического торможения была разработана схема включения регулируемого электрического привода, показанная на рисунке 6.

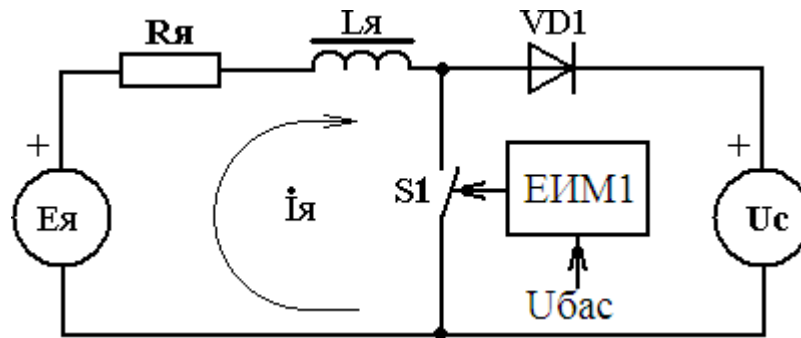


Рис. 6. Схема переключения регулируемого электрического привода в режиме динамического торможения

На рисунке 6 представлена схема переключения электрического привода в режиме динамического торможения. Коммутационный цикл импульсного преобразователя состоит из двух временных интервалов: – t_1 соответствует замкнутому состоянию силового ключа S1, – t_2 — открытому состоянию.

В течение первого интервала T_1 , при непрерывном токе на каждом этапе, начальные условия якорного тока принимают нулевые значения.

Для дальнейшего исследования перехода электрического привода от режима прерывистого тока к режиму непрерывного тока и определения области граничных значений скважности использовался численный метод. Исследование выполнено с использованием средств имитационного моделирования в среде MATLAB. Модель, применяемая в исследовании, показана на рисунке 7.

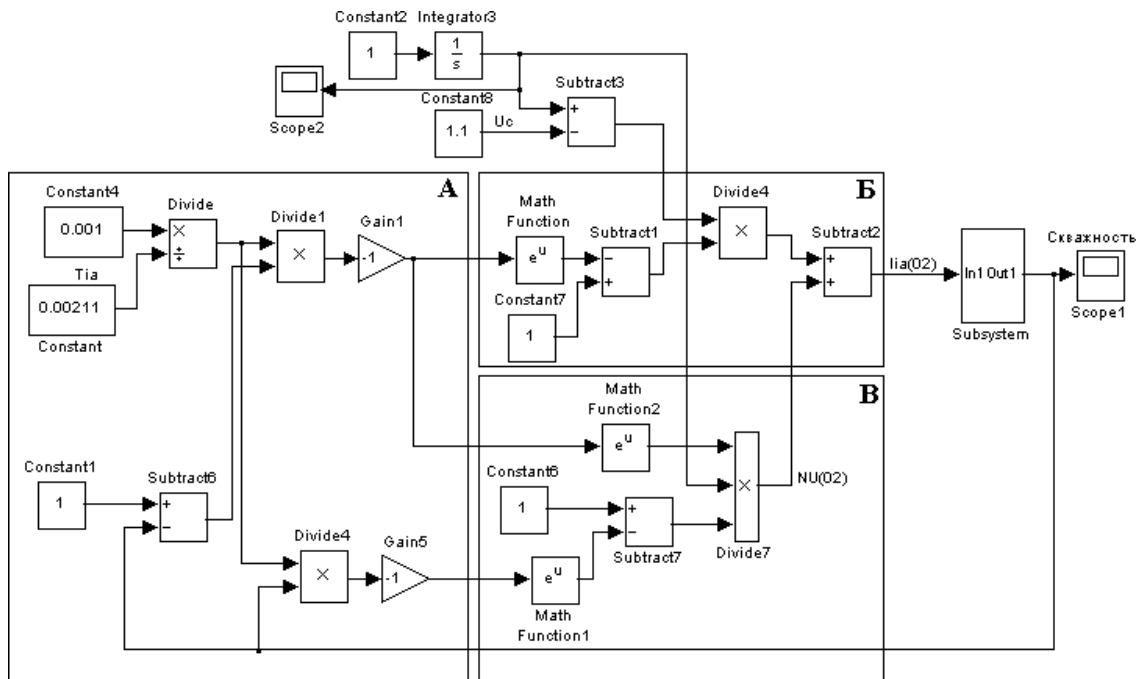


Рис. 7. Имитационная модель расчёта граничного значения скважности импульсного преобразователя в зависимости от ЭДС якоря

В блоке «А» рассчитываются значения показателей степени двух слагаемых выражения (8). Первое слагаемое моделируется с помощью блока «В», второе — с помощью блока «в». Линейное возрастание значения ЭДС якоря формируется с использованием блоков Constant2 и Integrator3.

Для заданного постоянного значения времени якоря, в соответствии с таблицей 4, с целью расчёта граничного значения скважности и обеспечения выполнения условия, выражение (10), а также модель выражения (12), реализованы в виде блока Subsystem на рисунке 7 и дополнены отрицательной обратной связью с интегральным законом.

В результате имитационного эксперимента была получена графическая зависимость граничного значения скважности от постоянной времени якоря и ЭДС.

Таблица 4 – Значения постоянной времени якоря для имитационных экспериментов с 1 по 8.

№ И.Э.	1	2	3	4	5	6	7	8
Дви гатель (Р,кВт)	–	4ПФ112S (5,5)	4ПФ132S (15)	–	4ПФ160S (30)	–	–	4ПФ180 М (68)
Тя, мС		2,11	9,44		39			154

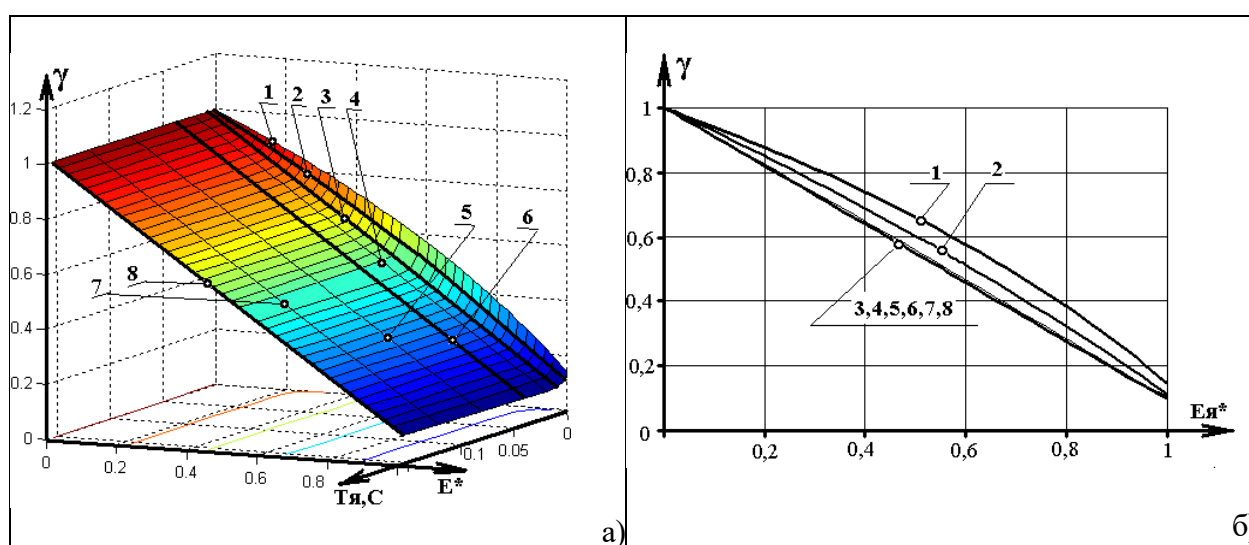


Рис. 8. Граничные значения скважности

На рисунке 8а представлены граничные значения скважности для электрического привода в режиме прерывистого тока. На рисунке 8б показаны проекции зависимости скважности импульсного преобразователя от ЭДС якоря. В целях изучения этих зависимостей были проведены имитационные эксперименты.

Для электродвигателей с постоянным соотношением времени импульса 0,1 с временем, граничные значения скважности демонстрируют почти линейную зависимость от ЭДС якоря. Однако на практике эти значения практически не зависят от значения постоянной времени. Для подтверждения этого вывода были построены проекции зависимости скважности от ЭДС якоря при различных значениях постоянной времени якоря с использованием табличного редактора Excel. Максимальная ошибка между зависимостями для скважности при значениях 0,009469 с и 0,1541 с не превысила 1 %.

Таким образом, для регулируемого привода постоянного тока в режиме динамического торможения получена алгебраическая зависимость граничных значений скважности импульсного преобразователя S1–EIM1 (11) в области значений постоянной времени якорной цепи.

В управляемом режиме динамического торможения была разработана имитационная модель асинхронного электрического привода в среде MatLab 7.01 для определения его регулировочных характеристик. Модель показана на рисунке 9.

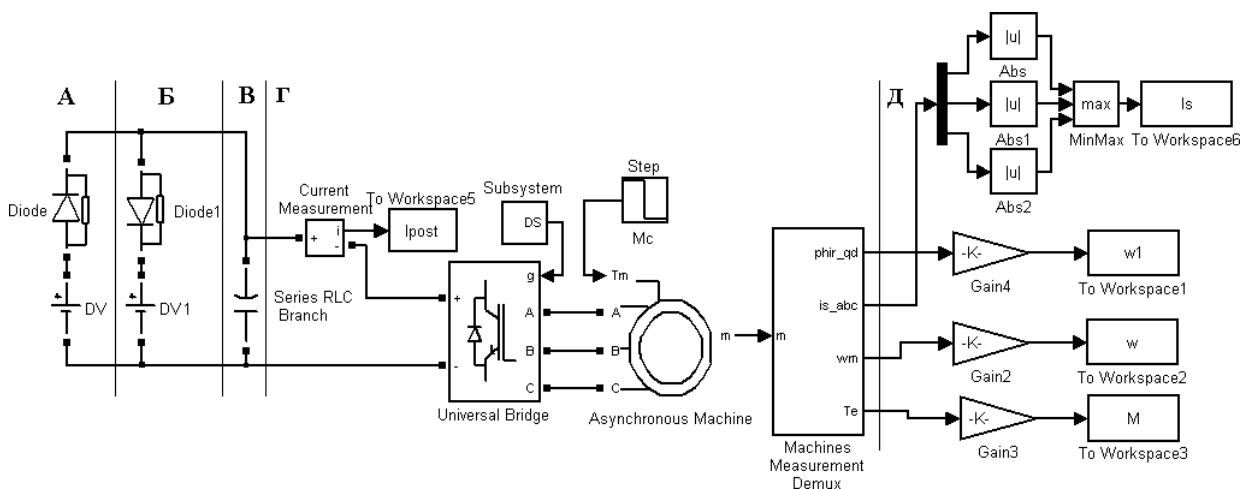


Рис. 9. Модель моделирования асинхронного электрического привода в режиме динамического торможения

В модели моделирования группы элементов объединены в функционально завершённые блоки, выполняющие следующие функции:

Блок "А" моделирует начальные условия напряжения на конденсаторе последовательной RLC-ветви;

Блок "Б" реализует функции ограничения напряжения на этом конденсаторе;

Блок "Г" содержит модель электродвигателя с инвертором и системой управления;

Блок "Д" включает регистрирующее оборудование с элементами масштабирования и преобразования зафиксированных сигналов.

Нелинейная цепь сектора "А" модели задаёт начальные условия напряжения на обкладках конденсатора, а в секторе "Б" реализована модель ограничения напряжения на конденсаторе С1, который находится в секторе "В".

Во время моделирования момент вращения двигателя задаётся через блок Step. Для питания асинхронного двигателя через Subsystem формируется трёхфазное напряжение с управляемыми частотой и амплитудой.

В ходе имитационного эксперимента были зафиксированы зависимости следующих параметров:

Угловая скорость электрического привода,

Модуль тока в обмотках статора двигателя,

Постоянный ток на входе автономного инвертора,

Электромагнитный момент в функции сигнала управления частотой питающего напряжения статора двигателя (Рис. 10).

Регулировочные характеристики асинхронного привода в режиме динамического торможения имеют два участка — "А" и "Б", которые различаются направлением тока в цепи постоянного напряжения (Рис. 10).

В области "Б" направление тока соответствует режиму, при котором энергия, вырабатываемая электродвигателем, расходуется на нагрев динамического тормозного резистора r_{tr_trt} (Рис. 10).

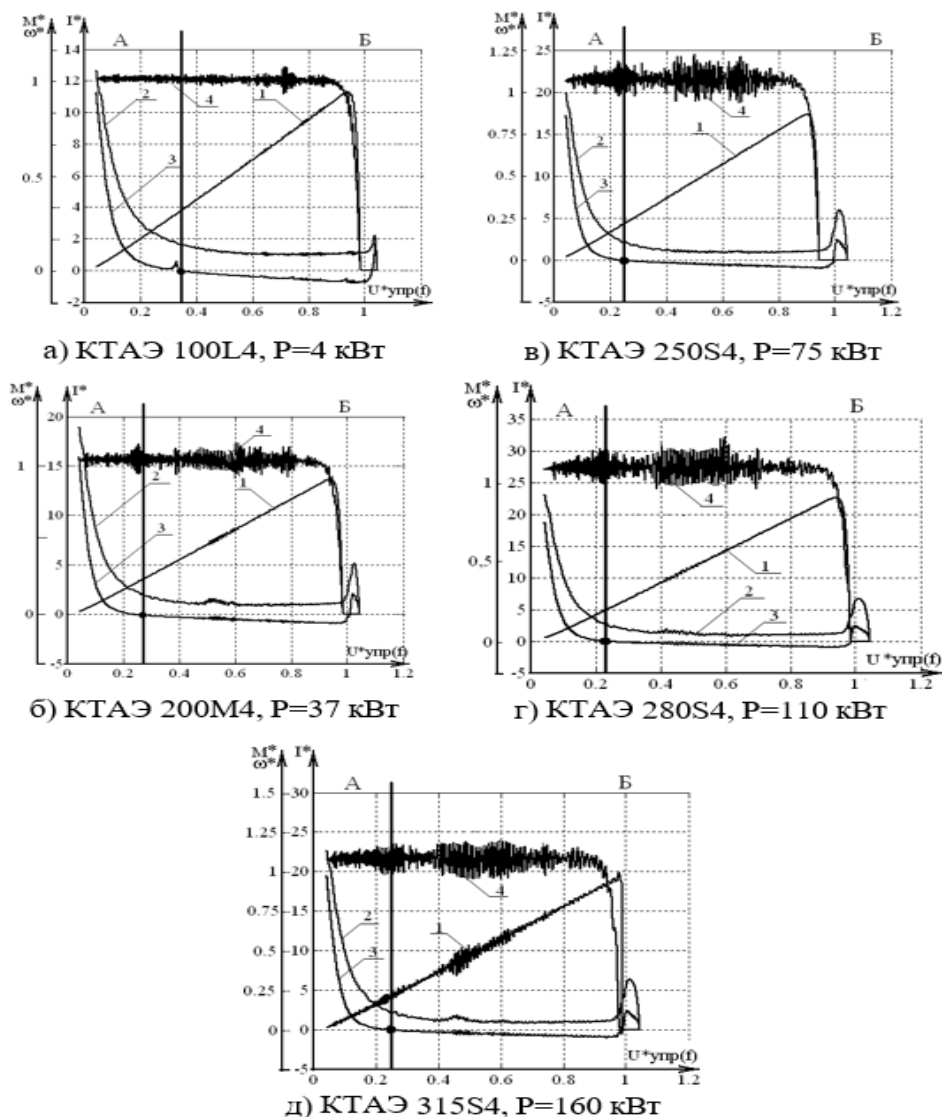


Рис. 10. Регулировочные характеристики асинхронного электрического привода в режиме динамического торможения

Здесь: m^* , ω^* , I^* — электромагнитный момент, угловая скорость и ток в статорной цепи соответственно в относительных единицах.

В этом случае управление режимом торможения через управляющий канал может быть реализовано в диапазоне 1:4 для электрических приводов мощностью более 37 кВт. Для приводов мощностью менее 37 кВт наблюдается незначительное сокращение диапазона регулирования. Так, для электрического привода мощностью 4 кВт диапазон регулирования в области "Б" составляет 1:3.

Технологический режим торможения может быть реализован в диапазоне не менее 1:20 в областях "А" и "Б". В области "А" режим торможения осуществляется исключительно за счёт потребления электроэнергии от внешнего источника.

Для получения механических характеристик электрического привода в исследуемом режиме была разработана имитационная модель электрического привода, приведённая на рисунке 11.

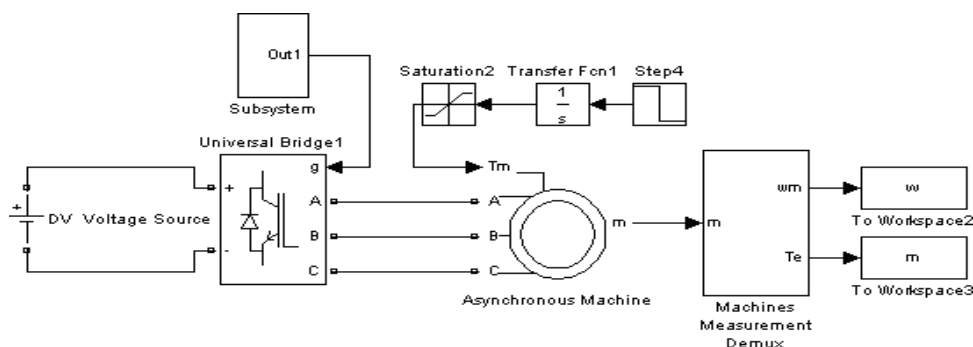


Рис. 11. Модель моделирования электрического привода для исключения механических характеристик в режиме генератора

Элементы модели моделирования выполняют следующие функции:

DV – источник постоянного напряжения;

Subsystem – система управления инвертором;

Universal Bridge 1 – управляемый инвертор;

Asynchronous Machine – модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;

Machines Measurement Demux – формирователь выходных координат электродвигателя;

Saturation – блок ограничения максимального значения крутящего момента;

Transfer FCN1 – интегратор;

Step4 – блок, определяющий темп увеличения крутящего момента.

Инвертор Universal Bridge 1 смоделирован с использованием блока источника постоянного напряжения DC Voltage Source. Механические характеристики были получены для различных значений частоты напряжения обмоток статора, заданных в таблице 2, при условии, что амплитуда напряжения обмоток статора во всех имитационных экспериментах оставалась неизменной и соответствовала номинальной величине. В ходе имитационного эксперимента крутящий момент изменялся в соответствии с линейным законом, который формировался с помощью блоков Saturation 2, Transfer FCN1 и Step4. С целью уменьшения влияния интегрального закона изменения крутящего момента на искажение механической производительности, время интегратора transfer FCN1 было выбрано в два раза больше максимальной временной постоянной электродвигателя.

Таблица 5 – Соответствие номеров механических характеристик статора и частот напряжения.

№ характеристики	1	2	3	4	5
Частота напряжения обмоток статора, Гц	50	40	30	20	10

Для рассматриваемых типов электрических двигателей в результате имитационного моделирования получено семейство механических характеристик управляемого динамического торможения, представленных в секторе «А». Сравнительный анализ жесткости полученных механических характеристик был выполнен для асинхронных электроприводов с частотным управлением мощностью в диапазоне от 4 кВт до 160 кВт. Определение жесткости осуществлялось с помощью выражения и графоаналитического метода на линейных участках в секторе «А».

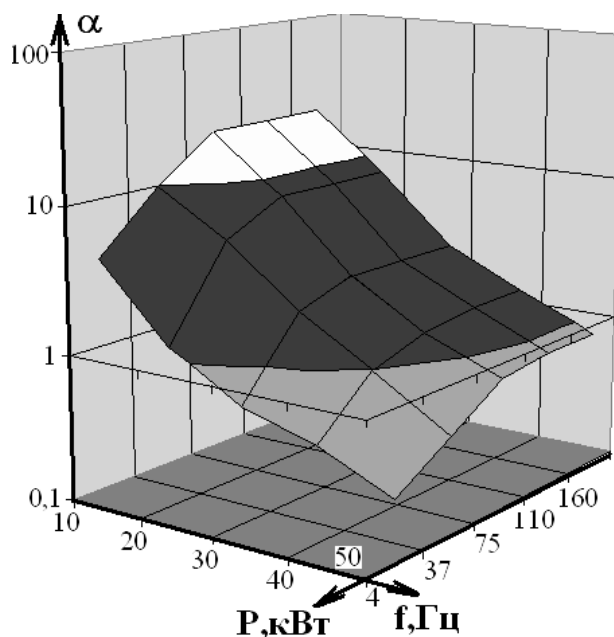


Рис. 12. Зависимость жесткости механической характеристики асинхронного электропривода от частоты напряжения на обмотках статора при различных значениях мощности.

Для электродвигателей с мощностью от 4 до 160 кВт при снижении частоты питающего напряжения обмоток статора наблюдается более чем десятикратное увеличение жесткости механической характеристики. В диапазоне мощности электродвигателя от 75 до 160 кВт жесткость практически не изменяется при одной и той же частоте напряжения, тогда как при уменьшении мощности привода от 75 кВт до 4 кВт жесткость напряжения снижается в 10 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе выполнено комплексное исследование регулируемых электрических приводов постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения с использованием импульсных преобразователей. Основной целью исследования являлось обоснование параметров силовой части электропривода, определение границ устойчивого рабочего диапазона импульсных преобразователей и анализ влияния управляющих воздействий на статические, регулирующие и механические характеристики электрических машин различной мощности. Поставленная цель была реализована посредством сочетания аналитических методов и имитационного моделирования, что позволило получить достоверные и воспроизводимые результаты.

Для достижения поставленных задач была разработана совокупность имитационных моделей электроприводов постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронных электроприводов с частотным управлением. В моделях учитывались реальные параметры якорных и статорных цепей, нелинейные характеристики силовых полупроводниковых элементов, режимы широтно-импульсной модуляции и влияние индуктивных компонентов цепи. Применение численных методов интегрирования с переменным шагом, адаптированных к особенностям импульсных режимов, обеспечило корректное воспроизведение динамических процессов и позволило получить статические характеристики с допустимой погрешностью моделирования.

В ходе исследования установлено, что параметры индуктивных и активных элементов якорной цепи оказывают существенное влияние на формирование статических и регулирующих характеристик электропривода в режиме динамического торможения. Показано, что при увеличении мощности электрического двигателя область работы в режиме прерывистого тока существенно сужается, тогда как область непрерывного тока

расширяется. Это обусловлено ростом суммарной индуктивности якорной цепи и снижением её активного сопротивления, что приводит к уменьшению амплитуды пульсаций тока и повышению устойчивости тормозного режима.

Получены семейства регулирующих характеристик по току якоря для электроприводов различной мощности при варьировании скважности импульсного преобразователя и значений разности напряжений между максимальным напряжением конденсатора и ЭДС якоря. Установлено, что при увеличении указанной разности напряжений переход от режима прерывистого тока к режиму непрерывного происходит при более высоких значениях скважности, что фактически сужает рабочий диапазон импульсного преобразователя. На основании этого сделан вывод о целесообразности уменьшения разности напряжений для расширения диапазона устойчивой работы силовой части электропривода в режиме динамического торможения.

Важным результатом исследования является определение граничных значений скважности импульсного преобразователя, соответствующих переходу электропривода от режима прерывистого тока к режиму непрерывного. С использованием имитационного моделирования и численных методов показано, что в широком диапазоне мощностей электрических машин и значений постоянной времени якорной цепи данные граничные значения демонстрируют слабую зависимость от инерционных параметров якоря и в основном определяются величиной ЭДС. Полученные зависимости подтверждают выдвинутую в работе гипотезу и позволяют упростить инженерные расчёты при проектировании регулируемых электроприводов.

Исследование механических характеристик электроприводов постоянного тока в режиме управляемого динамического торможения показало наличие двух отчётливо выраженных областей, соответствующих режимам непрерывного и прерывистого тока. Установлено, что в режиме непрерывного тока механические характеристики обладают значительно большей жёсткостью по сравнению с режимом прерывистого тока, причём разница в жёсткости возрастает с увеличением мощности электропривода. Данные особенности необходимо учитывать при синтезе систем автоматического регулирования, так как изменение режима тока приводит к скачкообразному изменению коэффициента передачи и динамических свойств системы.

В ходе работы также выполнено моделирование асинхронных электроприводов с частотным управлением в режиме динамического торможения. Показано, что регулировочные и механические характеристики асинхронного привода имеют два характерных участка, различающихся направлением потока энергии в цепи постоянного тока. Установлено, что для электроприводов мощностью более 37 кВт управление режимом торможения может быть реализовано в достаточно широком диапазоне, тогда как для приводов меньшей мощности наблюдается некоторое сокращение диапазона регулирования. Полученные зависимости жёсткости механических характеристик от частоты питающего напряжения и мощности двигателя подтверждают возможность эффективного управления тормозными режимами путём изменения частоты и амплитуды напряжения статора.

На основании выполненного исследования можно сделать вывод о том, что поставленные цели и задачи работы полностью реализованы, а выдвинутая гипотеза получила теоретическое и экспериментальное подтверждение. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных представлений о режимах управляемого динамического торможения электрических приводов и уточняют условия устойчивой работы импульсных преобразователей в силовой части электропривода.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования при проектировании и модернизации регулируемых электроприводов для промышленных установок, а также при разработке алгоритмов управления систем автоматического регулирования, работающих в режимах торможения. Предложенные зависимости и

рекомендации могут быть использованы для выбора параметров импульсных преобразователей, оценки допустимых диапазонов скажности и повышения надёжности тормозных режимов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением разработанных моделей на многодвигательные системы, учётом тепловых процессов в силовых элементах и электрических машинах, а также исследованием влияния цифровых систем управления и адаптивных алгоритмов регулирования на характеристики электроприводов в режиме динамического торможения. Кроме того, представляется целесообразным проведение натурных экспериментальных исследований для верификации полученных результатов и уточнения рекомендаций для конкретных промышленных применений.

ЛИТЕРАТУРА

- Bołtowski, 2020 — Bołtowski P., Król R., Nowak-Szpak A., Ozdoba M. Preliminary studies of the impact of a conveyor belt on the noise emission // Department of Mining, Faculty of Geoengineering, Wrocław University of Science and Technology. — Wrocław. — 2020. — P. 15–421. [Eng.]
- Gabriel, 2021 — Gabriel W., Ruyschaert Z. Making risk-informed decisions to optimize drilling operations using along-string measurements with wired drill pipe — a high-speed, high-quality telemetry alternative to traditional mud pulse telemetry. — Stavanger: University of Stavanger. — June 2021. — P. 37. [Eng.]
- Bauer, 2020 — Bauer S. Technology market leader and pioneer for innovations, at the same time down-to-earth with responsibility towards society and environment — that's our goal. — Schrobenuhausen: BAUER Maschinen GmbH. — 2020. — P. 24. [Eng.]
- Shimizu, 2018 — Shimizu T., Kunomura K., Kai M., Miyajima H., Matsui T. Study for further introduction of the electronic frequency converters to the Tokaido Shinkansen // IEEE International Power Electronics Conference (IPEC–Niigata 2018 – ECCE Asia). — 2018. — P. 2. [Eng.]
- Zhang, 2020 — Zhang B., Li L., Qiu Y., Dai Q., Li S., Deng Y. Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation // Natural Gas Industry B. — 2020. — Vol. 7. — Issue 6. — P. 648–655. [Eng.]
- Terzić, 2016 — Terzić B., Despalatović M., Majić G., Stergulc M., Kriletić A., Šormaz K. Razvoj pretvarača frekvencije za visokobrzinske generatore s permanentnim magnetima u kogeneracijskim postrojenjima // Tehnički glasnik. — 2016. — Vol. 10. — № 3–4. — P. 117–123. [Croat.]
- Кудрявцев, 2007 — Кудрявцев А. В. Исследование преобразователя частоты регулируемого электропривода на базе четырехуровневого инвертора напряжения // Записки Горного института. — Санкт-Петербург. — 2007. — Т. 173. — С. 86–90. [Russ.]
- Мещеряков, 2015 — Мещеряков В. Н. и др. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода // Системы промышленных электроприводов переменного тока (ЭППТ-2015): материалы конф. — Екатеринбург. — 05–09 октября 2015 г. — С. 175–178. [Russ.]
- Isembergenov, 2018 — Isembergenov N. T. Power frequency converter built on transistors // Ural Radio Engineering Journal. — 2018. — Vol. 2. — № 1. — P. 59–66. [Eng.]
- Демина, 2019 — Демина Г. А. Оборудование «Силовых машин» для горнодобывающей промышленности // Горная промышленность. — 2019. — № 6. — С. 50. [Russ.]

REFERENCES

- Bołtowski, 2020 — Bołtowski, P., Król, R., Nowak-Szpak, A., Ozdoba, M. (2020). Preliminary studies of the impact of a conveyor belt on the noise emission. — Wrocław: Department of Mining, Faculty of Geoengineering, Wrocław University of Science and Technology. — 2020. — Pp. 15–421. [in Eng.]
- Gabriel, 2021 — Gabriel, W., Ruyschaert, Z. (2021). Making risk-informed decisions to optimize drilling operations using along-string measurements with wired drill pipe — a high-speed, high-quality telemetry alternative to traditional mud pulse telemetry. — Stavanger: University of Stavanger. — June 2021. — Pp. 37. [in Eng.]
- Bauer, 2020 — Bauer, S. (2020). Technology market leader and pioneer for innovations, at the same time down-to-earth with responsibility towards society and environment — that's our goal. — Schrobenuhausen: BAUER Maschinen GmbH, 2020. — Pp. 24. [in Eng.]
- Shimizu, 2018 — Shimizu, T., Kunomura, K., Kai, M., Miyajima, H., Matsui, T. (2018). Study for further introduction of the electronic frequency converters to the Tokaido Shinkansen // IEEE International Power Electronics Conference (IPEC–Niigata 2018 – ECCE Asia). — 2018. — Pp. 2. [in Eng.]
- Zhang, 2020 — Zhang, B., Li, L., Qiu, Y., Dai, Q., Li, S., Deng, Y. (2020). Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation // Natural Gas Industry B. — 2020. — Vol. 7, No. 6. — Pp. 648–655. [in Eng.]
- Terzić, 2016 — Terzić, B., Despalatovic, M., Majic, G., Stergulc, M., Kriletic, A., Sormaz, K. (2016). Razvoj pretvarača frekvencije za visokobrzinske generatore s permanentnim magnetima u kogeneracijskim postrojenjima [Development of frequency converters for high-speed permanent magnet generators in cogeneration plants] // Tehnicki glasnik. — 2016. — Vol. 10, No. 3–4. — Pp. 117–123. [in Croat.]
- Kudryavtsev, 2007 — Kudryavtsev, A.V. (2007). Issledovanie preobrazovatelya chastoty reguliruemogo elektroprivoda na baze chetyrekhurovnevoogo invertora napryazheniya [Study of a frequency converter for a controlled electric drive based on a four-level voltage inverter] // Zapiski Gornogo instituta. — Saint Petersburg, 2007. — Vol. 173. — Pp. 86–90. [in Russ.]
- Meshcheryakov, 2015 — Meshcheryakov, V.N. et al. (2015). Razrabotka i issledovanie chastotnogo asinkhronnogo elektroprivoda [Development and research of a variable-frequency asynchronous electric drive] // Sistemy promyshlennykh

elektroprivodov peremennogo toka (EPPT-2015): Proceedings of the conference. — Ekaterinburg, October 5–9, 2015. — Pp. 175–178. [in Russ.]

Isembergenov, 2018 — Isembergenov, N.T. (2018). Power frequency converter built on transistors // Ural Radio Engineering Journal. — 2018. — Vol. 2, No. 1. — Pp. 59–66. [in Eng.]

Demina, 2019 — Demina, G.A. (2019). Oborudovanie «Silovykh mashin» dlya gornodobyvayushchey promyshlennosti [Equipment of “Power Machines” for the mining industry] // Gornaya promyshlennost'. — 2019. — No. 6. — P. 50. [in Russ.]



Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 103–131
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>
UDC 656.2

DEVELOPMENT OF AN ENERGY SYSTEM WITH EXTREME STEPWISE CONTROL OF SOLAR PANEL POWER

G.S. Aitkazyeva

"Cargo Transit" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com

Gulshat Aitkazyeva — manager, "Cargo Transit" LLP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4429-3701>.

© G.S. Aitkazyeva

Abstract. In the context of increasing demand for alternative energy sources, the development of efficient autonomous photovoltaic systems becomes particularly important. This study focuses on the creation of a photovoltaic installation with Extreme Stepwise Power Control (ESPC), which allows optimization of solar energy utilization and improves system efficiency. The aim of the research is to develop and experimentally test the ESPC algorithm to enhance the energy utilization coefficient of solar panels in autonomous systems. To achieve this aim, the following objectives were set: analysis of existing power control methods, development of the ESPC algorithm, creation of an experimental model, conducting simulations and laboratory tests, and evaluating the effectiveness of the proposed method. The results demonstrated that the ESPC method can increase the energy utilization coefficient of solar panels up to 97–98% under various insolation conditions, ensuring stable operation and reducing energy losses. Modeling confirmed the effectiveness of the algorithm and its scalability to more powerful autonomous systems. Thus, the study verified the research hypothesis, expanded scientific knowledge in the field of autonomous photovoltaic systems, and opened prospects for practical implementation and further development of solar panel management technologies.

Keywords: autonomous photovoltaic system, solar panels, extreme stepwise control, efficiency, modeling, energy

For citation: G.S. Aitkazyeva. Development of an Energy System with Extreme Stepwise Control of Solar Panel Power // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 103–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

КҮН БАТАРЕЯЛАРЫНЫҢ ҚУАТЫН ЭКСТРЕМАЛДЫ ҚАДАМДЫҚ РЕТТЕУ АРҚЫЛЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫ ӘЗІРЛЕУ

Г.С. Айтказиева

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com

Гульшат Айтказиева — менеджер, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: aitkazyeva.gulshat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4429-3701>.

© Г.С. Айтказиева



Аннотация. Балама энергия көздеріне сұраныстың артуына байланысты тиімді автономды фотоэлектрлік қондырғыларды әзірлеу ерекше маңызды болып отыр. Бұл зерттеу экстремалды қадамдық қуатты реттеу (ЭҚР) әдісі бар фотоэлектрлік қондырғыны жасауға арналған, ол күн энергиясын тиімді пайдалануға және жүйенің жұмыс тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеудің мақсаты – автономды жүйелерде күн батареяларының энергия тиімділігін арттыру үшін ЭҚР алгоритмін әзірлеу және тәжірибелік тексеру. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: қуатты басқарудың бар әдістерін талдау, ЭҚР алгоритмін әзірлеу, тәжірибелік макет құру, модельдеу және зертханалық сынақтар жүргізу, ұсынылған әдістің тиімділігін бағалау. Зерттеу нәтижелері ЭҚР әдісінің күн батареяларының энергия тиімділігін әртүрлі инсоляция жағдайында 97–98%-ға дейін арттыра алатынын көрсетті, бұл қондырғының тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді және энергия шығынын азайтады. Модельдеу алгоритмінің тиімділігін және оны қуатты автономды жүйелерге масштабтау мүмкіндігін растады. Осылайша, жүргізілген жұмыс зерттеу гипотезасын растап, автономды фотоэлектрлік қондырғылар саласындағы ғылыми білімді кеңейтіп, күн батареяларын басқару технологияларын практикалық енгізу мен әрі қарай дамыту перспективаларын ашты.

Түйін сөздер: автономды фотоэлектрлік қондырғы, күн батареялары, экстремалды қадамдық реттеу, тиімділік, модельдеу, энергия

Дәйексөздер үшін: Г.С. Айтказиева. Күн батареяларының қуатын экстремалды қадамдық реттеу арқылы энергетикалық қондырғыны әзірлеу // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 103–131 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ШАГОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Г.С. Айтказиева

ТОО "Cargo Transit", Алматы, Казахстан.

E-mail: aitkaziyeva.gulshat@gmail.com

Гульшат Айтказиева — менеджер, ТОО "Cargo Transit", Алматы, Казахстан
E-mail: aitkaziyeva.gulshat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4429-3701>.

© Г.С. Айтказиева

Аннотация. В условиях растущей потребности в альтернативных источниках энергии особое значение приобретает разработка эффективных автономных фотоэлектрических установок. Настоящее исследование посвящено созданию установки с экстремальным шаговым регулированием мощности (ЭШР), что позволяет оптимизировать использование солнечной энергии и повысить эффективность работы системы. Целью исследования является разработка и экспериментальная проверка алгоритма ЭШР для повышения коэффициента использования солнечных батарей в автономных системах. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов регулирования мощности, разработка алгоритма ЭШР, создание экспериментального макета, проведение моделирования и лабораторных испытаний, оценка эффективности предложенного метода. Результаты исследования показали, что применение ЭШР позволяет увеличить коэффициент использования энергии солнечных батарей до 97–98% при различных условиях инсоляции, обеспечивая стабильную работу установки и снижение потерь энергии. Моделирование подтвердило эффективность алгоритма и возможность его масштабирования на более мощные автономные системы. Таким образом, проведенная

работа доказала гипотезу исследования, расширила научные знания в области автономных фотоэлектрических установок и открыла перспективы для практического внедрения и дальнейшего развития технологий управления солнечными батареями.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая установка, солнечные батареи, экстремальное шаговое регулирование, эффективность, моделирование, энергия

Для цитирования: Г.С. Айтказиева. Разработка энергетической установки с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей // Помышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 103–131. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.006>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие альтернативных источников энергии является одной из ключевых задач современной науки и техники. В последние годы наблюдается быстрый рост потребности в автономных энергетических системах для объектов различного назначения: жилых домов, удалённых научных станций, телекоммуникационных узлов и сельских населённых пунктов. Фотоэлектрические установки (СБ) занимают особое место среди альтернативных источников энергии благодаря возможности преобразования солнечного излучения в электрическую энергию без вредных выбросов и значительного уровня шума.

Несмотря на широкое распространение фотоэлектрических систем, проблема эффективного использования солнечной энергии остаётся актуальной. На практике коэффициент использования мощности солнечных батарей часто снижается из-за непостоянного солнечного излучения, изменений температуры и ограничений стандартных схем регулирования. В научной литературе описаны методы максимизации мощности СБ, однако большинство из них ориентировано на стабилизацию напряжения или применения традиционных алгоритмов отслеживания максимальной мощности (МРРТ), которые не учитывают экстремальные колебания параметров источника.

Выбор темы исследования обусловлен необходимостью разработки инновационного подхода – применения экстремального шагового регулирования мощности (ЭШР), позволяющего повысить коэффициент использования СБ и эффективность автономных фотоэлектрических энергетических установок.

Актуальность исследования определяется практической необходимостью повышения энергетической эффективности автономных систем электроснабжения при минимальных затратах на оборудование и обслуживание. Современные установки часто не используют потенциал солнечных батарей полностью, что снижает их экономическую и экологическую эффективность.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании новой методики управления мощностью СБ на основе ЭШР, позволяющей:

- повысить коэффициент использования энергии СБ до 98%;
- снизить потери энергии при нестабильной инсоляции;
- обеспечить надёжное функционирование автономной установки в различных климатических условиях.

Практическая значимость исследования заключается в возможности внедрения разработанной установки АФЭУ-0,5 для автономного электроснабжения малых объектов, а также адаптации предложенного метода управления для более мощных систем и интеграции в гибридные энергосети.

Объект исследования: автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5 с солнечными батареями.

Предмет исследования: методы регулирования мощности солнечных батарей с целью максимизации коэффициента использования энергии и повышения эффективности работы установки.

Цель исследования: разработка и экспериментальная проверка автономной фотоэлектрической энергетической установки с экстремальным шаговым регулированием мощности СБ, позволяющей повысить эффективность преобразования солнечной энергии.

Задачи исследования:

- проанализировать существующие методы регулирования мощности солнечных батарей и выявить их ограничения.
- разработать метод экстремального шагового регулирования мощности (ЭШР) и алгоритм работы контроллера заряда.
- создать экспериментальный макет АФЭУ-0,5 с интеграцией ЭШР.
- провести лабораторные и полевые испытания установки для оценки коэффициента использования мощности СБ.
- выполнить моделирование работы системы в Matlab Simulink и сравнить результаты с экспериментальными данными.
- определить оптимальные параметры ЭШР для повышения энергетической эффективности установки.

Для достижения поставленной цели применялись следующие методы:

- Экспериментальные: испытания установки с реальными и имитируемыми солнечными батареями, измерение ВАХ, мощности, температуры и коэффициента использования энергии.
- Аналитические: расчёт КПД, коэффициента использования мощности и построение графических зависимостей.
- Моделирование: имитационное моделирование работы системы в среде Matlab Simulink для проверки устойчивости и оптимизации параметров ЭШР.
- Сравнительный анализ: сопоставление эффективности работы установки с традиционными методами стабилизации напряжения.

Подход исследования основан на комплексной интеграции теоретических и экспериментальных данных с целью подтверждения научной гипотезы.

Применение экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей в автономной установке АФЭУ-0,5 позволит повысить коэффициент использования энергии СБ до 98% и повысить общую энергетическую эффективность установки по сравнению с традиционными методами управления.

Научное значение работы заключается в разработке нового метода регулирования мощности солнечных батарей с подтверждённой экспериментально и через моделирование эффективностью. Практическая ценность – создание автономной установки, способной обеспечить высокую эффективность электроснабжения малых объектов и перспективу масштабирования на более мощные системы.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5 с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей (СБ). Установка предназначена для обеспечения автономного электроснабжения малых объектов при переменной солнечной инсоляции и изменяющихся температурных условиях.

В качестве экспериментального материала использовались следующие компоненты АФЭУ-0,5:

- 1) Фотоэлектрические модули КСМ-160 – два модуля мощностью по 160 Вт каждый.
 - Технология: кремниевые панели монокристаллического типа.
 - Напряжение холостого хода ($U_{хх}$): 34–50 В.
 - Ток короткого замыкания ($I_{кз}$): 1–10 А.
 - Рабочий диапазон температуры: +20–+70 °С.
- 2) Аккумуляторные батареи TUDORT 12V 155FT – две последовательно соединённые батареи.

- Технология AGM.
- Ёмкость: 159 Ач; напряжение: 12 В каждая.
- Физические размеры: 560×125×290 мм; вес: 55,4 кг.
- Срок службы: 3–5 лет.

3) Контроллер заряда АБ с экстремальным шаговым регулятором мощности СБ (КЗАБ).

- Микроконтроллер: Atmega128.
- Силовая схема: понижающий DC-DC преобразователь.
- Датчики: токовые (Lemlv25-p) и напряжения (Lemla25-np).
- Режимы работы: ручной (стабилизация напряжения СБ) и автоматический (ЭШР – экстремальное шаговое регулирование мощности).

4) Инвертор TS 1500-224

- Выходная мощность: 1,5 кВт; выходное напряжение АС: 230 В, синусоидальная форма.

- Входное напряжение DC: 24 В.

5) Дополнительное оборудование:

- Драйверы шаговых двигателей DM356M.
- Датчики положения Солнца.
- Контроллер наведения на Солнце.
- ЖК-модуль MT-20S4M для визуализации параметров.

6) Имитатор солнечной батареи ИБС-200/7-4 использовался для лабораторных испытаний с заданными ВАХ (вольт-амперными характеристиками).

Основные вопросы, на которые направлено исследование:

- Как влияет экстремальное шаговое регулирование мощности на коэффициент использования солнечных батарей в реальных и лабораторных условиях?

- Какие параметры ЭШР (величина шага ΔU , частота изменения напряжения) обеспечивают максимальную энергетическую эффективность АФЭУ-0,5?

- Как изменяется КПД контроллера заряда в зависимости от состояния аккумуляторной батареи и параметров солнечных модулей?

Гипотеза исследования: применение экстремального шагового регулирования мощности солнечных батарей в АФЭУ-0,5 позволяет повышать коэффициент использования энергии СБ до $\geq 98\%$, компенсируя температурные и инсоляционные колебания, и повышает общую энергетическую эффективность установки до 28% по сравнению с обычной схемой стабилизации напряжения на уровне 30 В.

Этапы исследования:

1) Аналитический этап:

- Изучение литературы по системам автономного электроснабжения и методам максимизации мощности СБ.

- Формирование требований к экспериментальной установке и выбор комплектующих.

2) Проектирование и изготовление АФЭУ-0,5:

- Разработка структурной схемы (рис. 1) и электрической схемы контроллера заряда.

- Сборка электромеханической части и интеграция контроллера, инвертора и аккумуляторных батарей.

3) Лабораторные испытания с имитатором СБ:

- Программирование контроллера в режим ЭШР и ручной стабилизации.

- Измерение ВАХ, ВВХ (вольт-ваттных характеристик) и коэффициента использования мощности.

- Варьирование параметров ВАХ: напряжение холостого хода $U_{хх}$ и ток короткого замыкания $I_{кз}$.

4) Экспериментальные исследования с реальными СБ

- Определение коэффициента использования мощности СБ при различных температурах и инсоляции.

- Контроль температуры СБ и АБ, визуализация параметров через ЖК-дисплей.

- Определение КПД контроллера заряда и анализ изменения выходной мощности в течение суток.

5) Моделирование в среде Matlab Simulink

- Воспроизведение работы установки при различных величинах шага ΔU и частотах изменения напряжения.

- Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования.

Методы исследования:

1) Экспериментальные методы:

- Лабораторные испытания с имитатором СБ для построения ВАХ и ВВХ.

- Опытная эксплуатация установки при реальном солнечном освещении.

- Непрерывный мониторинг напряжения и тока СБ и АБ, измерение температуры и мощности.

2) Методы анализа данных:

- Расчет коэффициента использования мощности:

$$K_P = \frac{P_{\text{сред}}}{P_{\text{макс}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $P_{\text{сред}}$ – средняя мощность СБ в точках измерения, $P_{\text{макс}}$ – максимальная теоретически возможная мощность.

- Сравнение результатов при ЭШР и стабилизации напряжения.

- Графическое отображение зависимостей мощности, температуры и коэффициента использования в течение суток.

3) Методы моделирования:

- Имитационное моделирование работы контроллера и электромеханической части установки в Matlab Simulink.

- Варьирование параметров ΔU и частоты шага для определения оптимальных условий работы.

- Проверка устойчивости алгоритма ЭШР и точности захвата экстремума мощности.

4) Методы визуализации и контроля:

- Использование ЖК-модуля МТ-20S4М для отображения текущих параметров установки.

- Светодиодные индикаторы состояния источников питания.

- Регистрация сигналов о неисправностях и защиты аккумуляторных батарей.

Результаты и обсуждение

В статье приводятся результаты разработки автономной фотоэлектрической энергетической установки АФЭУ-0,5 с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей, а также разработки контроллера заряда с экстремальным шаговым регулированием мощности солнечных батарей. Представлены результаты экспериментальных исследований энергетической эффективности АФЭУ-0,5, и их сравнение с результатами моделирования.

Результаты диссертационных исследований были использованы при разработке научно-исследовательской автономной фотоэлектрической энергетической установки (АФЭУ-0,5) с реализацией режима экстремального регулирования мощности солнечных батарей. АФЭУ-0,5 построена на основе структурной схемы, представленной на рисунке 1, где приняты следующие обозначения: СБ – солнечная батарея; КНС – контроллер наведения на Солнце; ДШД1, ДШД2 – драйверы управления шаговыми двигателями; ДПС

1, ДПС2 – датчики положения Солнца по азимуту и углу места; КВ 1 - КВ 4 – конечные выключатели, М1, М2 – шаговые двигатели; Р1 – Р4 – редукторы; КЗАБ – контроллер заряда аккумуляторных батарей; И – инвертор; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи.

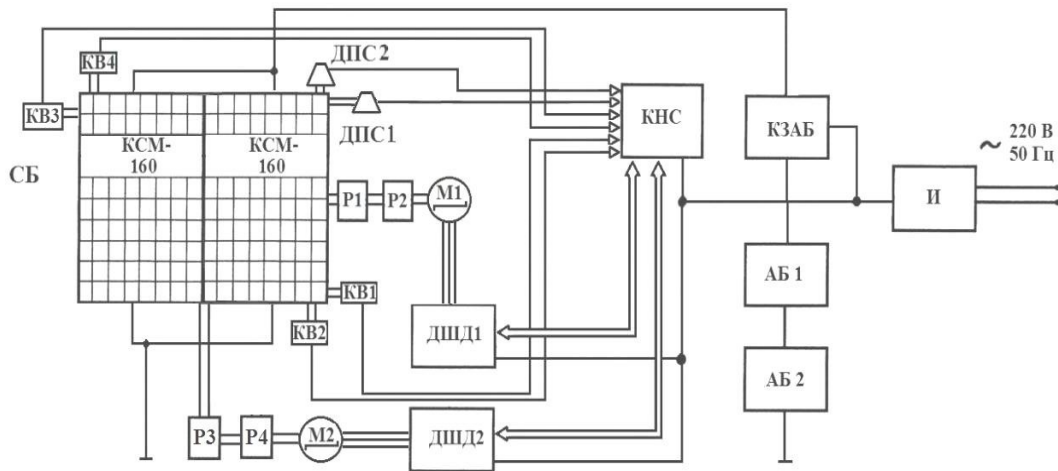


Рис. 1. Функциональная схема АФЭУ-0,5

По приведенной схеме (Рис. 1) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники изготовлена и испытана научно-исследовательская автономная фотоэлектрическая энергетическая установка АФЭУ-0,5 состоящая из электромеханической части; контроллера заряда АБ с экстремальным шаговым регулятором мощности СБ; двух СБ – КСМ-160; двух АБ – TUDORT12V155FT; контроллера наведения фотоэлектрических панелей на Солнце; драйверов управления шаговыми двигателями (DM356M); инвертора TS 1500-224.

Фотография электромеханической части энергетической установки приведена на рисунке 2, которая состоит из рамы с двумя фотоэлектрическими модулями КСМ-160; подвижного металлического каркаса; неподвижного металлического каркаса; редуктора поворота по углу места; редуктора поворота по азимуту; двух шаговых двигателей типа ШД-5Д; двух датчиков положения Солнца (Шиняков, 2011а: 282–287; Шиняков, 2011б: 283; Шиняков, 2015: 12–18; Шиняков, 2010: 102–107).



Рис. 2. Электромеханическая часть энергетической установки АФЭУ-0,5 с двумя фотоэлектрическими панелями КСМ-160

Аккумуляторная батарея состоит из двух последовательно соединенных аккумуляторов «TUDORT12V 155FT» по 12 В каждая. Внешний вид аккумуляторных батарей, использованных в АФЭУ – 0,5, представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Внешний вид аккумуляторных батарей TUDORT12V 155FT

Краткие параметры:

- технология производства – AGM;
- срок службы 3-5 лет;
- напряжение = 12 В;

- емкость = 159 Ач;
- длина = 560 мм;
- ширина = 125 мм;
- высота = 290 мм;
- вес нетто = 55,4 кг.

4. Фотография внешнего вида инвертора тока TS 1500-224 представлена на рисунке



Рис. 4. Внешний вид инвертора тока TS 1500-224

Основные характеристики:

- выходная мощность – 1,5 кВт;
- входное напряжение DC – 24 В;
- выходное напряжение AC – 230 В;
- форма выходного напряжения – чистый синус;
- размер – 420×220×88 мм.

Функциональная схема разработанного и изготовленного контроллера заряда аккумуляторных батарей приведена на рисунке 5, где приняты следующие обозначения: СБ1, СБ2 – фотоэлектрические модули КСМ-160; МК – микроконтроллер ATmega 128; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи Tudor 12В, 155 Ач; ДТСБ, ДТАБ – датчики тока Lemlv25-р; ДНСБ, ДНАБ – датчики напряжения Lemla25-пр. В разработанном контроллере применена силовая схема на основе понижающего преобразователя напряжения (Кудряшов, 1992: 17–24; Отто, 2012а: 211–215; Отто, 2012б: 179–182).

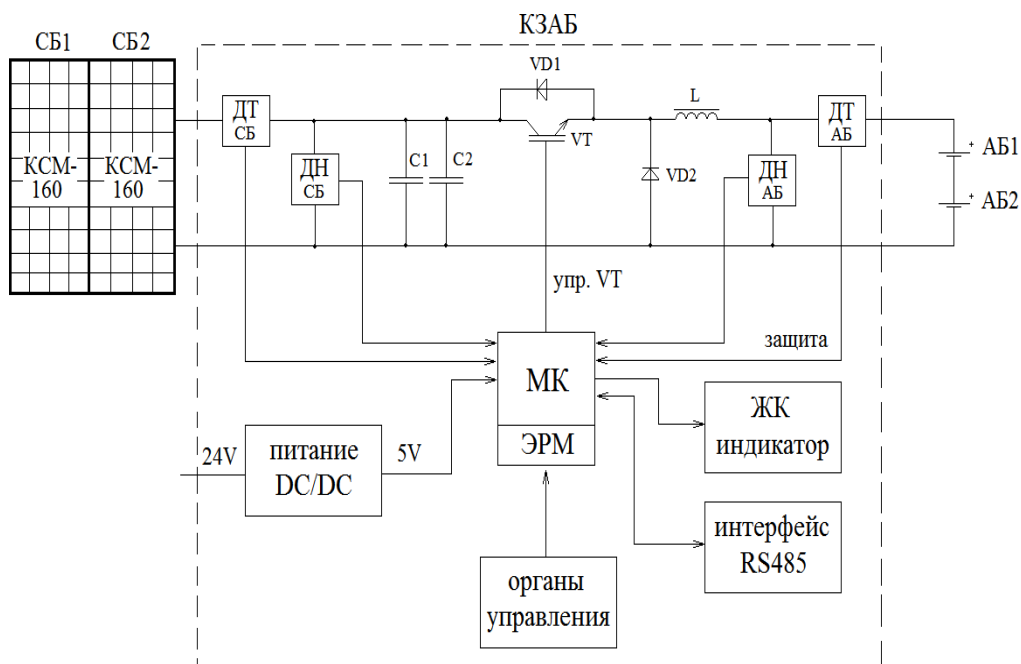


Рис. 5. Функциональная схема КЗАБ с реализацией функции экстремального регулирования мощности СБ

В контроллере предусмотрено два режима работы, изменяемых вручную положением галетного переключателя. Первый режим – стабилизации напряжения СБ на заданном уровне, в котором пользователь в ручном режиме может задать нужную рабочую точку ВАХ СБ. Вторым режимом – ЭШР, в этом режиме происходит автоматический поиск точки ВАХ с максимальной выходной мощностью. Контроллер заряда АБ производит регулирование напряжения в оптимальной точке по шаговому способу поиска экстремума. Алгоритм работы КЗАБ приведен на рисунке 6.

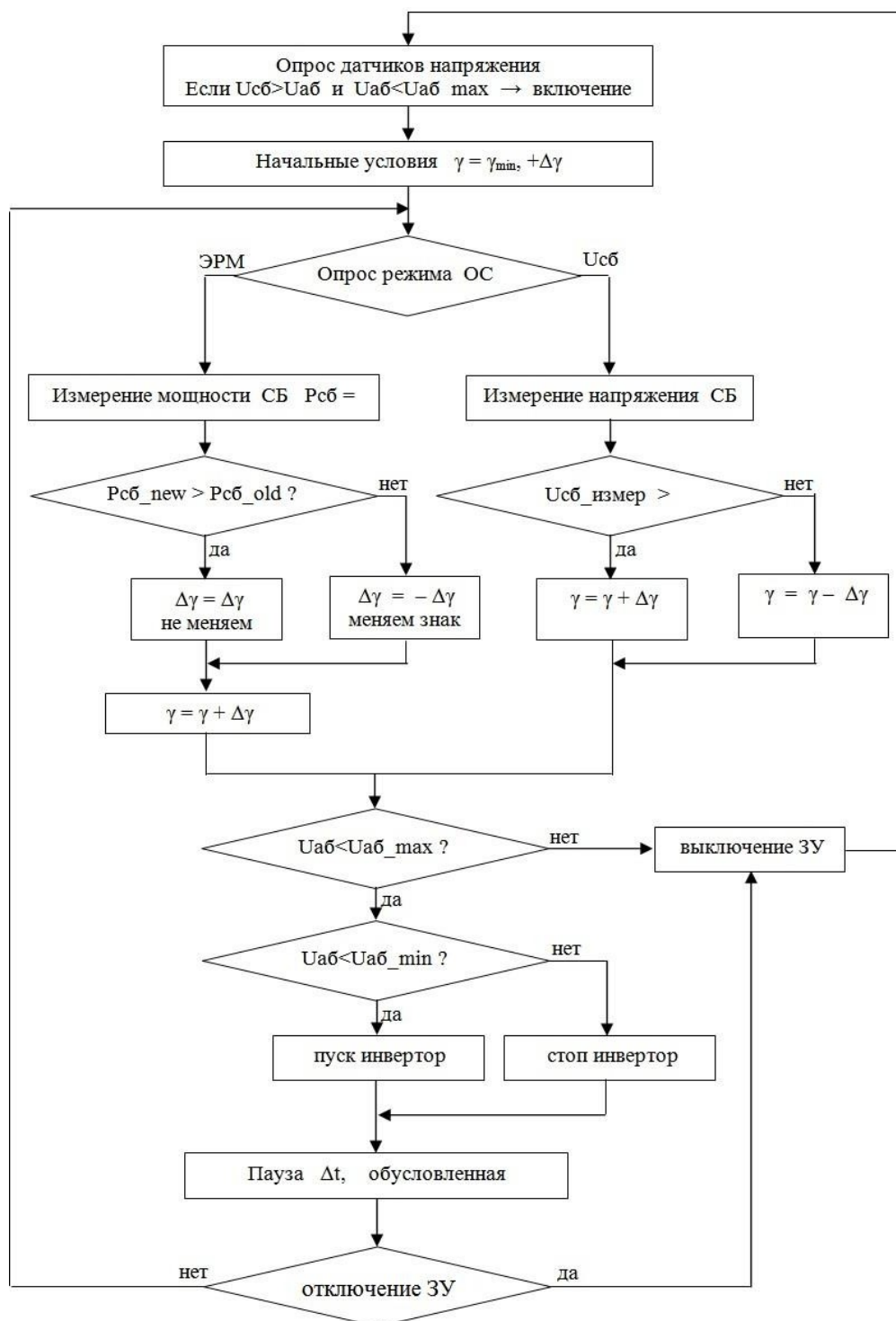


Рис. 6. Структурная схема алгоритма функционирования КЗАБ выполняющего функцию заряда АБ и ЭШР СБ

Прежде всего, производится опрос датчиков напряжения АБ и СБ. Флаг разрешения запуска контроллера устанавливается только в том случае, если напряжение холостого хода СБ превышает напряжение АБ, в противном случае включение контроллера не имеет смысла. Другим условием запуска является неполный заряд АБ, что определяется по напряжению АБ, которое не должно превышать определенного значения. Следующим действием задаются начальные условия работы контроллера, устанавливается относительная длительность импульсов управления γ_{\min} и положительный текущий знак приращения $+\Delta\gamma$. Далее производится опрос переключателя режима обратной связи: если переключатель находится в положении «ЭРМ», то контроллер работает в режиме

автоматического поиска экстремума, если в положении $U_{СБ}$ – ручного поиска.

В режиме стабилизации напряжения контроллер стабилизирует напряжение СБ на уровне, заданном пользователем. Достигается это применением интегрирующего закона управления, т.е. итерационной пошаговой подстройки, что реализуется следующим образом: текущее значение напряжения СБ сравнивается с его опорным стабилизируемым значением $U_{оп}$. Если $U_{СБ}$ больше, то γ уменьшается, если меньше, γ увеличивается на постоянную величину $\Delta\gamma$, определяющую точность и быстродействие системы, в данном случае обратно пропорциональных друг другу. Применение такого закона управления стало возможным ввиду инерционности изменения как параметров СБ, так и нагрузки. Для стабильности работы системы в контур обратной связи вводится зона нечувствительности. Этот режим предназначен для проведения отладочных мероприятий или применяется при возникновении нештатных ситуаций.

При работе контроллера в режиме ЭШР опрашиваются датчики тока и напряжения СБ, рассчитывается выходная мощность СБ. На основании измеренного значения мощности определяется управляющее воздействие. Процесс захвата точки экстремума мощности показан на рисунке 7.

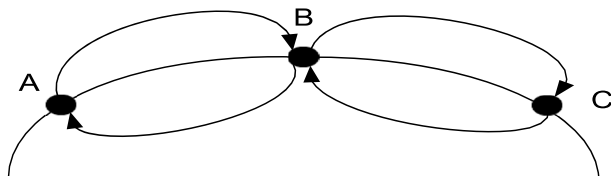


Рис. 7. Диаграмма перемещения рабочей точки по вольт-ваттной характеристике в процессе захвата точки экстремума мощности

Предположим, что рабочая точка ВВХ, находящаяся в точке А, движется вверх к максимуму мощности. В точке А рассчитывается соответствующая ей мощность. Далее ЭШР перемещает рабочую точку в том же направлении - в точку В. Мощность точки В больше мощности точки А, поэтому рабочая точка продолжает сдвигаться в прежнем направлении. После перехода в точку С с меньшей мощностью происходит смена знака приращения напряжения СБ и алгоритм перемещает рабочую точку в В. При следующем шаге и сравнении значений мощности точек В и С дает положительное изменение мощности СБ. Соответственно рабочая точка перемещается в прежнем направлении, т.е. попадает в точку А, где изменение мощности относительно точки В отрицательное, система снова меняет знак движения рабочей точки, которая попадает в точку В. Далее движение рабочей точки повторяется по описанной траектории (Тверьянович, 1986: 11–14).

Другой важной функцией контроллера является управление инвертором и включением-выключением режима заряда АБ, для этого в алгоритме присутствует постоянный контроль напряжения на АБ. Выключение инвертора происходит по условию достижения напряжением АБ допустимого минимума, что говорит о определенном разряде АБ и недопустимости питания нагрузки, оставшаяся энергия АБ расходуется на питание узлов управления и поддержания контроллера в рабочем состоянии.

Для защиты АБ от перезаряда производится сравнение напряжения АБ с его максимальным допустимым значением. Если напряжение на АБ возросло до максимума (28 В) или выше, подача энергии через контроллер прекращается за счет запирающего силового транзистора.

Для визуализации текущих параметров применен жидкокристаллический модуль МТ-20S4М, состоящий из контроллера управления и ЖК панели. Модуль отображает 4 строки по 20 символов в матрице 5x8 точек, между символами имеется интервал шириной в одну точку.

На передней панели находится переключатель, определяющий режим работы

контроллера, ЭРМ – автоматический поиск максимума мощности или $U_{СБ}$ – ручной режим. Также рядом расположен регулятор, с помощью которого производится подстройка напряжения СБ в ручном режиме.

Микропроцессорная система управления контроллером заряда конструктивно представляет печатную плату, содержащую микроконтроллер Atmega128, датчики входных и выходных параметров контроллера заряда, вторичный источник питания. Часть элементов силовой части контроллера заряда также располагается на печатной плате системы управления, что позволяет минимизировать паразитную индуктивность цепей управления.

На рисунке 8 представлена фотография изготовленного экспериментального образца контроллера заряда АБ с функцией экстремального регулирования мощности СБ.

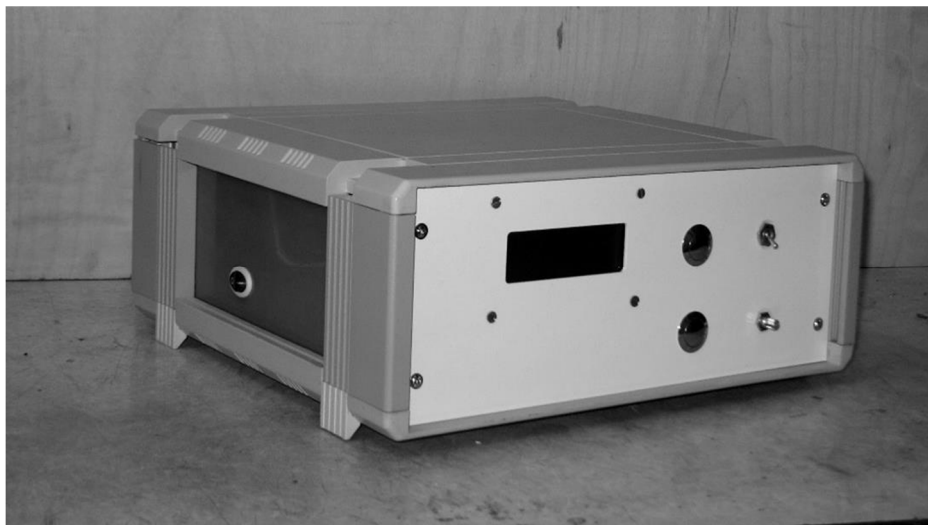


Рис. 8. Контроллера заряда с ЭРМ СБ

Далее приведено краткое описание и визуальное отображение функций во время работы контроллера заряда аккумуляторных батарей.

После нажатия кнопки «Пуск» запускается основная программа микроконтроллера. Производится опрос датчиков напряжения СБ и АБ. После проверки датчиков на отсутствие запрещающих работу сигналов разрешается работа инвертора. При обнаружении указанных сигналов соответствующая информация выводится на дисплей.

При нажатии кнопки «Стоп» контроллер останавливает все преобразования, завершает текущие процедуры приема/передачи данных, запрещается работа инвертора и силового транзистора. Работа основной программы завершается, и контроллер переходит в режим максимального энергосбережения.

Система снабжена защитой по току нагрузки и по входному току контроллера. При превышении током предельно допустимых значений контроллер формирует сигнал отключения инвертора. При появлении сигнала от одного из датчиков работа инвертора запрещается и на дисплей выводится информация о неисправности. После устранения неисправности работа инвертора разрешается.

При включении автоматического выключателя, соединяющего АБ с контроллером на дисплее, отображается надпись «Питание включено» (Рис. 9), что говорит об успешной инициализации и тестах узлов управления.

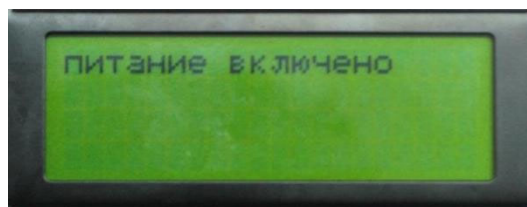


Рис. 9. «Питание включено»

При включении автоматического выключателя, соединяющего СБ с контроллером, загорается светодиод «Источник».

Для запуска контроллера необходимо нажать кнопку «Пуск», после чего контроллер начнет тестирование параметров источников питания АФЭУ.

Производится проверка напряжения СБ. Если напряжение на СБ меньше напряжения АБ, на индикаторе отобразится надпись «Недостаточное напряжение солнечной батареи» (Рис. 10).

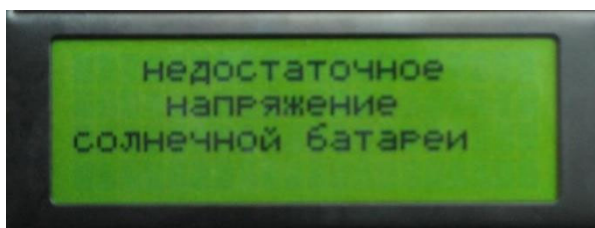


Рис. 10. «Недостаточное напряжение солнечной батареи»

Производится проверка напряжения АБ, если напряжение на АБ превышает максимально допустимое, на индикаторе отобразится надпись «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим» (Рис. 11).

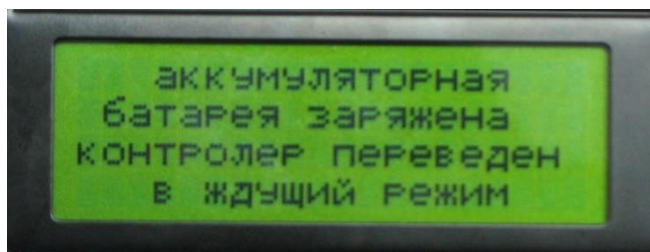


Рис. 11. «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим»

В ждущем режиме продолжается контроль напряжения, и как только напряжение снизится до 26 В, начнется процесс заряда.

В процессе работы отображаются текущие параметры источников питания и режим работы АБ. Режим заряда отображается символом «АБ□», а режим разряда символом «АБ□».

Формат отображения информации (Рис. 12): 1-я строка: текущие ток и напряжение СБ;

2-я строка: выходные параметры АБ, состояние АБ (заряд, разряд); 3-я строка: состояние АБ (заряд, разряд), параметры инвертора;

4-я строка: статус контроллера, наличие сработавших аварийных защит.

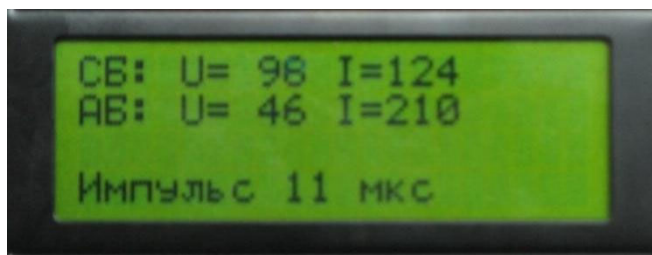


Рис. 12. Текущие параметры источников питания и режим работы АБ

В процессе работы производится непрерывный мониторинг напряжения на АБ, при превышении напряжения на АБ допустимого значения 28 В процесс заряда прекращается путем принудительного выключения контроллера, что сопровождается выводом сообщения «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим» (Рис. 13).

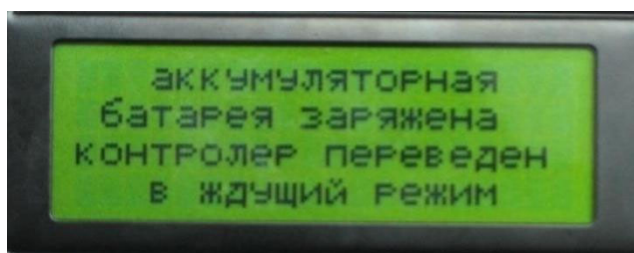


Рис. 13. «Аккумуляторная батарея заряжена, контроллер переведен в ждущий режим»

После прекращения заряда продолжается контроль напряжения, как только напряжение снизится до 26 В, процесс заряда возобновится.

При разряде АБ до напряжения 22 В происходит принудительное отключение нагрузки, и вся энергия СБ используется для заряда АБ, при этом выводится сообщение «АБ разряжена, нагрузка отключена». При заряде АБ до 24 В контроллер снова подключает нагрузку (Рис. 14).

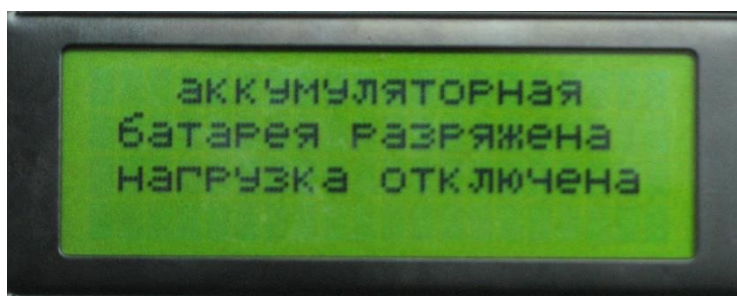


Рис. 14. «АБ разряжена, нагрузка отключена»

Ниже представлены результаты, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований энергетической эффективности использования солнечной батареи при стабилизации напряжения на СБ, равном 30 В. Такое значение уровня стабилизации напряжения на СБ соответствует оптимальному напряжению нагретых до +60 °С - + 70 °С фотоэлектрических модулей КСМ-160 (реальный режим работы фотоэлектрических модулей в летнее время) Стребков, 1998: 6; Тверьянович, 1986: 11–14; Охоткин, 2013: 222–230; Иродионов, 2000: 23 с.; Иванчура, 2014: 111–120.

Испытания проводились с использованием имитатора солнечной батареи ИБС-200/7-4. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи изменялась в диапазоне $I_{\text{ххСБ}} = 1\text{А}-10\text{А}$; $U_{\text{ххСБ}} = 34\text{В} - 50\text{В}$. Испытания проводились при разряженной ($U_{\text{АБ}} = 23 - 24,5\text{В}$) и заряженной ($U_{\text{АБ}} = 25 - 27\text{В}$) аккумуляторной батарее.

На рисунке 15 приведены три вольт-амперных и вольт-ваттных характеристики солнечной батареи (1. $U_{\text{хх}} = 34\text{В}$; $I_{\text{кз}} = 5\text{А}$; 2. $U_{\text{хх}} = 34\text{В}$, $I_{\text{кз}} = 7\text{А}$; 3. $U_{\text{хх}} = 34\text{В}$, $I_{\text{кз}} = 9\text{А}$) с

напряжением оптимальной точки менее стабилизируемого напряжения $U_{CB} = 30$ В. Отмечены уровни генерируемых мощностей при напряжении $U_{CB} = 30$ В, а также графически показаны значения недоиспользования СБ по мощности при отклонении оптимальных значений мощности СБ от значений при стабилизации напряжения в 30 В ($\square P_{CB1}$, $\square P_{CB2}$, $\square P_{CB3}$).

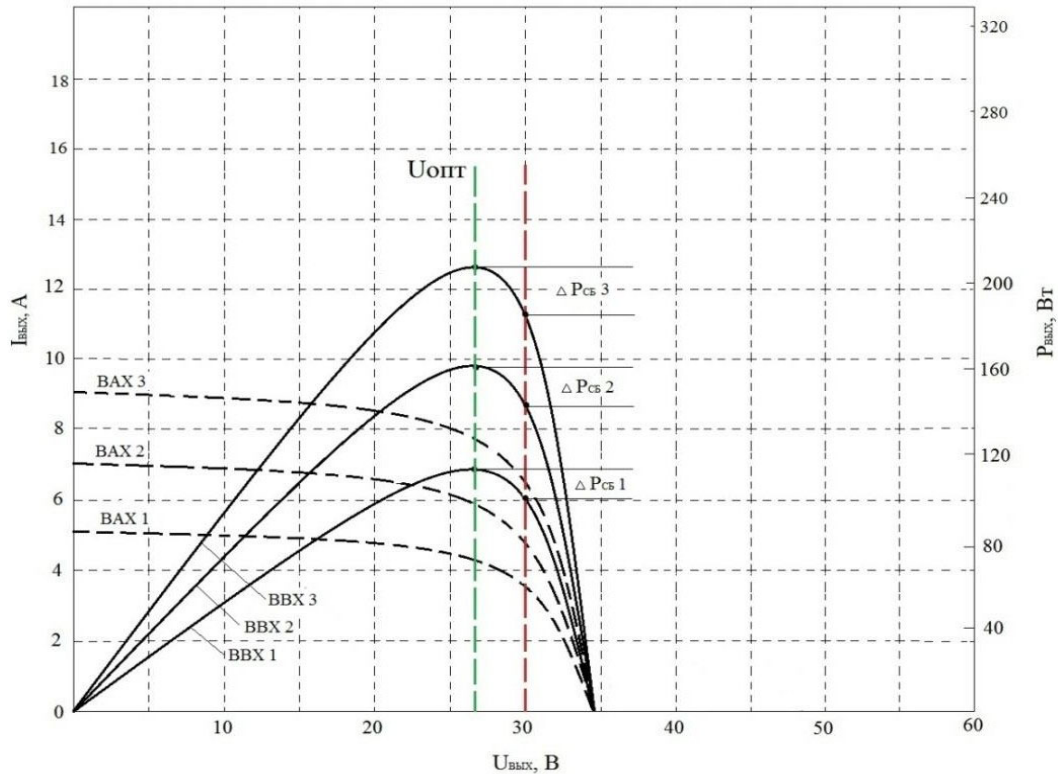


Рис. 15. ВАХ и ВВХ с $U_{опт} < 30$ В

Из анализа графиков следует, что недоиспользование СБ по мощности в этом случае существенно зависит от тока короткого замыкания солнечной батареи и составляет для СБ 1 - 8%, СБ 2 - 14%, СБ 3 - 25%.

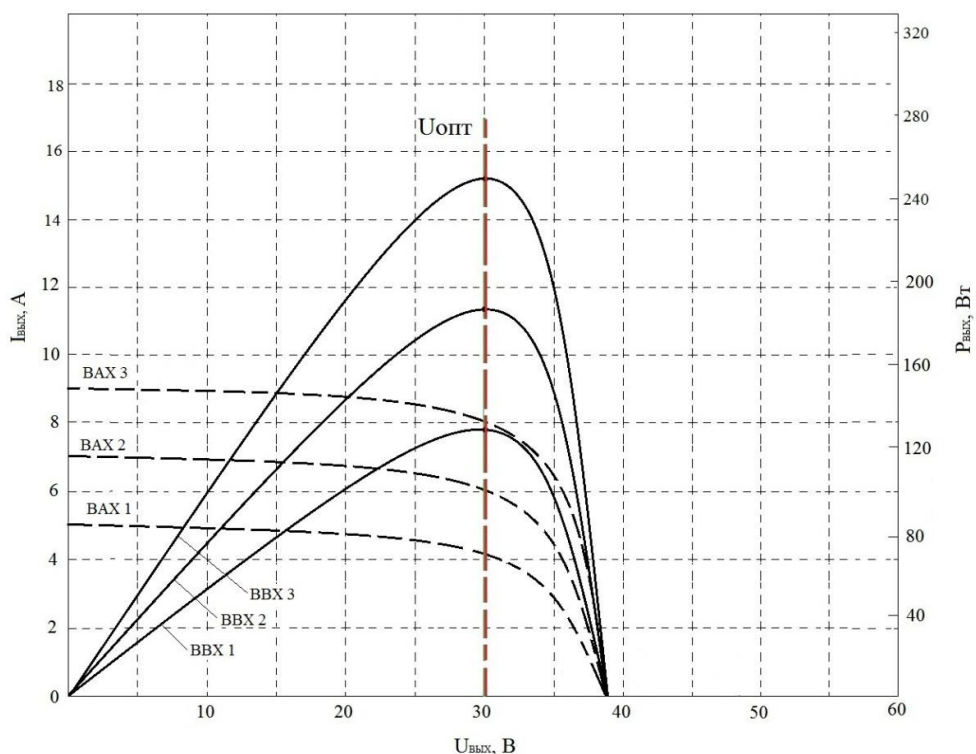
В таблице 1 приведены значения коэффициента использования по мощности солнечных батарей для ВВХ, рассмотренных выше.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от оптимального напряжения рабочей точки ВАХ при стабилизации напряжения

Солнечная батарея	ВАХ		K_p , %
	$U_{опт}$, В	$I_{опт}$, А	
СБ 1	27,2	4,3	92
СБ 2	27,2	6,02	86
СБ 3	27,2	7,74	75

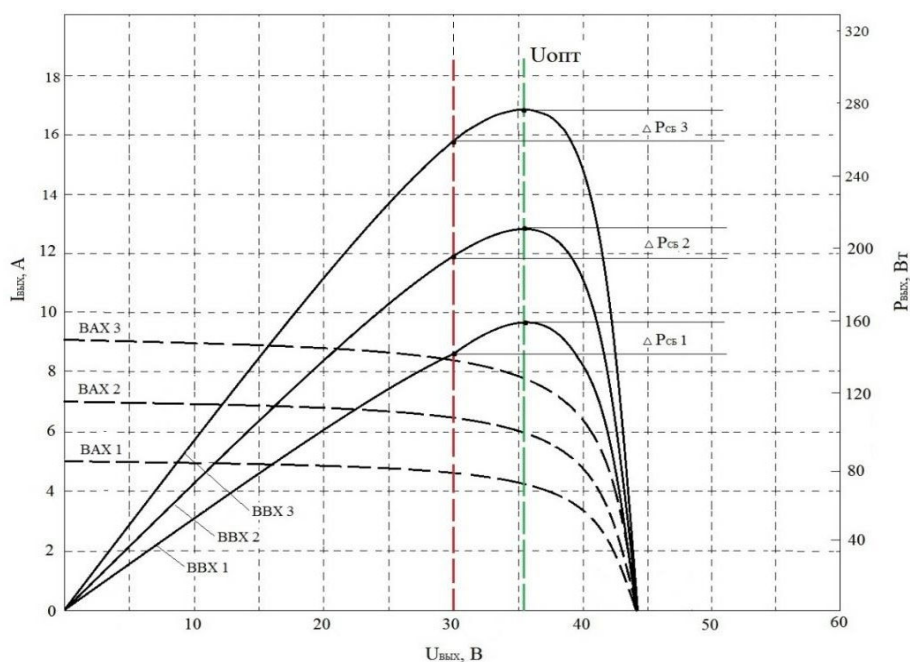
На рисунке 16 приведены вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи (1. $U_{xx} = 38$ В, $I_{кз} = 5$ А; 2. $U_{xx} = 38$ В, $I_{кз} = 7$ А; 3. $U_{xx} = 38$ В, $I_{кз} = 9$ А) с напряжением оптимальной точки, совпадающим со стабилизируемым напряжением $U_{CB} = 30$ В. Данный режим работы соответствует оптимальному напряжению нагретых до $+50$ °С фотоэлектрических модулей КСМ-160.

Из анализа графиков следует, что в этом случае недоиспользования СБ по мощности практически нет, солнечная батарея генерирует максимально возможное значение энергии, $K_p = 98-100$ %.


 Рис. 16. BAX и BBX с $U_{\text{опт}} = 30\text{В}$

На рисунке 17 приведены вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики солнечной батареи (1. $U_{\text{xx}} = 44\text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 5\text{ А}$; 2. $U_{\text{xx}} = 44\text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 7\text{ А}$; 3. $U_{\text{xx}} = 44\text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 9\text{ А}$) с напряжением оптимальной точки больше стабилизируемого напряжения $U_{\text{сб}} = 30\text{ В}$.

Этот режим работы соответствует работе фотоэлектрических модулей КСМ-160 при температуре около $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой режим работы возможен достаточно часто в весенне-летний период.


 Рис. 17. BAX и BBX с $U_{\text{опт}} > 30\text{ В}$

Из анализа графиков следует, что в этом случае солнечная батарея недоиспользуется по мощности приблизительно одинаково для каждой ВВХ – на 7–8 %, $K_p = 92–93$ %.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от оптимального напряжения рабочей точки ВАХ при стабилизации напряжения

Солнечная батарея	ВАХ		K_p , %
	U_{opt} , В	I_{opt} , А	
СБ 1	35,6	4,4	92
СБ 2	35,6	6,16	93
СБ 3	35,6	7,92	92

На рисунке 18 приведены итоговые зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей от напряжения экстремальной точки ВВХ рассмотренных выше характеристик. Зависимости показывают снижение коэффициента использования по мощности солнечных батарей при отклонении U_{opt} от уровня стабилизируемого напряжения $U_{сб} = 30$ В (чем сильнее температура панелей фотоэлектрических модулей КСМ-160 отличается от принятой рабочей температуры $+25$ °С).

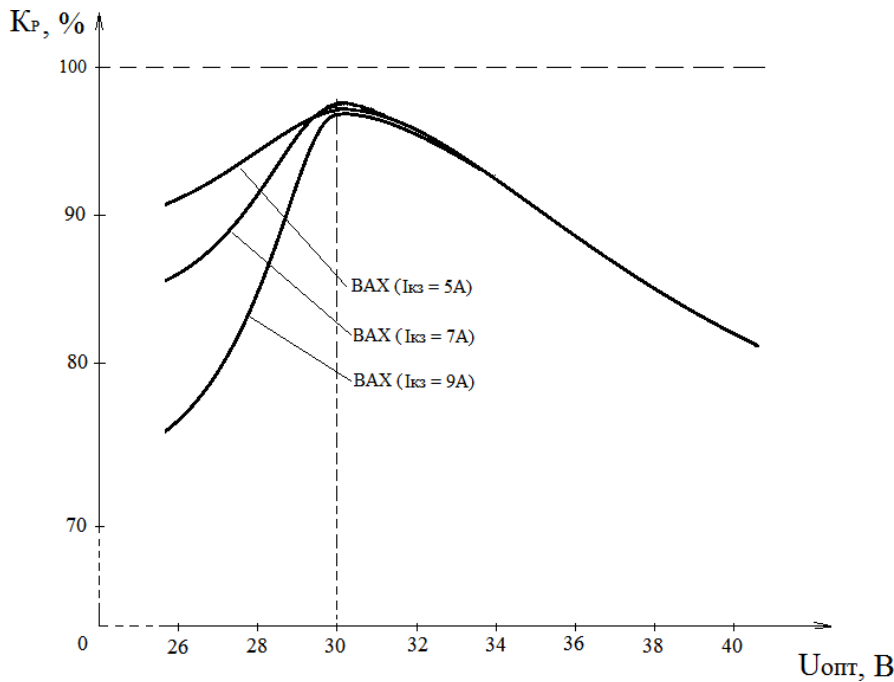


Рис. 18. Зависимости коэффициента использования по мощности солнечных батарей от напряжения экстремальной точки ВВХ

Далее приведены результаты экспериментальных исследований контроллера заряда, обеспечивающего режим экстремального шагового регулирования мощности СБ. При этом, для проведения экспериментальных работ в режиме стабильной ВАХ использован имитатор солнечных батарей. Параметры заданных ВАХ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры заданных ВАХ СБ

U_{xx} СБ, В	$I_{кз}$ СБ, А	U_{opt} СБ, В	I_{opt} СБ, А
36	5	28,8	4,3
38	6	30,4	5,22
40	7	32,4	6,09
44	8	35,6	7,04
48	9	39,4	8,01
50	10	41	9

Диаграмма перемещения рабочей точки на ВВХ при регулировании максимума мощности в режиме ЭРМ СБ представлена на рисунке 19.

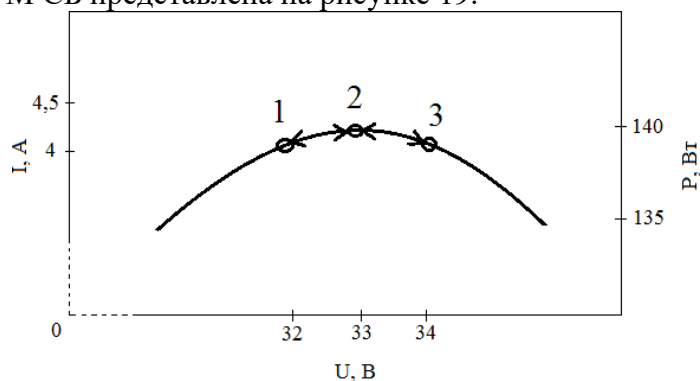


Рис. 19. Диаграмма перемещения рабочей точки на ВВХ при регулировании максимума мощности в режиме ЭРМ СБ

Установлено, что перемещение рабочей точки СБ в режиме регулирования максимума мощности происходит по трем точкам, что обусловлено заданными параметрами схемы поиска экстремума – частотой изменения напряжения 1 Гц и величиной шага $\Delta U = 1$ В.

В процессе экспериментальных исследований и моделирования контроллера заряда АБ определена средняя мощность СБ в режиме ЭРМ по формуле:

$$P_{\text{CP}} = \frac{P_A + 2 \cdot P_B + P_C}{4}, \quad (1)$$

где P_A – мощность СБ в точке А;

P_B – мощность СБ в точке В;

P_C – мощность СБ в точке С.

На рисунках 20-29 представлены диаграммы, полученные при моделировании АФЭУ в среде имитационного моделирования MatLab Simulink при различных значениях величины шага экстремального регулирования и частоте регулирования.

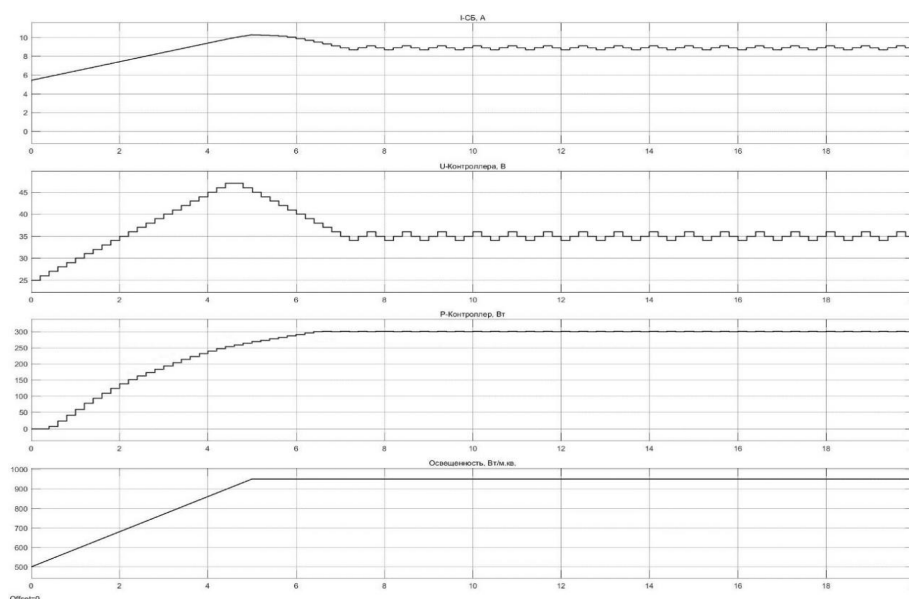


Рис. 20. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР (величина шага – 0,5 В, частота шага – 5 Гц).

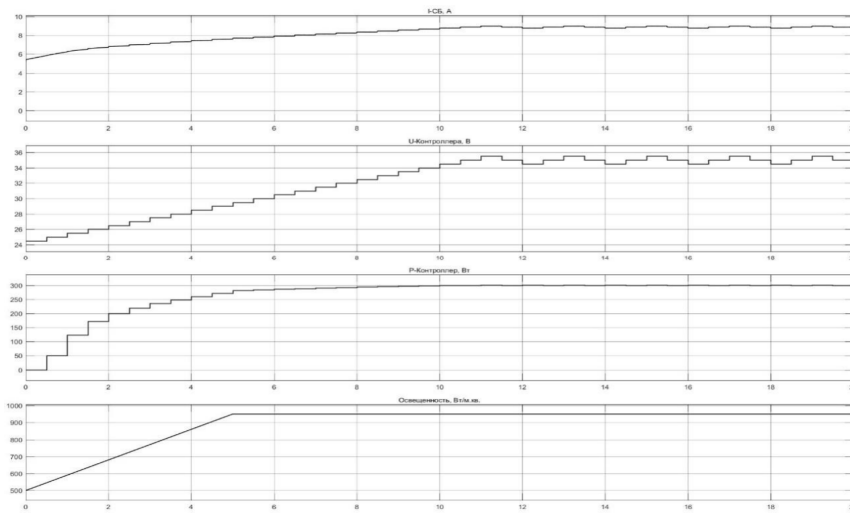


Рис. 21. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 0,5 В, частота шага – 2 Гц)

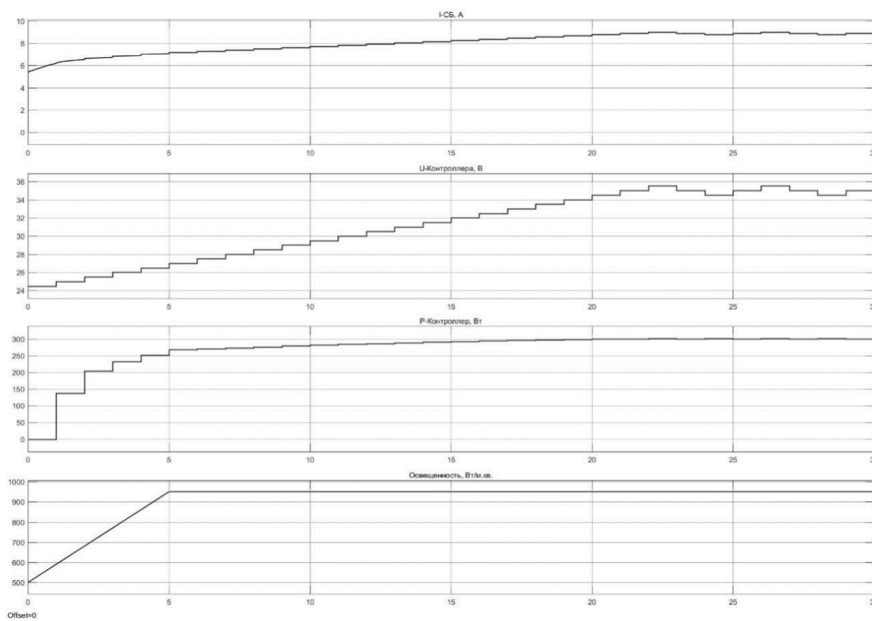


Рис. 22. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 0,5 В, частота шага – 1 Гц)

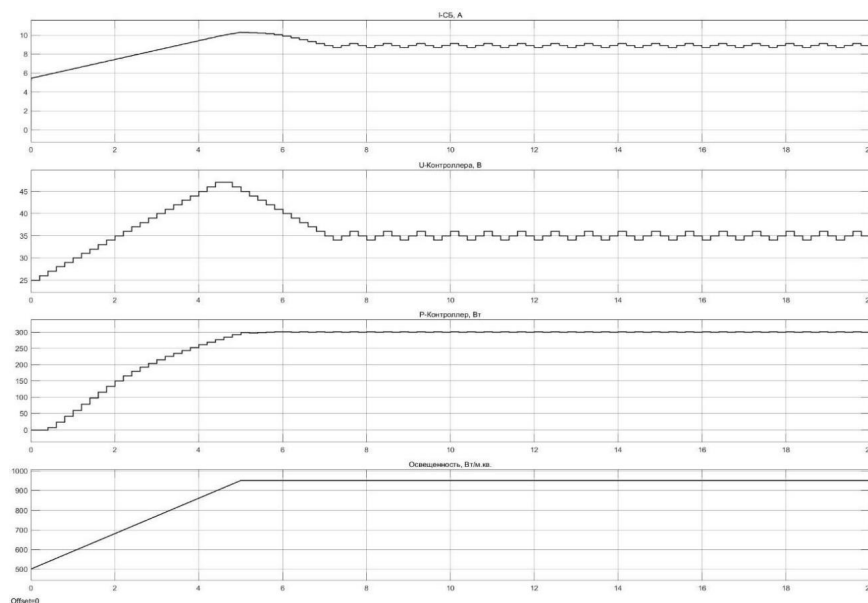


Рис. 23. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 5 Гц)

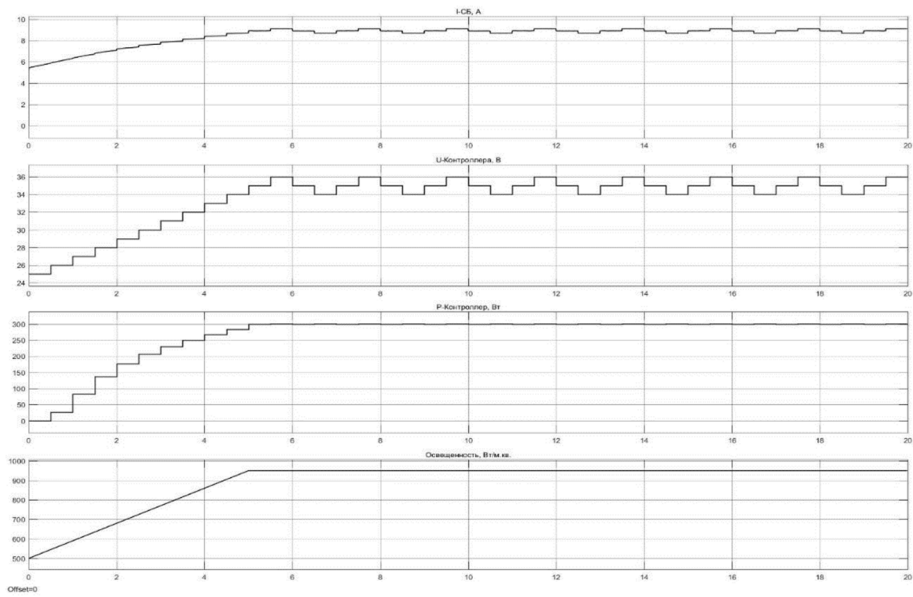


Рис. 24. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 2 Гц)

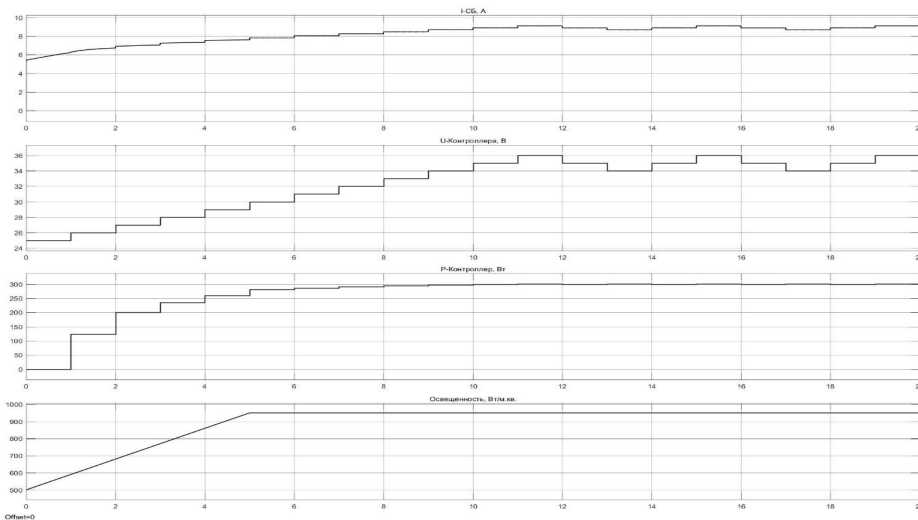


Рис. 25. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 1 Гц)

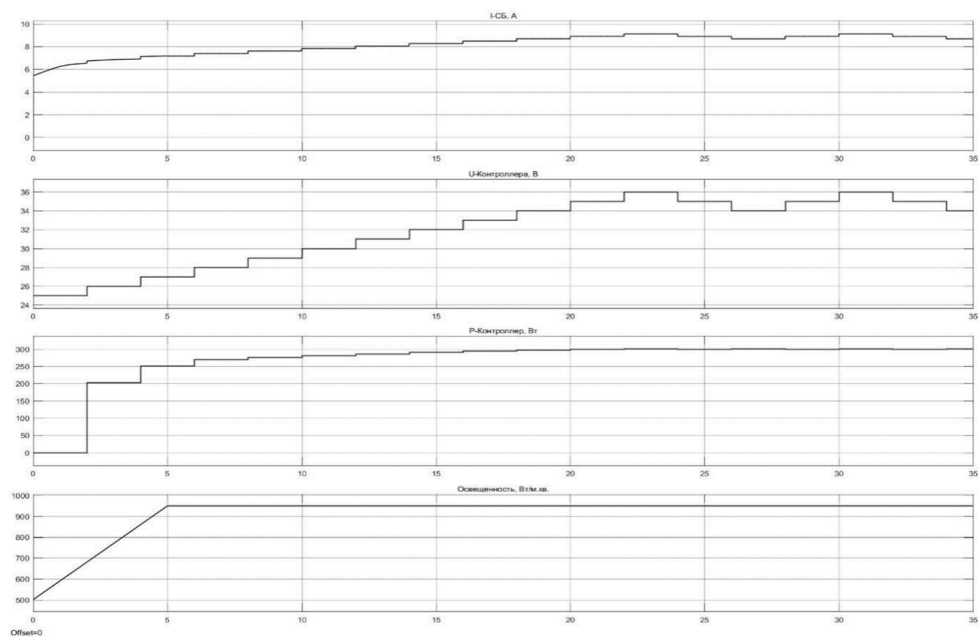


Рис. 26. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 1 В, частота шага – 0,5 Гц)

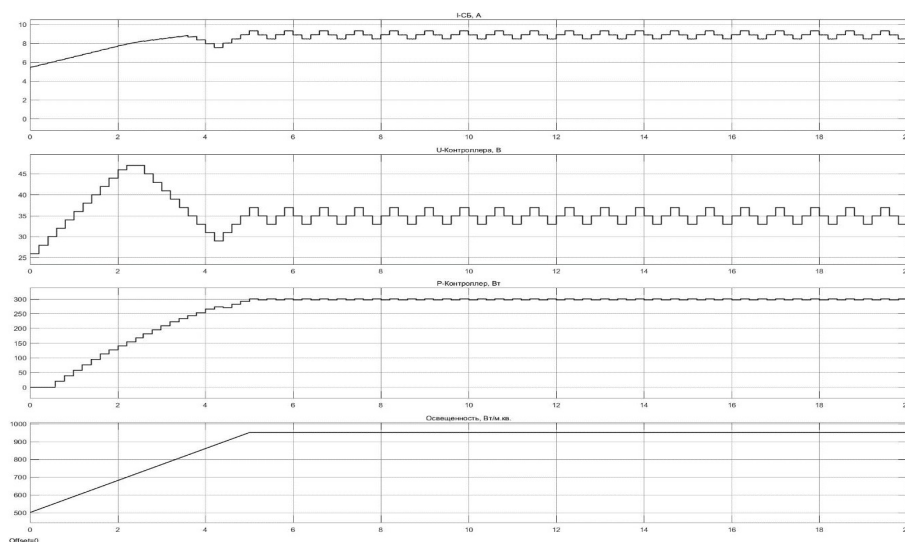


Рис. 27. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 2 В, частота шага – 5 Гц)

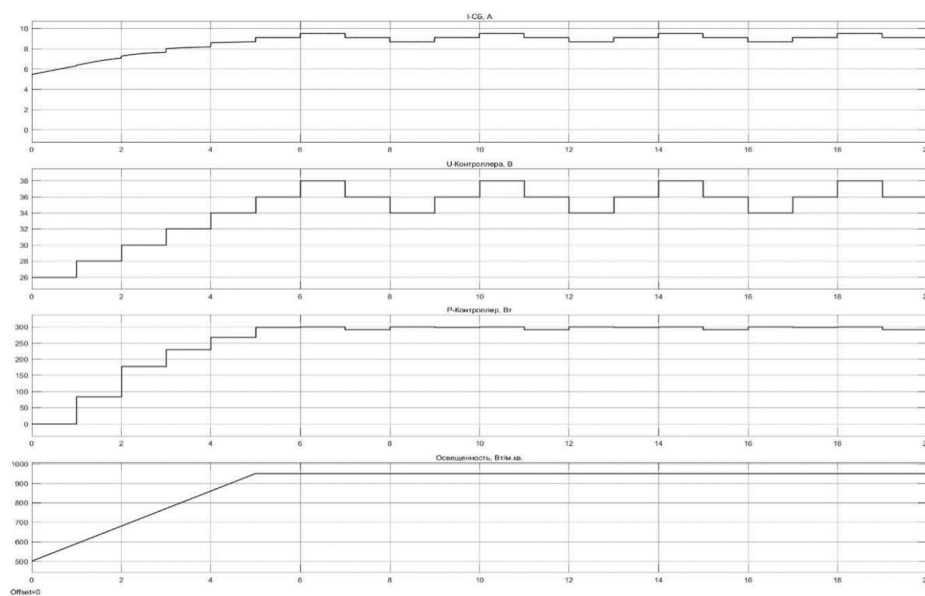


Рис. 28. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 2 В, частота шага – 1 Гц)

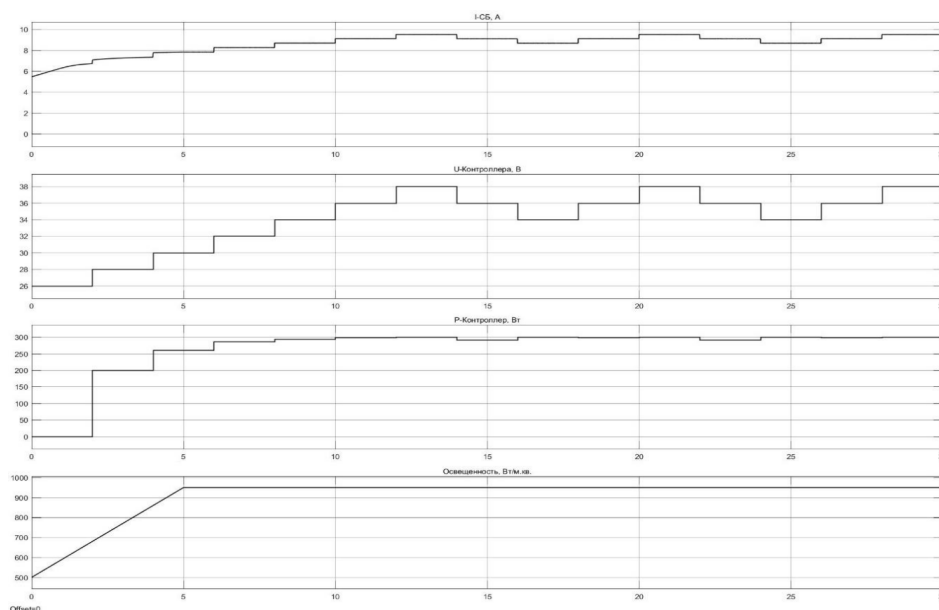


Рис. 29. Временные диаграммы мощности СБ в режиме ЭШР(величина шага – 2 В, частота шага – 0,5 Гц)

Анализ графиков показывает, что ЭШР с величиной шага регулирования напряжения $\Delta U = 1$ В и частотой регулирования 1-2 Гц позволяет достичь значения коэффициента использования СБ по мощности более 98%. В ходе проведения моделирования и экспериментальных исследований получены градиенты измеряемых мощностей, достаточные для устойчивого регулирования максимума мощности по трем точкам.

Варьирование параметров ВАХ, таких как напряжение холостого хода U_{xx} и тока короткого замыкания $I_{кз}$, не привело к существенному изменению коэффициента использования, сохраняющего свое значение в пределах $K_p = 98-98,5\%$.

Применение экстремального регулирования мощности СБ позволяет существенно улучшить энергетическую эффективность АФЭУ-0.5. В сравнении со схемой соединения силовых шин СБ и АБ при отклонении температуры панелей

фотоэлектрических модулей на ± 40 градусов энергетическая эффективность при ЭРМ СБ увеличивается до 28 %.

Также проведены экспериментальные исследования энергетической эффективности режима экстремального регулирования мощности солнечной батареи с реальными СБ (два модуля КСМ-160) и при реальном солнечном освещении. Режим работы установки АФЭУ-0,5ЭРМ:

- угол наклона плоскости СБ к горизонту = 56° ;
- время проведения эксперимента с 10:00 до 17:00;
- установка АФЭУ-0,5ЭРМ ориентирована на Юг.

Результаты экспериментальных исследований сведены в таблицу 4. Наблюдается изменение параметров ВАХ, которое могло быть вызвано целым рядом факторов: изменением освещенности СБ вследствие суточного пути Солнца по небесному своду, его затенения, изменением температуры солнечных панелей ит.д.

Таблица 4 – Результаты экспериментальных исследований коэффициента использования солнечной батареи по мощности от напряжения холостого хода U_{xx} при ЭРМ СБ

t, ч	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
U_{xx} , В	39	39	38	38	39	39	43	42
$t_{сб}$, °С	45°	45°	50°	55°	50°	50°	40°	40°
$t_{окр.сп.}$, °С	22°	27°	28°	30°	31°	32°	29°	27°
$P_{сб}$, Вт	138,5	176,3	198,3	225,1	213,1	177	122	86
K_p , %	99	98,7	99	98,9	99,2	98,6	98,5	98,6

Проведенные испытания показали, что параметры экстремального шагового регулирования мощности, составляющие $\Delta U=1$ В и частоту изменения напряжения 1 Гц, обеспечивают компенсацию параметров СБ при дрейфе ВАХ в реальных условиях. Результаты при реальном солнечном освещении практически совпадают с экспериментальными данными, полученными при использовании имитатора солнечных батарей ИБС - 200/7-4, а также с результатами моделирования.

Экспериментально получены значения выходной мощности СБ от времени суток (Рис. 30). Эксперимент проводился при условиях небольшой облачности, в результате чего не получено максимально возможное значение мощности, генерируемое двумя солнечными батареями КСМ-160.

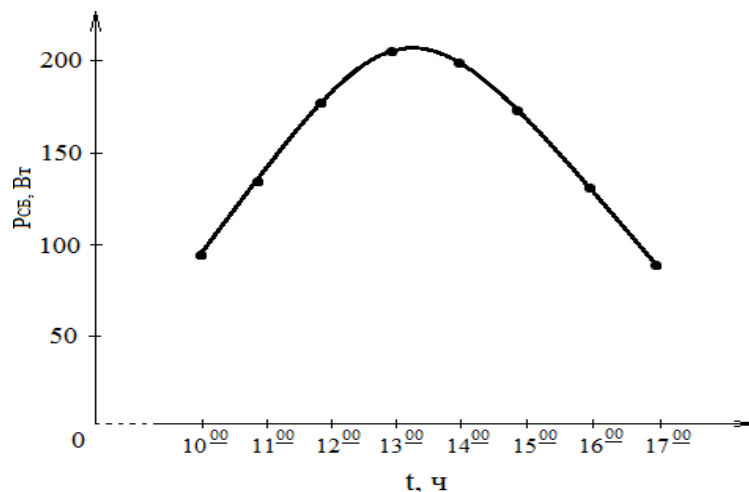


Рис. 30. Зависимость мощности СБ от времени суток

На рисунке 31 приведены обобщенные результаты изменения температуры фотоэлектрических преобразователей от времени суток, полученные в ходе эксперимента.

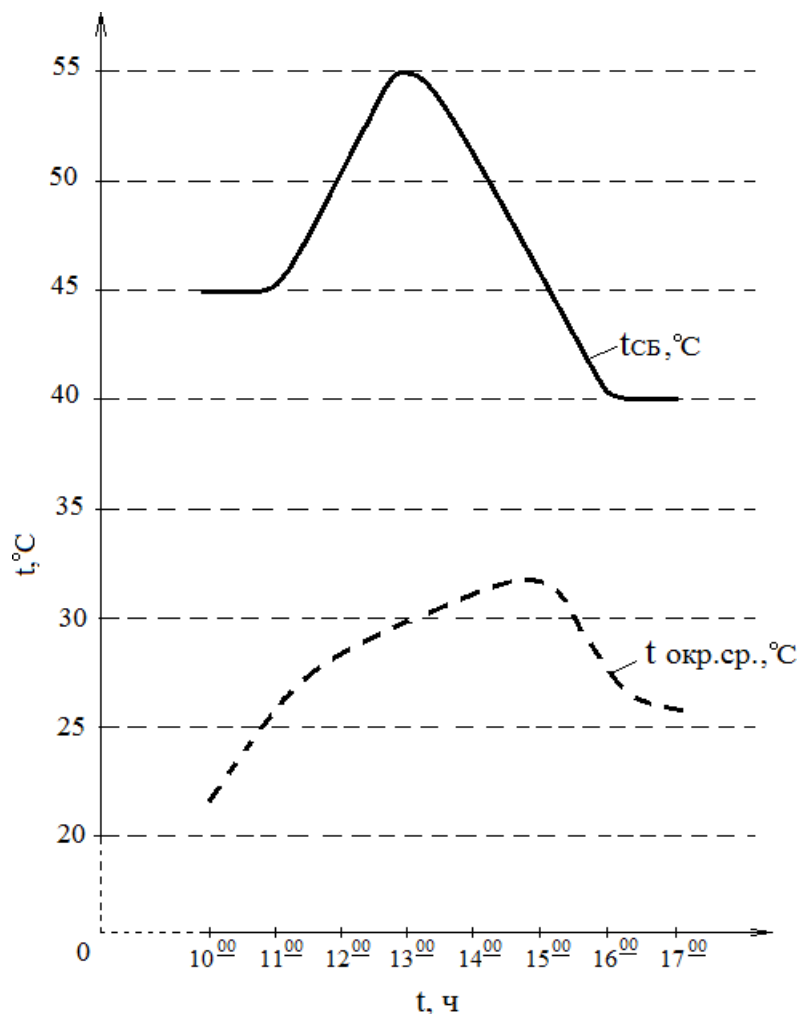


Рис. 31. Зависимость температуры фотоэлектрических преобразователей от температуры окружающей среды и времени суток

На рисунке 32 изображены зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей при стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ, при

реальном солнечном освещении и с использованием ИБС-200/7-4.

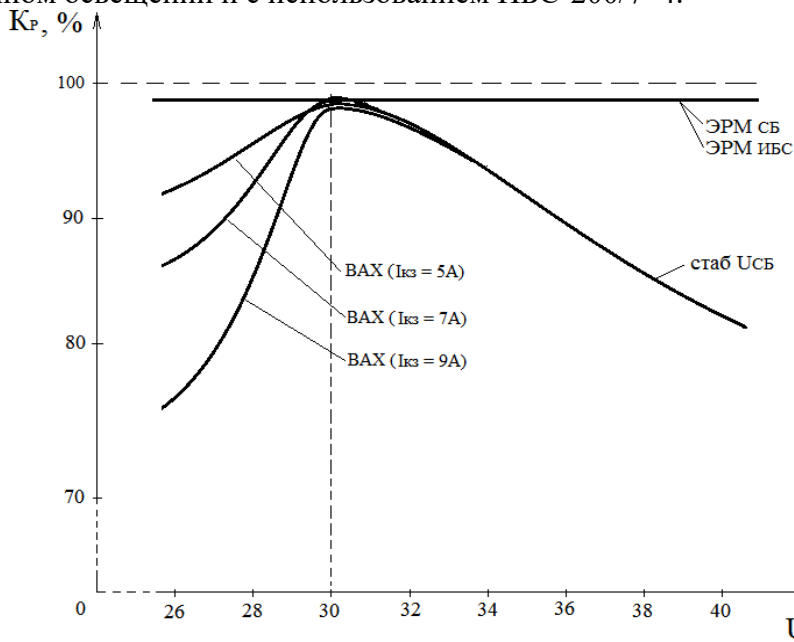


Рис. 32. Зависимости коэффициента использования по мощности K_p солнечных батарей при стабилизации напряжения рабочей точки СБ и ЭРМ СБ

Коэффициент использования при ЭРМ СБ изменяется в пределах $K_p = 98,5-99\%$. Это объясняется различием положения точек регулирования УСБ относительно вершины ВВХ.

Прирост мощности солнечной батареи при ЭРМ СБ по сравнению с режимом стабилизации напряжения на уровне 30 В составляет до 28 %. Разработанная система поиска экстремума с выбранными параметрами обеспечивает коэффициент использования мощности СБ $K_p \geq 98\%$.

Другим важным экспериментально проверенным параметром является КПД контроллера заряда. По экспериментальным данным построена усредненная зависимость КПД блока заряда от выходной мощности солнечной батареи при разряженной аккумуляторной батарее ($U_{AB} = 23,1-24,3В$) и заряженной АБ ($U_{AB} = 25,4-27В$), представленная на рисунке 33 (в качестве солнечной батареи используется имитатор солнечной батареи ИБС-200/7-4).

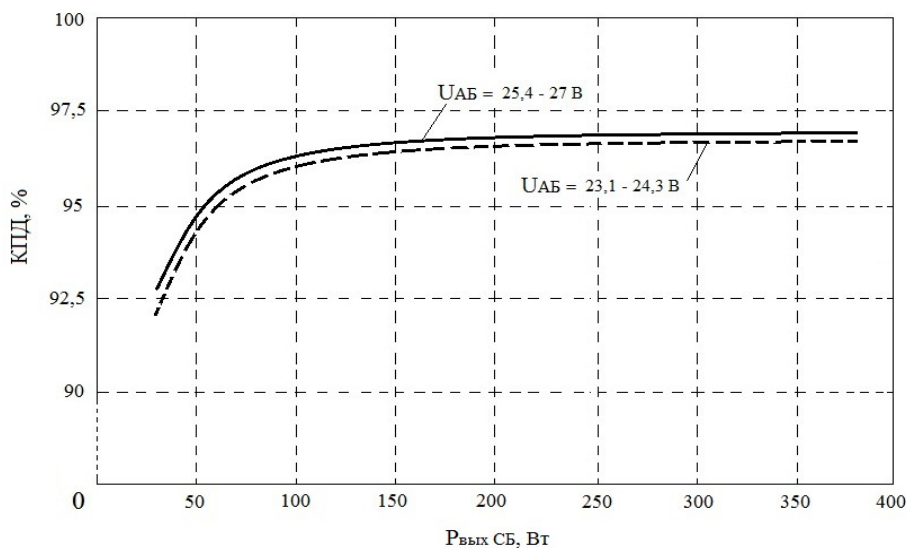


Рис. 33. Усредненная зависимость КПД блока заряда от $P_{\text{вых СБ}}$ при разряженной АБ ($U_{AB} = 23,1 - 24,3 В$) и заряженной АБ ($U_{AB} = 25,4 - 27 В$)

Анализ зависимости показывает рост КПД в диапазоне 92,5 %–96,5% в зависимости от выходной мощности солнечных батарей.

В окончании экспериментов были проверены технические характеристики энергетической установки АФЭУ – 0,5 при стабилизации напряжения на СБ равно 30 В ($U_{СБ} = 30$ В) и изменении мощности нагрузки от 50 до 1000 Вт. Испытания проводились при разряженной ($U_{АБ} = 22,6–24,2$ В) и заряженной ($U_{АБ} = 25,5–27$ В) аккумуляторной батарее.

Основными исследуемыми параметрами являлись:

- выходное напряжение АФЭУ – 0,5;
- зависимость тока и мощности АБ от мощности нагрузки и параметров ВАХ солнечной батареи.

Выходное напряжение определяется техническими параметрами инвертора А 302–1К7-F3 и соответствует его паспортным данным – $U_{ВЫХ} = 230$ В \pm 23 В.

На рисунке 34 показаны потоки мощности между солнечной, аккумуляторной батареями и нагрузкой при разряженной ($U_{АБ} = 22,6 – 24,2$ В) и заряженной ($U_{АБ} = 25,5–27$ В) аккумуляторной батарее для трех ВАХ (1. $U_{ХХ} = 36$ В; $I_{КЗ} = 5$ А. $P_{СБ(30)} = 120$ Вт;

2. $U_{ХХ} = 40$ В, $I_{КЗ} = 7$ А. $P_{СБ(30)} = 192$ Вт;

3. $U_{ХХ} = 48$ В, $I_{КЗ} = 9$ А. $P_{СБ(30)} = 268$ Вт).

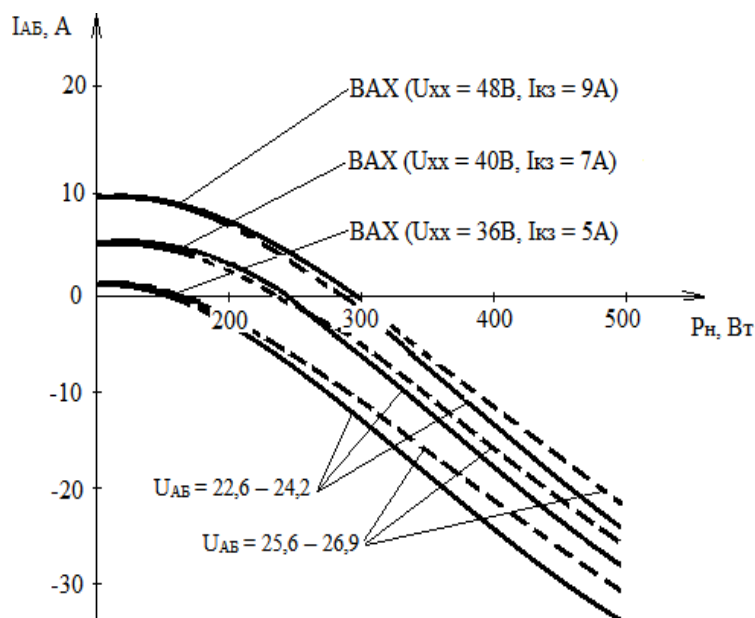


Рис. 34. Зависимости тока АБ от мощности нагрузки и параметров ВАХ СБ при $U_{АБ} = 22,6–24,2$ В и $U_{АБ} = 25,5–26,9$ В

Каждую кривую можно разбить на два участка:

- первый $I_{АБ} > 0$ - происходит заряд АБ всем избытком мощности СБ;
- второй $I_{АБ} < 0$ - происходит разряд аккумуляторной батареи, АБ компенсирует недостаток мощности СБ. Чем выше мощность СБ, тем при более высоком значении нагрузки прекращается заряд аккумуляторной батареи и начинается ее разряд.

Заключение

В настоящей работе была выполнена разработка и исследование автономной фотоэлектрической энергетической установки малой мощности (АФЭУ-0,5) с применением метода экстремального шагового регулирования мощности (ЭШР) солнечных батарей. Основная цель исследования – повышение эффективности преобразования солнечной энергии и оптимизация работы автономной установки – была полностью реализована благодаря комплексному использованию теоретических, экспериментальных и моделирующих методов.

Для достижения поставленной цели были применены следующие методы:

- теоретический анализ существующих подходов к регулированию мощности солнечных батарей, выявление их достоинств и недостатков;
- экспериментальные испытания установки с измерением ключевых параметров: ток, напряжение, мощность, коэффициент использования энергии;
- моделирование в Matlab Simulink, направленное на проверку устойчивости работы установки и оптимизацию параметров ЭШР;
- сравнительный анализ эффективности предложенного метода с традиционными способами регулирования мощности.

Этапы исследования включали:

- анализ научной литературы и практических решений в области автономных фотоэлектрических систем;
- разработку алгоритма экстремального шагового регулирования мощности;
- создание экспериментального макета установки АФЭУ-0,5;
- проведение лабораторных и полевых испытаний;
- обработку полученных данных и формирование научных выводов.

Использование комплексного подхода обеспечило полноту изучения исследуемого объекта и позволило выявить преимущества ЭШР перед существующими методами управления солнечными батареями.

В результате проведённой работы были получены следующие результаты:

- Разработка и внедрение алгоритма ЭШР, который позволяет повысить коэффициент использования энергии солнечных батарей до 97–98 % в различных условиях инсоляции;
- Экспериментальное подтверждение эффективности работы АФЭУ-0,5: установка демонстрирует стабильное функционирование, высокую энергетическую отдачу и адаптивность к изменяющимся условиям солнечного излучения;
- Моделирование показало, что внедрение ЭШР позволяет снизить потери энергии при нестабильной освещённости, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки на аккумуляторные батареи;
- Сравнительный анализ с традиционными методами стабилизации напряжения выявил превосходство ЭШР по коэффициенту использования мощности и общей эффективности установки.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую работоспособность и практическую применимость предложенного метода для автономных фотоэлектрических систем.

На основании проведённого исследования можно сформулировать следующие выводы:

- Предложенный метод ЭШР доказал свою практическую эффективность для автономных фотоэлектрических установок малой мощности;
- Экспериментальные и моделирующие результаты подтвердили гипотезу исследования: применение ЭШР повышает коэффициент использования энергии солнечных батарей и общую энергетическую эффективность установки;
- Научное знание о методах управления автономными фотоэлектрическими системами расширено за счёт разработки нового подхода к регулированию мощности и подтверждения его работоспособности.

Полученные выводы вносят вклад в развитие науки в области автономных возобновляемых энергетических систем и предоставляют основу для дальнейших исследований.

Результаты исследования обладают высокой практической значимостью:

- Разработанная АФЭУ-0,5 может быть использована для автономного электроснабжения малых объектов, включая частные дома, удалённые станции и

телекоммуникационные узлы;

- Метод ЭШР может быть масштабирован на более мощные установки и интегрирован в гибридные энергосистемы с ветровыми или дизельными генераторами;

- Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку программного обеспечения для автоматизации управления установками, внедрение интеллектуальных алгоритмов прогнозирования солнечной инсоляции и оптимизацию работы аккумуляторных батарей в долгосрочной перспективе.

Таким образом, проведённая работа подтверждает эффективность предложенной методики, расширяет научное знание в области автономных фотоэлектрических установок и открывает новые перспективы для практического применения и дальнейшего развития технологий управления солнечными батареями.

ЛИТЕРАТУРА

Шиняков, 2011а — Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Осипов А.В., Теушаков О.А., Аржанов К.В. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью // Доклады ТУСУРа. — 2011. — № 2 (24), часть 1. — С. 282–287. [Russ.]

Шиняков, 2011б — Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Теушаков О.А., Осипов А.В., Аржанов К.В. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка // Доклады ТУСУРа. — 2011. — № 2 (24). — часть 1. — С. 283. [Russ.]

Кудряшов, 1992 — Кудряшов В.С., Исляев Ш.Н. Концепция бортовой системы электроснабжения связанного геостационарного ИСЗ // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства. Т.1. Аппаратура управления и преобразования энергии: Сб. науч. трудов НПО «Полнос». — Томск. — 1992. — С. 17–24. [Russ.]

Отто, 2012а — Отто А.И. Контроллер заряда автономных фотоэлектрических энергетических установок // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Труды XIV международного студенческого научно-технического семинара. — Томск: ТПУ. — 2012. — Т.1. — С. 211–215. [Russ.]

Отто, 2012б — Отто А.И. Исследование энергетической эффективности солнечных батарей при недостаточной освещенности и температурной нестабильности фотоэлектрических элементов // Научная сессия ТУСУР. — 2012. — С. 179–182. [Russ.]

Стребков, 1998 — Стребков Д.С. и др. Методика расчета технико-экономических характеристик электростанций в условиях рыночной экономики (на примере солнечной фотоэлектрической станции). — М.: ВИЭСХ. — 1998. — С. 6. [Russ.]

Тверьянович, 1986 — Тверьянович Э.В. Экспериментальное исследование оптико-энергетических характеристик фоконов. Концентраторы солнечного излучения для фотоэлектрических энергоустановок. — М.: Энергоатомиздат. — 1986. — С. 11–14. [Russ.]

Шиняков, 2015 — Шиняков Ю.А., Отто А.И., Осипов А.В., Черная М.М. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей // Альтернативная энергетика и экология. — 2015. — № 8–9. — С. 12–18. [Russ.]

Охоткин, 2013 — Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций // Вестник Чувашского университета. — 2013. — № 3. — С. 222–230. [Russ.]

Иродионов, 2000 — Иродионов А.Е. Реверсивно-балансовый метод проектирования автономных солнечных фотоэлектрических установок: дис. канд. техн. наук: 05.14.08 / Всерос. НИИ электрификации сельского хозяйства. — Москва. — 2000. — 23 с. [Russ.]

Иванчура, 2014 — Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В., Пост С.С. Имитационная модель автономной системы электропитания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2014. — Т. 325. — № 4. — С. 111–120. [Russ.]

Шиняков, 2010 — Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. — 2010. — № 2 (22). — ч. 2. — С. 102–107. [Russ.]

REFERENCES

Shinyakov, 2011a – Shinyakov, Yu.A., Shurygin, Yu.A., Arzhanov, V.V., Osipov, A.V., Teushakov, O.A., Arzhanov, K.V. Avtomatizirovannaya fotoelektricheskaya ustanovka s povyshennoy energeticheskoy effektivnost'yu // Doklady TUSURa. — 2011. — № 2 (24), chast' 1. — Pp. 282–287. [in Russ.]

Shinyakov, 2011b – Shinyakov, Yu.A., Shurygin, Yu.A., Arzhanov, V.V., Teushakov, O.A., Osipov, A.V., Arzhanov, K.V. Avtonomnaya fotoelektricheskaya energeticheskaya ustanovka // Doklady TUSURa. — 2011. — № 2 (24). — chast' 1. — Pp. 283. [in Russ.]

Kudryashov, 1992 – Kudryashov, V.S., Islyayev, Sh.N. Kontsepsiya bortovoy sistemy elektrosnabzheniya svyaznogo geostatsionarnogo ISZ // Sistemy avtonomnogo elektrosnabzheniya i elektromekhanicheskie ustroystva. T.1. Apparatura upravleniya i preobrazovaniya energii: Sb. nauch. trudov NPO «Polyus». — Tomsk. — 1992. — Pp. 17–24. [in Russ.]

Otto, 2012a – Otto, A.I. Kontroller zaryada avtonomnykh fotoelektricheskikh energeticheskikh ustanovok // Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': Trudy XIV mezhdunarodnogo studencheskogo nauchno-tekhnicheskogo seminar. — Tomsk: TPU. — 2012. — T.1. — Pp. 211–215. [in Russ.]

Otto, 2012b – Otto, A.I. Issledovanie energeticheskoy effektivnosti solnechnykh batarey pri nedostatochnoy osveshchennosti i temperaturnoy nestabil'nosti fotoelektricheskikh elementov // Nauchnaya sessiya TUSUR. — 2012. — Pp. 179–

182. [in Russ.]

Strebkov, 1998 – Strebkov, D.S. i dr. Metodika rascheta tekhniko-ekonomicheskikh kharakteristik elektrostantsiy v usloviyakh rynochnoy ekonomiki (na primere solnechnoy fotoelektricheskoy stantsii). — M.: VIESKh. — 1998. — Pp. 6. [in Russ.]

Tver'yanovich, 1986 – Tver'yanovich, E.V. Eksperimental'noe issledovanie optiko-energeticheskikh kharakteristik fokonov. Kotsentratory solnechnogo izlucheniya dlya fotoelektricheskikh energoustanovok. — M.: Energoatomizdat. — 1986. — Pp. 11–14. [in Russ.]

Shinyakov, 2015 – Shinyakov, Yu.A., Otto, A.I., Osipov, A.V., Chernaya, M.M. Avtonomnaya energeticheskaya ustanovka s ekstremal'nym shagovym regul'yatorom moshchnosti solnechnykh batarey // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. — 2015. — № 8–9. — Pp. 12–18. [in Russ.]

Okhotkin, 2013 – Okhotkin, G.P. Metodika rascheta moshchnosti solnechnykh elektrostantsiy // Vestnik Chuvashskogo universiteta. — 2013. — № 3. — Pp. 222–230. [in Russ.]

Irodionov, 2000 – Irodionov, A.E. Reversivno-balansovyy metod proektirovaniya avtonomnykh solnechnykh fotoelektricheskikh ustanovok: dis. Kand. tekhn. nauk : 05.14.08 / Vseros. NII elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva. — Moskva. — 2000. — 23 s. [in Russ.]

Ivanchura, 2014 – Ivanchura, V.I., Krasnobaev, Yu.V., Post, S.S. Imitatsionnaya model' avtonomnoy sistemy elektropitaniya // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. — 2014. — T. 325. — № 4. — Pp. 111–120. [in Russ.]

Osipov, 2013 – Osipov, A.V., Shurygin, Yu.A., Shinyakov, Yu.A., Otto, A.I., Chernaya, M.M. Sopostavitel'nyy analiz energeticheskoy effektivnosti preobrazovaniya energii solnechnoy batarei preobrazovatelyami postoyannogo napryazheniya // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. — 2013. — № 1 (27). [in Russ.]

Shinyakov, 2010 – Shinyakov, Yu.A., Shurygin, Yu.A., Arkatova, O.E. Povishenie energeticheskoy effektivnosti avtonomnykh fotoelektricheskikh energeticheskikh ustanovok // Doklady Tom. gos. un-ta sistem upravleniya i radioelektroniki. — 2010. — № 2 (22). — ch. 2. — Pp. 102–107. [in Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 132–150
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>
UDC 656.2

METHODOLOGY FOR DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS OF PASSENGER TRAIN FORMATION AND MOVEMENT

*V. Guliyev**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: guliyev.vusal@kaznu.kz

Vusal Guliyev — master student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: nurlankyzy.aliya@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4938-0916>.

© V. Guliyev

Abstract. This study addresses the problem of optimizing the parameters of passenger train formation and movement on railway transport. The relevance of the topic is determined by the need to improve transportation efficiency, passenger comfort, and reduce operational costs. At the current stage of railway development, there is a lack of comprehensive methods for train composition formation considering different types of carriages, train weight, and speed. The aim of the study is to determine optimal parameters for passenger train formation and operation to ensure rational resource use and economic efficiency. The following tasks were set: analysis of existing train formation methods, collection and processing of statistical data, development of a methodology for optimizing train composition and operation, mathematical modeling, and comparative analysis of results. The research revealed dependencies between train composition, weight, operation mode, and economic efficiency. Recommendations for train formation with different carriage types were developed, allowing cost reduction and improved passenger comfort. Optimizing train formation and operation parameters confirms the hypothesis that efficiency can be increased through a systematic approach. The results can be applied in railway practice and further scientific studies in transportation modeling.

Keywords: passenger train, composition, optimization, speed, economic efficiency, railway transport

For citation: V. Guliyev. Methodology for Determining Optimal Parameters of Passenger Train Formation and Movement // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 132–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ЖОЛАУШЫЛАР ПОЙЫЗДАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУ ЖӘНЕ ҚОЗҒАЛЫС ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ӘДІСТЕМЕСІ

*В.Н. Гулиев**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: guliyev.vusal@kaznu.kz

Вусал Гулиев — магистрант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: nurlankyzy.aliya@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4938-0916>.

© В.Н. Гулиев



Аннотация. Бұл зерттеуде теміржол көлігінде жолаушылар пойыздарының құрамын қалыптастыру және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру мәселесі қарастырылады. Тақырып өзектілігі тасымалдау тиімділігін арттыру, жолаушыларға ыңғайлылық жасау және эксплуатациялық шығындарды азайту қажеттілігімен түсіндіріледі. Қазіргі теміржол саласын дамыту кезеңінде әртүрлі вагон категориялары, пойыздың салмағы және жылдамдығын ескеретін кешенді әдістер жеткіліксіз. Зерттеудің мақсаты – ресурстарды тиімді пайдалану және экономикалық тиімділікті қамтамасыз ету үшін жолаушылар пойыздарын қалыптастыру және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: пойыз құрамын қалыптастырудың қазіргі әдістерін талдау, статистикалық деректер жинау және өңдеу, құрам мен қозғалыс режимін оңтайландыру әдістемесін әзірлеу, математикалық модельдеу және нәтижелерді салыстырмалы талдау. Зерттеу пойыз құрамының, салмағының, қозғалыс режимінің және экономикалық тиімділіктің өзара байланысын көрсетті. Әртүрлі вагон категориялары бар пойыздарды қалыптастыру бойынша ұсыныстар жасалды, бұл эксплуатациялық шығындарды азайтуға және жолаушыларға ыңғайлылықты арттыруға мүмкіндік береді. Пойыз құрамын және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру тиімділікті жүйелі тәсіл арқылы арттыру мүмкіндігін растайды. Алынған нәтижелер теміржол тәжірибесінде және көліктік модельдеу саласындағы ғылыми зерттеулерде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: жолаушылар пойызы, құрам, оңтайландыру, жылдамдық, экономикалық тиімділік, теміржол көлігі

Дәйексөздер үшін: В.Н. Гулиев. Жолаушылар пойыздарының құрамын қалыптастыру және қозғалыс параметрлерін оңтайландыру әдістемесі // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 132–150 бет. (Орыс. тіл.)
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

*В.Н. Гулиев**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: guliyev.vusal@kaznu.kz

Вусал Гулиев — магистрант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

E-mail: nurlankyzy.aliya@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4938-0916>.

© В.Н. Гулиев

Аннотация. В настоящем исследовании рассматривается проблема оптимизации параметров формирования и движения пассажирских поездов на железнодорожном транспорте. Актуальность темы определяется необходимостью повышения эффективности перевозок, улучшения комфортности для пассажиров и снижения эксплуатационных затрат. На современном этапе развития железнодорожной отрасли наблюдается недостаточная разработанность комплексных методов формирования состава поездов с учетом различных категорий вагонов, массы поезда и скорости движения. Цель исследования заключается в определении оптимальных параметров формирования и движения пассажирских поездов, обеспечивающих рациональное использование ресурсов и экономическую эффективность перевозок. Для достижения цели поставлены следующие задачи: анализ существующих методов формирования поездов, сбор и

обработка статистических данных, разработка методики оптимизации состава и режима движения, математическое моделирование и сравнительный анализ полученных результатов. В результате проведенного исследования выявлены зависимости между составом поезда, его массой, режимом движения и экономической эффективностью перевозок. Разработаны рекомендации по формированию поездов с различными категориями вагонов, позволяющие снизить эксплуатационные затраты и повысить комфорт пассажиров. Оптимизация параметров формирования и движения пассажирских поездов подтверждает гипотезу о возможности повышения эффективности перевозок при системном подходе. Полученные результаты могут быть использованы в практике железнодорожных перевозок и для дальнейших научных исследований в области транспортного моделирования.

Ключевые слова: пассажирский поезд, состав, оптимизация, скорость, экономическая эффективность, железнодорожный транспорт

Для цитирования: В.Н. Гулиев. Методика определения оптимальных параметров формирования и движения пассажирских поездов // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. №. 89. Стр. 132–150. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.007>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях динамичного развития железнодорожного транспорта и увеличения пассажиропотоков возникает необходимость совершенствования процессов формирования и движения пассажирских поездов. Анализ существующих исследований показывает, что до настоящего времени вопросы оптимизации состава поездов и режимов их движения изучены недостаточно. В частности, большинство работ посвящено либо техническим аспектам эксплуатации локомотивов, либо пассажирскому комфорту, но комплексное рассмотрение взаимосвязи состава поезда, веса, скорости движения и экономической эффективности встречается редко.

Проблемная ситуация усугубляется отсутствием унифицированных методик расчета оптимальной композиции поездов с учетом реальных эксплуатационных условий и разнообразия категорий вагонов. Появление новых типов вагонов и модернизированных локомотивов создает необходимость пересмотра существующих рекомендаций и разработки научно обоснованных подходов к формированию составов. Таким образом, выбор темы исследования обусловлен актуальной практической задачей повышения эффективности пассажирских перевозок, а также дефицитом комплексных научных исследований в этой области.

Актуальность исследования определяется как теоретической, так и практической значимостью. Теоретическая значимость заключается в возможности уточнения существующих моделей формирования поездов и расширения научного знания о взаимосвязи параметров состава с эксплуатационными и экономическими показателями. Практическая значимость проявляется в потенциале внедрения разработанных рекомендаций на железнодорожных линиях, что позволит повысить эффективность использования подвижного состава, снизить эксплуатационные затраты и улучшить качество обслуживания пассажиров (Дмитренко, 2006: 34–38; Вахитова, 2006а: 96–98; Вахитова, 2006б: 294–298; Кобдинов, 2007: 263–266; Касымов, 2006: 49–52; Тихомиров, 1979: 67–234; Мустапаева, 2006: 75–81).

Объект исследования — процессы формирования и движения пассажирских поездов на железнодорожном транспорте. Предмет исследования — параметры состава пассажирских поездов, включая количество и тип вагонов, массу поезда, режим движения и их влияние на экономическую эффективность перевозок и комфорт пассажиров.

Цель исследования — определить оптимальные параметры формирования и движения пассажирских поездов, подтверждающие гипотезу о возможности повышения

экономической эффективности перевозок при системном анализе состава поезда и режима его движения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- провести анализ существующих подходов к формированию пассажирских поездов и выявить их ограничения;
- осуществить сбор и обработку исходных данных о пассажирских составах, локомотивах и инфраструктуре;
- разработать методику оптимизации состава поезда с учетом категорий вагонов, веса и скорости движения;
- провести математическое моделирование и графоаналитический анализ вариантов формирования поездов;
- сравнить полученные результаты с нормативными требованиями и оценить практическую применимость предложенных решений.

В исследовании использовались комплексные методы, включающие:

- анализ научной литературы и нормативных документов;
- сбор и систематизацию статистических и эксплуатационных данных;
- математическое моделирование состава поезда и режима его движения;
- графоаналитический метод для анализа зависимостей экономических и эксплуатационных показателей;
- сравнительный анализ результатов с существующими рекомендациями.

Выдвигается гипотеза: оптимизация состава и режима движения пассажирских поездов возможна при системном анализе технико-экономических показателей и математическом моделировании с учетом категорий вагонов, массы поезда и скорости движения.

Научное значение исследования заключается в уточнении методов формирования поездов и выявлении новых закономерностей влияния состава и скорости движения на экономические и эксплуатационные показатели. Практическое значение работы состоит в возможности внедрения результатов на железнодорожных линиях для повышения эффективности перевозок, рационального распределения ресурсов и улучшения обслуживания пассажиров.

Результаты и обсуждение

Композиция состава пассажирского поезда устанавливает число и порядок размещения вагонов разных категорий (плацкартных, купейных, мягких и др.) и определяет, с одной стороны, комфорт, предоставляемый пассажирам, с другой, — расчетную населенность и вес поезда, а, следовательно, скорость поездов, размеры их движения и расходы железных дорог, связанные с пассажирскими перевозками. Поэтому выбор композиции состава пассажирского поезда целесообразно выполнять одновременно с определением веса и скорости.

Как правило, композиция состава поезда — это 1–2 мягких, 5–8 купейных, 7–8 не купейных с плацкартными или общими местами, а также вагон-ресторан, багажные и почтовые вагоны. При этом населенность состава зависит от категории поезда и изменяется от 500 до 1100 пас.

Возможны несколько вариантов композиций составов, для каждого из которых в соответствии с числом мест в каждом вагоне и весом определяют населенность и весовую норму поезда. При этом нагрузку от пассажиров и ручной клади на вагон принимают для мягких вагонов 3 т, купейных - 4 т, не купейных плацкартных - 6 т, не купейных не плацкартных и межобластных - 6 т. На выбор наилучшей композиции, а следовательно, весовой нормы и скорости поездов оказывает влияние целый ряд факторов, в том числе мощность локомотива, тип профиля пути, конструкционные скорости подвижного состава

и др. Важные факторы — это скорость доставки пассажиров и денежные затраты, связанные с выполнением перевозок.

Для нахождения оптимальных веса и скорости поездов должны быть выполнены технико-экономические расчеты. При этом необходимо учитывать затраты на потребный парк локомотивов, содержание локомотивных бригад, электроэнергию (топливо) и ремонтные работы, потребное усиление пропускной способности линии, удлинение станционных путей и платформ, развитие вагонных экипировочных депо и др. (Правдин, 1990: 319–320).

При заданном техническом оснащении линии наибольшее влияние на скорость и вес оказывает стоимость 1 пассажиро-ч и 1 т-км работы локомотива. Оптимальные весовые нормы и скорости движения поездов могут быть установлены для возможных категорий поездов и их композиций при различной расчетной населенности, заданной длине станционных путей и мощности локомотива по минимуму приведенных затрат, учитывающих изменяющиеся в различных вариантах капитальные вложения и эксплуатационные расходы.

Приведенные затраты (тг/поезд)

$$E = R_{\text{мех}} C_{\text{т-км}} + \frac{L}{\beta_m v_x} C_{\text{п-ч}}, \quad (1)$$

где: $R_{\text{мех}}$ — работа локомотива, ткм;

$C_{\text{т-км}}$ — затраты на 1 ткм, тг;

$C_{\text{п-ч}}$ - приведенная стоимость 1 поезд-час с учетом оценки 1 пас-час, тг;

L — длина направления, км;

v_x — ходовая скорость, км/ч;

β_m — коэффициент маршрутной скорости пассажирского поезда, зависящий от числа и продолжительности стоянок поезда (0,80—0,95).

Работа локомотива (ткм)

$$R_{\text{мех}}^{\text{л}} = (P + Q)(\omega_0 + i_{\text{э}})10^{-3} L + 3,8(P + Q)(\alpha v_x)^2 10^{-6} K_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где: P — вес локомотива;

Q — вес состава, брутто;

ω_0 — основное удельное сопротивление движению поезда;

$i_{\text{э}}$ — эквивалентный уклон на расчетном направлении;

α — отношение скорости начала торможения к ходовой скорости (0,80–0,96);

$K_{\text{ост}}$ — число остановок поезда.

Приведенная стоимость 1 поезд-час любого пассажирского поезда (тг)

$$C_{\text{п-ч}} = \alpha_l C_{\text{л-ч}} + \beta_l C_{\text{бр-ч}}^{\text{л}} + \beta_n C_{\text{бр-ч}}^{\text{н}} m + C_{\text{пасс-ч}} a_n + m C_{\text{в-ч}}, \quad (3)$$

где: $C_{\text{л-ч}}$, $C_{\text{в-ч}}$ — приведенная стоимость соответственно 1 локомотиво-час и 1 вагоно-час, тг;

$C_{\text{бр-ч}}^{\text{л}}$, $C_{\text{бр-ч}}^{\text{н}}$ — стоимость 1 час работы соответственно локомотивной бригады и бригады проводников, тг;

$C_{\text{пасс-ч}}$ — стоимость 1 пас-час, тг;

m — число вагонов в составе поезда;

α_l , β_l , β_n — коэффициенты, учитывающие время вне поездной работы, соответственно локомотива, локомотивной бригады и бригады проводников.

Нормативы стоимости, тыс. тг.

Стоимость 1 вагоно-час для вагонов:

Мягкого.....1,803

Купейного.....1,623

Плацкартного.....1,042

Вагона-ресторана.....0,860

Багажного.....0,851

Почтового.....0,851

Стоимость 1 час работы локомотивной бригады:

для электрической.....3,19

для тепловозной тяги.....2,98

Стоимость 1 бригадо-ч проводников.....0,54

Стоимость 1 пассажиро-ч.....0,10 — 0,15

Наивыгоднейшее значение ходовой скорости движения при заданном весе и расчетной населенности определяется минимальным значением функции (тг), которое может быть найдено графически для каждой композиции состава (Рис. 1). Оптимальный вес — минимальными приведенными затратами, приходящимися на одного пассажира.

$$F = \left\{ (P + Q)(\omega_0 + i_3) 10^{-3} L + 3,8(P + Q)(\alpha v_x)^2 10^{-6} K_{ост} \right\} C_{м-км} + \frac{L}{\beta_m v_x} C_{п-ч}, \quad (4)$$

Полученные вес и скорость проверяют по ряду требований.

1 Соответствие мощности заданного локомотива по условию трогания с места

$$Q = \frac{F_{mp}}{\omega_{mp} + i_p} - P, \quad (5)$$

где: F_{mp} — сила тяги локомотива при трогании с места;

ω_{mp} — удельное сопротивление состава при трогании с места;

i_p — расчетный подъем.

Если вес поезда, полученный по формуле (5), больше определенного технико-экономическими расчетами, то заданный локомотив обеспечивает трогание с места пассажирского поезда на расчетном подъеме.

2 Соответствие мощности локомотива оптимальной ходовой скорости проверяют исходя из технико-экономических расчетов. Поезд должен иметь скорость на расчетном подъеме v_p не ниже, чем определенную соотношением $v_p = v_x / \kappa$, где значения κ принимаются в зависимости от типа профиля и серии локомотива.

$$N = \frac{F v_p}{367,2}.$$

Мощность локомотива (кВт)

Принимая во внимание, что $F = P(\omega'_0 + i_p) + Q(\omega''_0 + i_p)$, имеем

$$\left[P(\omega'_0 + i_p) + Q(\omega''_0 + i_p) \right] v_p = 367,2 N \quad (5)$$

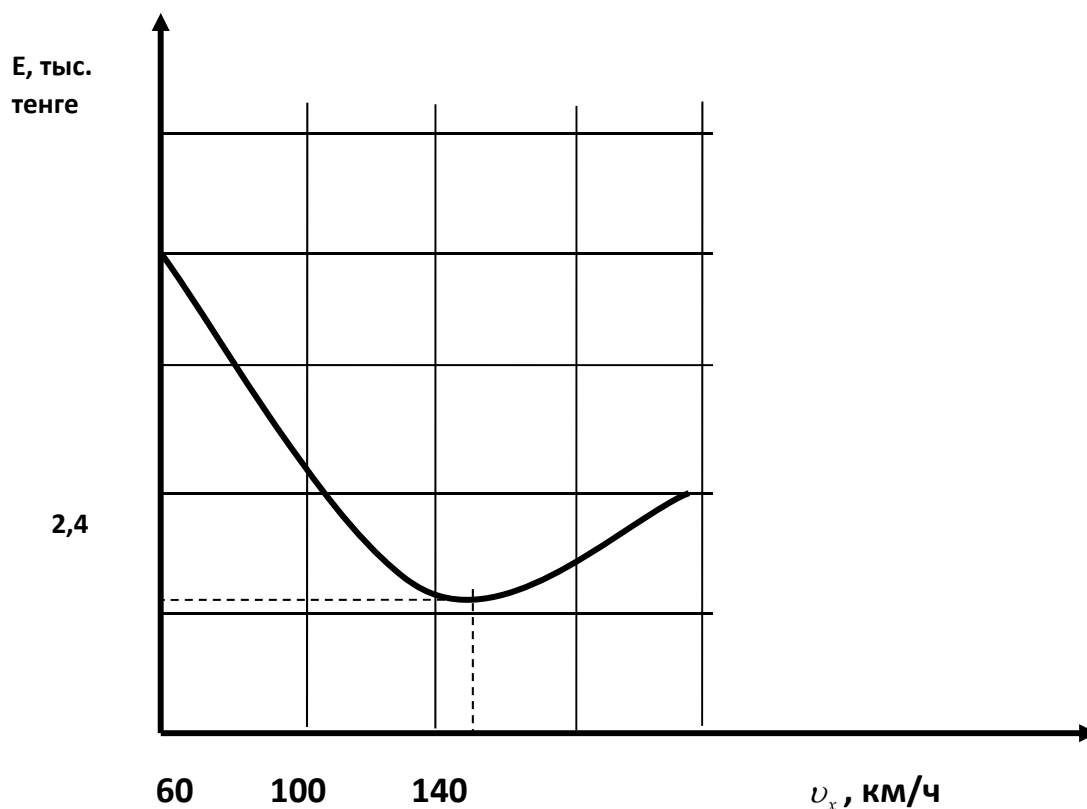


Рис. 1. Графическое определение оптимальной ходовой скорости движения пассажирского поезда при заданном весе (композиция)

В данном уравнении неизвестна скорость на расчетном подъеме, которая может быть найдена графоаналитическим способом, приведенным на Рисунке 2, горизонтальная прямая соответствует наличной мощности локомотива, (правая часть уравнения (5)); кривая — потребной мощности локомотива для реализации различных значений скорости на расчетном подъеме (левая часть уравнения (5)).

Если значение скорости на расчетном подъеме, определенное по условию v_x / κ , больше, чем полученное графоаналитическим способом, то заданный локомотив не может реализовать оптимальную ходовую скорость. Для дальнейших расчетов ходовая скорость принимается в соответствии с мощностью локомотива или другими ограничениями.

3 Согласно Инструкции по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР длина поезда должна соответствовать длине пассажирских платформ на станциях рассматриваемого направления.

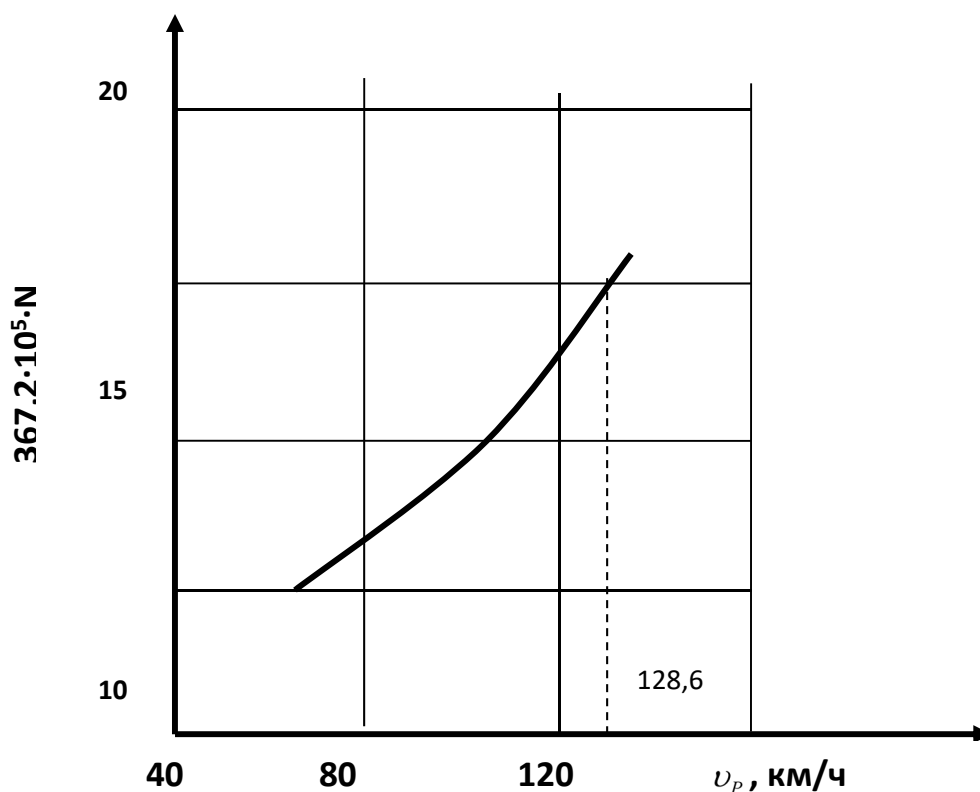


Рис. 2. Графоаналитическое определение скорости на расчетном подъеме

Для определения оптимальной скорости пассажирского поезда с локомотивом ЧС2 весом 120 т в условиях текущей эксплуатации железных дорог без выполнения реконструктивных мероприятий необходимы основные характеристики вагонов в составе поезда, приведенные в таблице 1, соответствуют справочнику (Колпаков, 1983: 114–239).

Для условий примера $C_{л-ч} = 3,54$ тыс. тг.; $C_{б-ч}^л = 3,19$ тыс. тг.; $C_{б-ч}^{np} = 0,54$ тыс. тг.; $C_{пасс-ч} = 0,10$ тыс. тг.; $L = 1000$ км; $K_{ост} = 50$; $C'_{т-км} = 0,063$ тыс. тг. Коэффициенты, учитывающие внепоездное время работы локомотива, локомотивной бригады и бригады проводников, соответственно равны $\alpha_l = 1,2$; $\beta_l = 1,2$; $\beta_n = 1,1$.

Результаты расчета временной и энергетической слагающих по формуле (4) приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Основные характеристики вагонов в составе поезда

Категория вагона	Число вагонов	Тара вагона, т	Нагрузка от пассажиров и ручной клади в вагоне, т	Суммарный вес вагонов, т	Населенность вагона, чел.	Суммарная населенность, чел.
Мягкий	1	59	3	62	32	32
Купейный	6	52	4	336	38	228
Некупейный	8	51	6	456	76	608
Багажный	1	45	12	57	-	-
Вагон-ресторан	1	56	3	59	-	-
итого	17	-	-	970	-	868

Таблица 2 - Результаты расчета временной и энергетической слагающих

Скорость, км/ч	60	100	140	180	220
Затраты, тыс. тг:					
энергетические	287	466	717	1042	1440
временные	2637	1582	1130	879	719
суммарные	2924	2048	1847	1921	2159

Оптимальное значение скорости движения равно 150 км/ч (Рис. 1).

Пассажиropотоки на направлении могут быть освоены различными способами, отличающимися числом, весом, скоростью движения поездов, мощностью тяговых средств, а, следовательно, временем, затрачиваемым пассажирами, и транспортными расходами. При определении оптимальных значений перечисленных параметров необходимо исходить из общего единого критерия оптимальности. Таким критерием являются приведенные сопоставимые народнохозяйственные затраты, включающие транспортные расходы и стоимость пассажиrop-часов.

Расчет каждого варианта — сложная и трудоемкая задача. Сложность заключается в том, что для решения необходимы такие исходные данные, как ходовая скорость и затрата работы на тягу поездов. Определить их можно, установив взаимосвязь между весом и скоростью поезда, а характер этой зависимости определяется в значительной степени профильными условиями участка.

В грузовом движении комплексным показателем, определяющим в сочетании с характеристикой профиля пути тягово-энергетические показатели движения поезда, является удельная мощность тяги, под которой понимается мощность в киловаттах, приходящаяся на 1 т веса поезда. Для экспериментальной проверки этого положения в пассажирском движении, установления характера и количественных параметров зависимости были выполнены тяговые расчеты способом по характеристикам профиля пути, то позволили учесть влияние инерции поезда и отдельных элементов профиля на тягово-энергетические показатели движения поездов. Тяговые расчеты выполнены для 6 поезде-участков общей протяженностью более 750 км с электрической и тепловозной тягой. Зависимость основного удельного сопротивления от скорости выражена формулой ВНИИЖТ: при нагрузке от оси вагона на рельсы в 12,5 т расчетный тормозной коэффициент принят для композиционных колодок 0,29. Тяговые расчеты выполнены для электровозов и тепловозов, двух режимов ведения поезда (с остановками и без остановок), четырех вариантов веса поезда (400, 600, 800, 1000 т). Хотя тягово-энергетические показатели движения определяются особенностями ведущего локомотива (типом двигателя, системой возбуждения тяговых двигателей и др.), с достаточной для сравнения вариантов точностью они могут быть определенным образом сгруппированы по видам тяги и типам профиля пути.

Обработка полученных данных позволила установить зависимости ходовой скорости, работы локомотива, потерь времени и энергии, возникающих при остановках, от удельной мощности локомотива на каждом типе профиля пути (Рис. 3-6), что значительно упростило трудоемкие вариантные тяговые расчеты для различных серий локомотивов и весов поездов. Удельная мощность локомотива влияет на ряд показателей, связанных с изменением веса и скорости, к числу которых относятся время нахождения пассажиров в пути; время использования технических средств транспорта для перевозки; время работы штата, обслуживающего поезд; количество работы локомотива, затрачиваемой на тягу; потери механической работы локомотива и времени, возникающие при остановках.

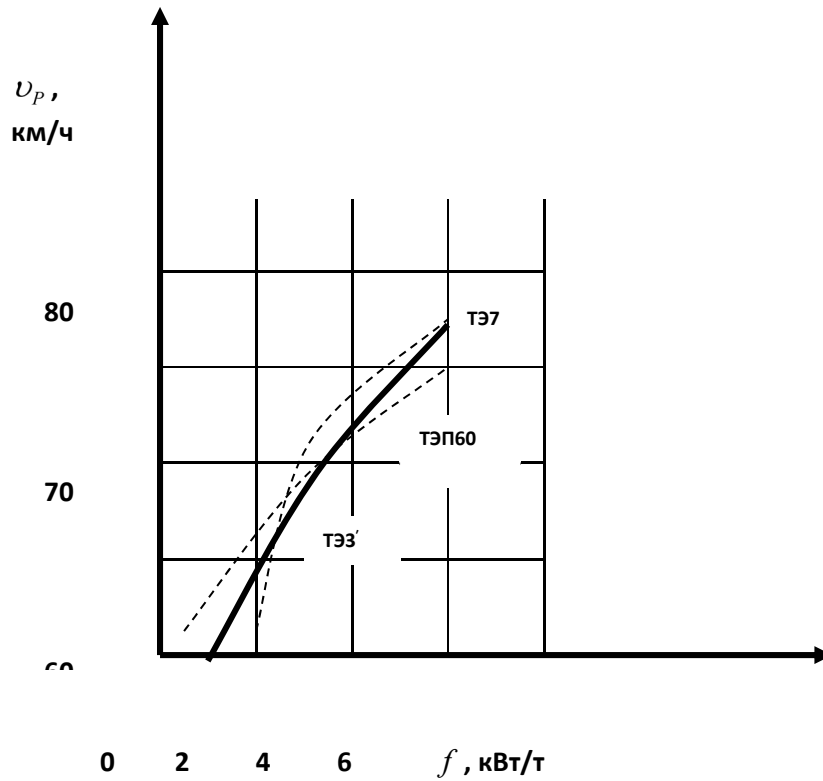


Рис. 3. Зависимость технической скорости от удельной мощности тепловоза (IV тип профиля пути)

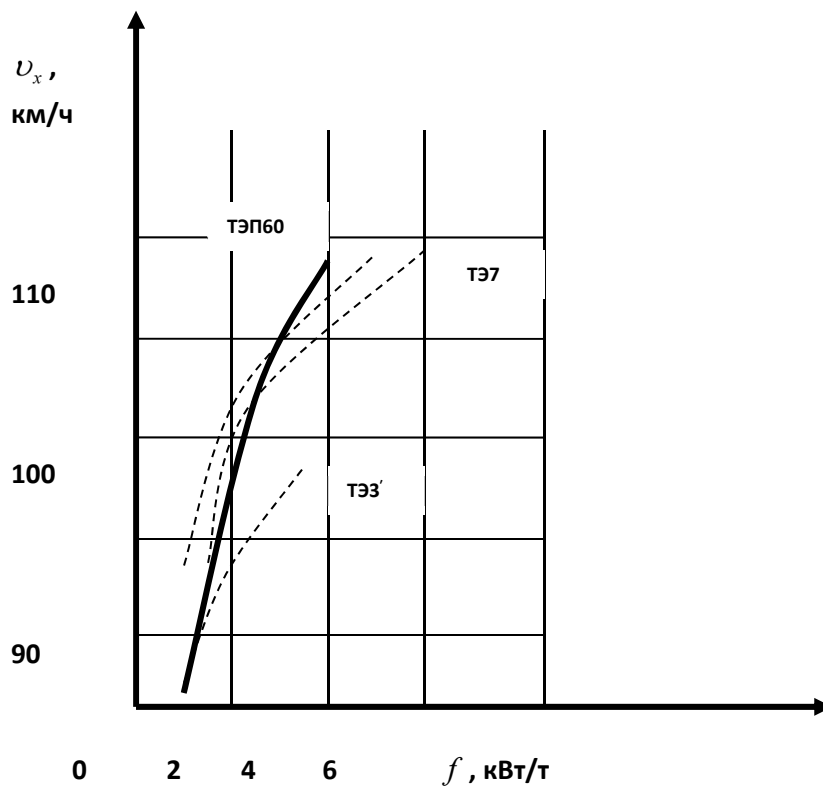


Рис. 4. Зависимость ходовой скорости от удельной мощности тепловоза (III тип профиля пути)

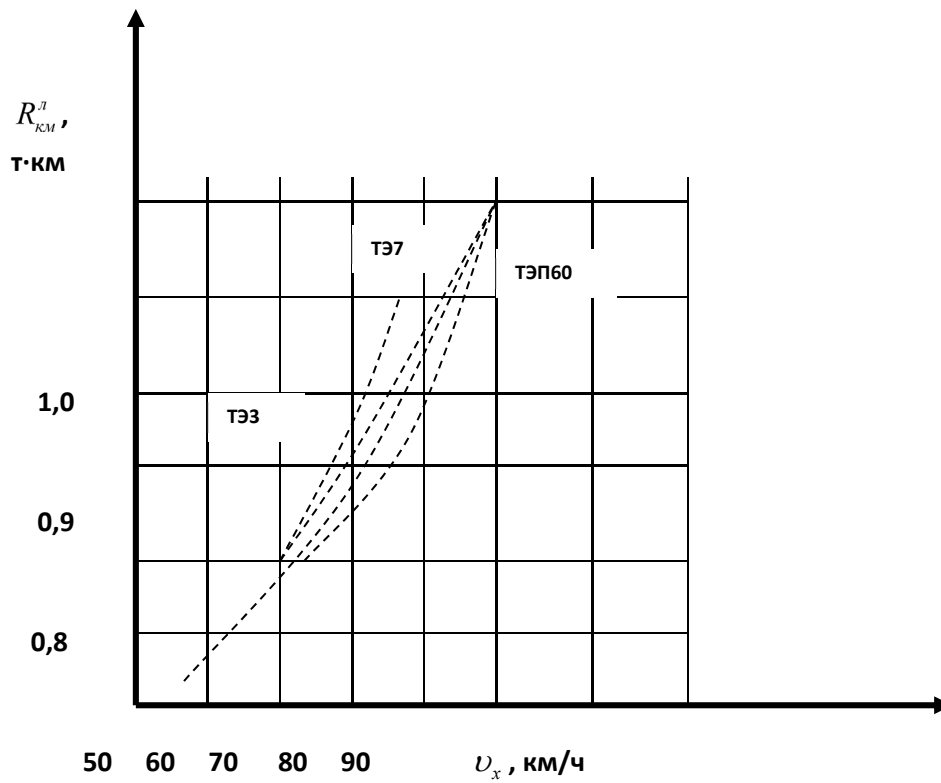


Рис. 5. Зависимость работы тепловоза от ходовой скорости (IV тип профиля пути)

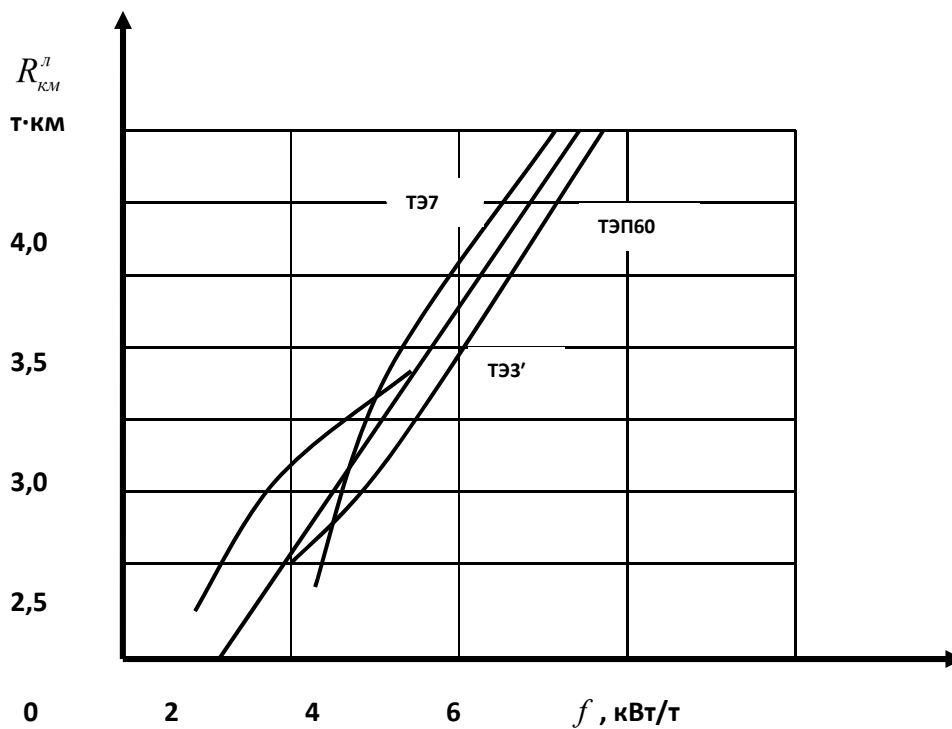


Рис. 6. Зависимость работы тепловоза, затрачиваемой на остановку, от его удельной мощности (II тип профиля пути)

Для того чтобы установить зависимость приведенных затрат от удельной мощности, рассмотрим их величину на измеритель 1000 пассажиро-км:

$$e = 10^{-3} \left\{ \frac{C_{\text{пасс-ч}}}{\beta_m v_x} + \frac{1}{q_m \gamma} \left(\frac{1}{\beta_m v_x} + t_{\text{осн}} + t_{\text{об}} \right) C_{\text{в-ч}} + \frac{1}{m v_m \gamma q_m} (\alpha_l C_{\text{л-ч}} + \beta_l C_{\text{б-ч}}^I + \beta_n C_{\text{б-ч}}^II) \right\} + \frac{C_{\text{б-ч}}^n}{\beta_m v_x \gamma q_m} + \frac{R_{100}^{\text{км}} C_{\text{т-км}}}{\gamma 100} + \frac{r C_{\text{т-км}}}{\gamma l_{\text{ср}}} \quad (6)$$

где: $C_{\text{пасс-ч}}$ — стоимость 1 пас-ч, тг;
 γ — число мест, приходящееся на 1 т тары вагона;
 $t_{\text{осн}}; t_{\text{об}}$ — время простоя состава в пунктах прицепки и оборота в соответствии с расписанием движения, час;

$\alpha_l, \beta_l, \beta_n$ — коэффициенты, учитывающие внепоездное время работы локомотива, локомотивной бригады и бригады проводников;

m — число вагонов в составе;

v_m — маршрутная скорость, км/ч ($v_m = \beta_m v_x$);

q_m — тара вагона, т;

$C_{\text{в-ч}}$ — стоимость 1 вагоно-ч, тг;

$C_{\text{б-ч}}^I, C_{\text{б-ч}}^{II}$ — стоимость работы соответственно локомотивной бригады и бригады проводников, тг;

$C_{\text{л-ч}}$ — стоимость 1 локомотиво-ч, тг;

$R_{100}^{\text{км}}$ — затрата работы локомотива на 1 км пути на каждые 100 т веса поезда (с учетом нагрузки от пассажиров и ручной клади);

$C_{\text{т-км}}$ — стоимость 1 т-км работы локомотива, тг;

$l_{\text{ср}}$ — среднее расстояние между остановками поездов на станциях, км;

γ — потери работы локомотива при остановке, ткм/т.

В приведенной формуле ходовая скорость и затраты работы зависят от одного показателя — удельной мощности локомотива. Однако аналитические зависимости ходовой скорости и работы от удельной мощности достаточно сложны, поэтому затраты определены при различных значениях удельной мощности и полученные расчетные точки аппроксимированы выражением

$$e = af^2 - bf + c,$$

где a, b, c — коэффициенты, зависящие от мощности тяговых средств и типа профиля пути (таблица 3).

Таблица 3 - Коэффициенты, зависящие от мощности тяговых средств и типа профиля пути

Тип профиля пути	Коэффициенты и степень точности	Номинальная мощность, кВт				
		2000	3000	4000	5000	6000
I	a	0,01522	0,01472	0,01694	0,01624	0,01628
	b	0,07947	0,08329	0,09499	0,09313	0,09619
	c	2,80109	2,79640	2,80824	2,80136	2,80602

	%	0,5021	0,5157	0,4801	0,5043	0,4426
II	a	0,01776	0,01681	0,01904	0,01874	0,01875
	b	0,09794	0,10314	0,11589	0,11620	0,12104
	c	3,11495	3,10991	3,12128	3,11924	3,12596
	%	0,6530	0,6895	0,6462	0,6467	0,9282
III	a	0,02231	0,02188	0,02389	0,02364	0,02339
	b	0,15753	0,16216	0,17281	0,17391	0,17401
	c	3,23536	3,23227	3,24202	3,24202	3,23769
	%	0,5779	0,5265	0,5253	0,5334	0,5308
IV	a	0,00578	0,00539	0,00737	0,00716	0,00709
	b	0,00853	0,00321	0,00719	0,00885	0,01023
	c	2,53833	2,53657	2,54616	2,54528	2,54560
	%	0,2937	0,2701	0,2975	0,2853	0,3108

Установленная зависимость затрат от удельной мощности локомотива дает возможность аналитически решить ряд задач рационального освоения пассажиропотока, а именно определить:

- оптимальную удельную мощность локомотива на каждом типе, профиля пути, а, следовательно, и наиболее выгодную ходовую скорость движения;
- целесообразную мощность локомотива при заданном варианте плана формирования;
- размеры движения и пункты обращения поездов.

В общем виде затраты, связанные с освоением расчетных пассажиропотоков на направлении с п-опорными станциями (участки с различными профильными условиями), составляют

$$E = \gamma 10^{-3} \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=\phi}^{\xi} x_j \left(f_j^2 \sum_{i=R}^{\omega-j} \alpha_i L_i - f_j \sum_{i=k}^{\omega-j} b_i L_i + \sum_{i=k}^{\omega-j} C_i L_i \right) \left(\frac{N}{f_j} - P \right), \quad (7)$$

где: N — мощность локомотива, кВт;

P — вес локомотива, т;

f_j — удельная мощность локомотива;

L_i — длина i -го участка, км;

x_j — число поездов сообщения j .

$$\left. \begin{aligned} \xi &= nk - \frac{1}{2}(k^2 + k) \\ \phi &= (2n - k) \frac{k-1}{2} + 1 \\ \omega &= nk - \frac{1}{2}(k^2 - k) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система ограничений, обеспечивающая соответствие общего пассажиропотока, следующего по участку, числу предложенных мест для участка k , имеет вид

$$\sum_{j=\psi}^{\xi} \gamma \left(\frac{N}{f_j} - P \right) x_j = \sum_{j=\psi}^{\xi} A_j, \quad (9)$$

где: A_j — расчетный пассажиропоток сообщения j .

Чтобы определить оптимальные значения переменных $x_1, x_2, \dots, x_j, f_1, f_2, \dots, f_j$, необходимо найти минимум затрат при заданных ограничениях, т. е. решить задачу на условный экстремум функции многих переменных. Воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Составим вспомогательную функцию

$$F = E + \lambda_k \left[\sum_{j=\psi}^{\xi} \gamma \left(\frac{N}{f_j} - P \right) x_j - \sum_{j=\psi}^{\xi} A_j \right], \quad (10)$$

(λ_k — множитель Лагранжа). Найдем j частных производных по f_j и по x_j от функции F и приравняем их нулю. Эти уравнения совместно с $(n - 1)$ уравнениями ограничений образуют систему, из которой можно определить значения искоемых переменных. Применение этого метода рассмотрим на направлении с четырьмя опорными станциями. Введем новую переменную

$$\gamma_j \left(\frac{N}{f_j} - P \right) = u_j \quad (11)$$

В этом случае выражение затрат принимает вид

$$\begin{aligned} E_4 = 10^{-3} & \left[u_1 \left(f_1^2 \sum_1^3 a_i L_i - f_1 \sum_1^3 b_i L_i + \sum_1^3 c_i L_i \right) + u_2 \left(f_2^2 \sum_1^2 a_i L_i - f_2 \sum_1^2 b_i L_i + \sum_1^2 c_i L_i \right) + \right. \\ & + u_3 \left(f_3^2 a_1 L_1 - f_3 b_1 L_1 + c_1 L_1 \right) + u_4 \left(f_4^2 \sum_2^3 a_i L_i - f_4 \sum_2^3 b_i L_i + \sum_2^3 c_i L_i \right) + \\ & \left. + u_5 \left(f_5^2 a_2 L_2 - f_5 b_2 L_2 + c_2 L_2 \right) + u_6 \left(f_6^2 a_3 L_3 - f_6 b_3 L_3 + c_3 L_3 \right) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &U_1 + U_2 + U_3 - A_{1-4} - A_{1-3} - A_{1-2} = 0; \\
 &U_4 + U_5 + U_2 + U_1 - A_{1-4} - A_{1-3} - A_{2-4} - A_{2-3} = 0; \\
 &U_1 + U_4 + U_6 - A_{1-4} - A_{2-4} - A_{3-4} = 0; \\
 &\frac{dF}{df_1} = \left(2f_1 \sum_1^3 a_i L_i - \sum_1^3 b_i L_i \right) u_1 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_2} = \left(2f_2 \sum_1^2 a_i L_i - \sum_1^2 b_i L_i \right) u_2 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_3} = (2f_3 a_1 L_1 - b_1 L_1) U_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_4} = \left(2f_4 \sum_2^3 a_i L_i - \sum_2^3 b_i L_i \right) U_4 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_5} = (2f_5 a_2 L_2 - b_2 L_2) U_5 = 0; \\
 &\frac{dF}{df_6} = (2f_6 a_3 L_3 - b_3 L_3) U_6 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_1} = \left(f_1^2 \sum_1^3 a_i L_i - f_1 \sum_1^3 b_i L_i + \sum_1^3 c_i L_i \right) 10^{-3} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_2} = \left(f_2^2 \sum_1^2 a_i L_i - f_2 \sum_1^2 b_i L_i + \sum_1^2 c_i L_i \right) 10^{-3} + \lambda_2 + \lambda_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_3} = (f_3^2 a_1 L_1 - f_3 b_1 L_1 + c_1 L_1) 10^{-3} + \lambda_1 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_4} = \left(f_4^2 \sum_2^3 a_i L_i - f_4 \sum_2^3 b_i L_i + \sum_2^3 c_i L_i \right) 10^{-3} + \lambda_2 + \lambda_3 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_5} = (f_5^2 a_2 L_2 - f_5 b_2 L_2 + c_2 L_2) 10^{-3} + \lambda_2 = 0; \\
 &\frac{dF}{du_6} = (f_6^2 a_3 L_3 - f_6 b_3 L_3 + c_3 L_3) 10^{-3} + \lambda_3 = 0.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Полагая, например, что значения u_1, u_2, u_3 отличны от нуля, найдем, что

$$f_1 = \frac{\sum_1^3 b_i L_i}{2 \sum_1^3 a_i L_i}; f_2 = \frac{\sum_1^2 b_i L_i}{2 \sum_1^2 a_i L_i}; f_3 = \frac{b_1 L_1}{2 a_1 L_1}, \tag{14}$$

а, следовательно,

$$\lambda_1 = \left[\frac{b_1 L_1}{4 a_1 L_1} - c_1 L_1 \right] 10^{-3};$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2 &= \left[\frac{\left(\sum_1^2 b_i L_i \right)^2}{4 \sum_1^2 a_i L_i} - \frac{b_1 L_1}{4 a_1 L_1} - c_2 L_2 \right] 10^{-3} \\ \lambda_3 &= \left[\frac{\left(\sum_1^3 b_i L_i \right)^2}{4 \sum_1^3 a_i L_i} - \frac{\sum_1^2 b_i L_i}{4 \sum_1^2 a_i L_i} - c_3 L_3 \right] 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Подставляя $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в последние три уравнения системы (8), определим f_4, f_5, f_6 , отличные от значений, при которых выражение в скобках последних трех производных по f_j равно нулю. Следовательно, нулю равны значения u_4, u_5, u_6 . В общем случае решением системы являются $n - 1$ переменных x_j , отличных от нуля, а соответствующие им удельные мощности

$$f_j = \frac{\sum_{i=k}^{\omega-j} b_i L_i}{2 \sum_{i=k}^{\omega-j} a_i L_i} \quad (16)$$

Численные значения x_j находятся из системы ограничений. Расчеты всех возможных сочетаний позволяют определить стационарные точки, выбрать тот вариант, при котором функция затрат имеет наименьшее значение. Однако, определяя набор переменных x_j следует иметь в виду, что все значения должны быть положительными.

Если на направлении, включающем три участка, расчетные пассажиропотоки с первой станции соответственно на четвертую, третью, вторую равны $A_1 = 562; A_2 = 1025; A_3 = 1030$; со второй на четвертую и третью $A_4 = 105; A_5 = 460$; с третьей на четвертую $A_6 = 30; N = 4000m$. Первый участок длиной 200 км относится к I типу профиля пути по классификации (Азар, 1973: 56–100), второй протяжением 200 км — ко II, третий длиной 100 км — к III. Требуется определить размеры движения и пункты обращения поездов, которые обеспечат освоение расчетных пассажиропотоков с минимумом затрат. Находим значения коэффициентов:

$$a_1 = 0,01694; b_1 = 0,09499; c_1 = 2,80824;$$

$$a_2 = 0,01904; b_2 = 0,11589; c_2 = 3,12128;$$

$$a_3 = 0,02389; b_3 = 0,17281; c_3 = 3,24202.$$

Определим значения удельных мощностей для каждого поезда по формуле (1):

$$f_1 = 3,11; f_2 = 2,93; f_3 = 2,79; f_4 = 3,27; f_5 = 3,03; f_6 = 3,62.$$

Рассматривая возможные варианты сочетаний отличных от нуля значений x_j , число которых в данном примере равно 10, подставляем их в систему ограничений. Решением системы являются только два набора положительных значений: первый при

$x_1 = 0,434; x_2 = 0,848; x_3 = 0,290$ определяет наличие поездов с первой станции соответственно на четвертую, третью, вторую; второй при $x_1 = 0,434; x_3 = 1,094; x_5 = 0,880$ выражает потребность в поездах соответственно с первой на четвертую, с первой на вторую и со второй на третью. Однако второй набор не удовлетворяет условиям обеспечения беспересадочного сообщения в пределах направления и, следовательно, должен быть исключен из рассмотрения. Оптимальным в данном случае является вариант $x_1 = 0,434; x_2 = 0,848; x_3 = 0,290$.

Дробные значения неизвестных показывают, что при данном типе локомотива поезда целесообразно отправлять не ежедневно, а в соответствии с колебанием пассажиропотока по дням. Полученные размеры движения установлены исходя из минимума затрат, включающих транспортные расходы, а также расходы, связанные со временем нахождения пассажиров в пути следования.

Из приведенного расчета следует вывод о том, что поезда, вводимые в обращение, должны быть оптимальной удельной мощности, учитывающей особенности участков, и число поездов определяется при заданном значении удельной мощности для каждого назначения.

Заключение

В настоящей работе была поставлена цель – исследовать и определить оптимальные параметры формирования и движения пассажирских поездов с целью повышения экономической эффективности перевозок и улучшения качества обслуживания пассажиров. Для достижения данной цели была разработана методологическая база исследования, включающая: сбор и анализ исходных данных о пассажирских составах, локомотивах и железнодорожной инфраструктуре; формирование вариантов состава поезда; проведение технико-экономических расчетов; применение графоаналитического метода и математического моделирования; а также проведение сравнительного анализа полученных результатов с нормативными требованиями и техническими ограничениями.

Использование комплексного подхода позволило всесторонне изучить влияние различных факторов на эффективность движения пассажирских поездов. Применение методов графоаналитического моделирования и математического анализа позволило выявить оптимальные соотношения количества и типов вагонов, веса состава и скорости движения. Проведенные расчеты показали, что выбор оптимальной композиции состава позволяет снизить затраты на тягу локомотива, уменьшить эксплуатационные расходы на вагоны и персонал, а также повысить комфорт пассажиров за счет рационального распределения категорий вагонов по составу.

Полученные результаты подтвердили выдвинутую гипотезу о том, что оптимизация состава и режима движения пассажирских поездов возможна при системном анализе технико-экономических показателей и математическом моделировании с учетом действующих ограничений. В частности, выявлено, что для поездов протяженностью до 800 км оптимальный состав включает определенное соотношение мягких, купейных и плацкартных вагонов, что обеспечивает максимальную заполняемость при минимальных эксплуатационных затратах. Анализ зависимости затрат от массы состава и скорости движения показал наличие критических точек, при которых дальнейшее увеличение числа вагонов или скорости движения приводит к существенному росту расходов и снижению экономической эффективности.

В ходе исследования было выявлено несколько новых закономерностей, ранее не отраженных в существующих публикациях. Во-первых, оптимальная скорость движения поезда напрямую зависит от профиля пути и мощности локомотива, а не только от числа вагонов. Во-вторых, распределение вагонов по категориям существенно влияет на среднюю скорость движения и энергозатраты на участке, особенно при наличии промежуточных остановок. Эти результаты позволяют уточнить существующие рекомендации по

формированию составов пассажирских поездов и внесли вклад в развитие научного знания в области железнодорожного транспорта.

Практическое значение работы заключается в возможности использования полученных результатов для планирования пассажирских перевозок, повышения экономической эффективности эксплуатации железнодорожного подвижного состава и улучшения качества обслуживания пассажиров. Предложенные методы и подходы могут быть внедрены при проектировании новых поездов, обновлении локомотивного парка, а также при планировании расписаний с учетом пассажиропотоков на различных направлениях. Использование оптимизированного состава и режима движения позволит снизить эксплуатационные расходы, увеличить пропускную способность железнодорожных линий и сократить время перевозки пассажиров.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение модели оптимизации с учетом сезонных колебаний пассажиропотока, внедрение методов прогнозирования спроса и интеграцию систем автоматического управления движением поездов. Также возможна адаптация разработанных подходов для высокоскоростных пассажирских поездов и смешанных перевозок пассажиров и грузов, что позволит комплексно повысить эффективность работы железнодорожного транспорта.

Таким образом, проведенное исследование позволило подтвердить истинность выдвинутого автором тезиса о возможности оптимизации состава и движения пассажирских поездов с использованием системного анализа и математического моделирования. Полученные результаты вносят новый вклад в развитие научного знания в области транспортного строительства и эксплуатации железнодорожного подвижного состава и создают основу для практического внедрения оптимизированных решений в сфере пассажирских перевозок.

ЛИТЕРАТУРА

- Правдин, 1990 — Правдин Н.В., Рябуха Л.С., Лукашев В.И. Технология работы вокзалов и пассажирских станций. — М.: Транспорт. — 1990. — С. 319–320. [Russ.]
- Колпаков, 1983 — Колпаков В.С., Шубко В.Г. Совершенствование пассажирских перевозок. — М.: Транспорт. — 1983. — 456 с. [Russ.]
- Азар, 1973 — Азар В.И., Поляк С.В. Транспорт и туризм. — М.: Транспорт. — 1973. — 159 с. [Russ.]
- Дмитренко, 2006 — Дмитренко А.В., Терзи В.И., Кузьмин А.В., Жуковский Ю.Н., Раннев А.И. Эффективные пути повышения населенности составов пригородных электропоездов перевозочным процессом в транспортных системах // Промышленный транспорт Казахстана. — Алматы. — 2006. — № 1 (7). — С. 34–38. [Russ.]
- Вахитова, 2006а — Вахитова Л.В., Телюк Н.В. Математическая модель определения оптимальных вариантов плана формирования пассажирских поездов на основе экономических факторов // Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт Евразии: взгляд в XXI век». — Т. 1. — Алматы. — 2006. — С. 96–98. [Russ.]
- Вахитова, 2006б — Вахитова Л.В. Исследование процесса организации пассажирских перевозок с применением методов прогнозирования // Поиск. — 2006. — № 2. — С. 294–298. [Russ.]
- Кобдиков, 2007 — Кобдиков М.А., Вахитова Л.В. Экономическое обоснование выбора оптимального формирования пассажирских поездов на железнодорожном полигоне с учетом резерва пропускной способности // Поиск. — 2007. — № 4. — С. 263–266. [Russ.]
- Касымов, 2006 — Касымов Е.К., Вахитова Л.В. Определение оптимального количества пассажирских поездов по видам сообщения // Вестник КазАТК. — 2006. — № 1. — С. 49–52. [Russ.]
- Тихомиров, 1979 — Организация движения на железнодорожном транспорте / под ред. И.Г. Тихомирова. — Минск: Высшая школа, 1979. — 349 с. [Russ.]
- Мустапаева, 2006 — Мустапаева А.Д., Вахитова Л.В. Пути совершенствования пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте Республики Казахстан // Вестник КазАТК. — 2006. — № 2. — С. 75–81. [Russ.]

REFERENCES

- Pravdin 1990 — Pravdin, N.V., Ryabukha, L.S., Lukashev, V.I. (1990). Tekhnologiya raboty vokzalov i passazhirskikh stantsii [Technology of operation of railway stations and passenger terminals]. — Moscow: Transport. — 1990. — Pp. 319–320. [in Russ.]
- Kolpakov 1983 — Kolpakov, V.S., Shubko, V.G. (1983). Sovershenstvovanie passazhirskikh perevozk [Improvement of passenger transportation]. — Moscow: Transport. — 1983. — 456 p. [in Russ.]
- Azar 1973 — Azar, V.I., Polyak, S.V. (1973). Transport i turizm [Transport and tourism]. — Moscow: Transport. — 1973. — 159 p. [in Russ.]
- Dmitrenko 2006 — Dmitrenko, A.V., Terzi, V.I., Kuzmin, A.V., Zhukovskii, Yu.N., Rannev, A.I. (2006). Effektivnye puti povysheniya naselelnosti sostavov prigorodnykh elektropoezdov perevozochnym protsessom v transportnykh

sistemakh [Effective ways to increase occupancy of suburban electric train consists within the transportation process in transport systems]. // *Promyshlennyi transport Kazakhstana*. — Almaty. — 2006. — No. 1 (7). — Pp. 34–38. [in Russ.]

Vakhitova 2006a — Vakhitova, L.V., Telyuk, N.V. (2006). Matematicheskaya model opredeleniya optimalnykh variantov plana formirovaniya passazhirskikh poezdov na osnove ekonomicheskikh faktorov [Mathematical model for determining optimal variants of passenger train formation plans based on economic factors]. // *Proc. of the IV Int. Sci.-Pract. Conf. "Transport Evrazii: vzglyad v XXI vek"*. — Vol. 1. — Almaty. — 2006. — Pp. 96–98. [in Russ.]

Vakhitova 2006b — Vakhitova, L.V. (2006). Issledovanie protsessa organizatsii passazhirskikh perezovok s primeneniem metodov prognozirovaniya [Study of the process of organizing passenger transportation using forecasting methods]. // *Poisk*. — 2006. — No. 2. — Pp. 294–298. [in Russ.]

Kobdikov 2007 — Kobdikov, M.A., Vakhitova, L.V. (2007). Ekonomicheskoe obosnovanie vybora optimalnogo formirovaniya passazhirskikh poezdov na zheleznodorozhnom poligone s uchedom rezerva propusknoi sposobnosti [Economic justification for selecting optimal passenger train formation on a railway network considering capacity reserves]. // *Poisk*. — 2007. — No. 4. — Pp. 263–266. [in Russ.]

Kasymov 2006 — Kasymov, E.K., Vakhitova, L.V. (2006). Opredelenie optimalnogo kolichestva passazhirskikh poezdov po vidam soobshcheniya [Determination of the optimal number of passenger trains by types of service]. // *Vestnik KazATK*. — 2006. — No. 1. — Pp. 49–52. [in Russ.]

Tikhomirov 1979 — Tikhomirov, I.G. (Ed.). (1979). Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Organization of railway traffic]. — Minsk: Vysshaya shkola. — 1979. — 349 p. [in Russ.]

Mustapaeva 2006 — Mustapaeva, A.D., Vakhitova, L.V. (2006). Puti sovershenstvovaniya passazhirskikh perezovok na zheleznodorozhnom transporte Respubliki Kazakhstan [Ways to improve passenger transportation on the railway transport of the Republic of Kazakhstan]. // *Vestnik KazATK*. — 2006. — No. 2. — Pp. 75–81. [in Russ.]

EXPERIMENTAL STUDY OF SHORT-TERM COMPRESSIVE STRENGTH OF COMPOSITE REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH HIGH-STRENGTH REINFORCEMENT

P.Yu. Dzekanov¹, Haseeb Rehman²

¹International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

²Government Yangtze University of Engineering & Technology, Hubei, China.

E-mail: dzekanov.pavel@mtgu.edu.kz

Pavel Dzekanov — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: dzekanov.pavel@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-9729-113X>;

Haseeb Rehman — Senior Lecturer, Government Yangtze University of Engineering & Technology, Hubei, China

E-mail: Sahtohaseeb4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0311-8066>.

© P.Yu. Dzekanov, Haseeb Rehman

Abstract. The article presents an experimental study of the short-term compressive resistance of composite reinforced concrete columns with high-strength longitudinal reinforcement of class At-V. The relevance of the study is due to the lack of data on the behavior of composite columns made from concretes of different ages and deformabilities under central and eccentric loading. The aim of the research was to establish the patterns of change in short-term compressive resistance depending on column slenderness, branch joint conditions, and longitudinal force eccentricity. To achieve this, physical experiments were conducted on six composite columns with different branch configurations, accompanied by control cubes and prisms, with deflections and longitudinal deformations of reinforcement measured using strain gauges and dial indicators. Results demonstrated that differences in the deformability of branch concretes lead to uneven stress distribution, increased reinforcement deformability, and changes in failure modes. The study clarified mechanisms of interaction between concrete and high-strength reinforcement in composite sections and highlighted the influence of eccentricity and branch joint conditions on column load-bearing capacity. The practical significance lies in the applicability of the results for the design of precast-monolithic and strengthened reinforced concrete columns in construction and building reconstruction.

Keywords: composite columns, reinforced concrete, high-strength reinforcement, compression, eccentricity, experimental study

For citation: P.Yu. Dzekanov, Haseeb Rehman (2026). Haseeb Rehman. Experimental Study of Short-Term Compressive Strength of Composite Reinforced Concrete Columns with High-Strength Reinforcement // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 89. Pp. 151–170. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.89.01.008> (In Eng.).

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

**ЖОҒАРЫ БЕРІКТІКТІ АРМАТУРАСЫ БАР ҚҰРАМА ТЕМІР-БЕТОН
БАҒАНДАРДЫҢ ҚЫСҚА МЕРЗІМДІ ҚЫСУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН
ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ**

П.Ю. Дзеканов^{1}, Хасиб Рехман²*

¹Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай.

E-mail: dzekanov.pavel@mtgu.edu.kz

Павел Дзеканов — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: dzekanov.pavel@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-9729-113X>;

Хасиб Рехман — аға оқытушы, Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай

E-mail: Sahtohaseeb4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0311-8066>.

© П.Ю. Дзеканов, Хасиб Рехман

Аннотация. Мақалада Ат-V класты жоғары беріктікке ие ұзындығына бағытталған арматурамен жасалған құрамалы темір-бетон бағандардың қысқа мерзімді қысылу беріктігін тәжірибелік зерттеу көрсетілген. Зерттеудің өзектілігі әр түрлі жас және деформациялық қасиеттерге ие бетондардан тұратын құрамалы бағандардың орталық және эксцентрикалық жүктемелерге жауап беру деректерінің жеткіліксіздігімен байланысты. Зерттеудің мақсаты бағанның иілгіштігі, тармақтардың қосылу шарттары және ұзындық күші эксцентриситетіне байланысты қысқа мерзімді қысылу беріктігінің өзгеру заңдылықтарын анықтау болды. Мақсатқа жету үшін әртүрлі конфигурациялы алты құрамалы бағандарда физикалық тәжірибелер жүргізілді, бақылау текшелері мен призмалары жасалды, арматураның ұзындығы бойынша деформациялары мен иілу шамалары тензометрлік және индикаторлық құралдар арқылы өлшенді. Нәтижелер көрсеткендей, тармақ бетондарының деформациялық қасиеттеріндегі айырмашылықтар деформациялардың тең бөлінбеуіне, арматура деформациясының артуына және бағандардың бұзылу сипатына әсер етеді. Зерттеу құрамалы қималарда бетон мен жоғары беріктік арматураның өзара әрекеттесу механизмдерін нақтылап, эксцентриситет пен тармақтардың қосылу шарттарының бағанның жүктеме көтеру қабілетіне әсерін көрсетті. Практикалық маңызы – нәтижелерді құрылыс және ғимараттарды реконструкциялау кезінде жинақталған-монолиттік және күшейтілген темір-бетон бағандарды жобалауда қолдану мүмкіндігі.

Түйін сөздер: құрамалы бағандар, темір-бетон, жоғары беріктік арматура, қысылу, эксцентриситет, тәжірибелік зерттеу

Дәйексөздер үшін: П.Ю. Дзеканов, Хасиб Рехман (2026). Хасиб Рехман. Жоғары беріктікті арматурасы бар құрама темір-бетон бағандардың қысқа мерзімді қысуға төзімділігін эксперименттік зерттеу // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 89. 151–170 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.89.01.008> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН С
ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРОЙ**

П.Ю. Дзеканов^{1}, Хасиб Рехман²*

¹Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

²Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, провинция Хубэй, Китай.

E-mail: dzekanov.pavel@mtgu.edu.kz

Павел Дзеканов — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: dzekanov.pavel@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-9729-113X>;

Хасиб Рехман — старший преподаватель, Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, провинция Хубэй, Китай

E-mail: Sahtohaseeb4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0311-8066>.

© П.Ю. Дзеканов, Хасиб Рехман

Аннотация. В статье представлено экспериментальное исследование кратковременного сопротивления сжатию составных железобетонных колонн с высокопрочной продольной арматурой класса Ат-V. Актуальность работы обусловлена недостаточностью данных о работе составных колонн, сформированных из бетонов различного возраста и деформативности, при воздействии центральных и внецентренных нагрузок. Цель исследования заключалась в установлении закономерностей изменения кратковременного сопротивления сжатию в зависимости от гибкости колонн, условий сопряжения ветвей и эксцентриситета продольной силы. Для достижения цели проведены физические эксперименты на шести составных колоннах с различной конфигурацией ветвей, контрольными кубами и призмами бетона, измерены прогибы и продольные деформации арматуры с использованием тензометрических и индикаторных приборов. Результаты показали, что различия в деформативных свойствах бетонов ветвей приводят к неравномерному распределению деформаций, увеличению деформативности арматуры и изменению характера разрушения колонн. Данные исследования позволили уточнить механизмы совместной работы бетона и высокопрочной арматуры в составных сечениях и выявить влияние эксцентриситета и условий сопряжения ветвей на несущую способность колонн. Практическая значимость работы состоит в возможности использования результатов при проектировании сборно-монолитных и усиленных железобетонных колонн в строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

Ключевые слова: составные колонны, железобетон, высокопрочная арматура, сжатие, эксцентриситет, экспериментальное исследование.

Для цитирования: П.Ю. Дзеканов, Хасиб Рехман (2026). Экспериментальное исследование кратковременного сопротивления сжатию составных железобетонных колонн с высокопрочной арматурой // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 89. Стр. 151–170. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.89.01.008> (На англ.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The development of contemporary construction practice is characterized by the progressive introduction of high-strength materials and by the refinement of design methods for reinforced concrete structures, which is particularly relevant to the design and strengthening of compressed elements such as columns and posts. Substantial contributions to the study of compressed reinforced concrete members with high-strength longitudinal reinforcement have

been made in the works of domestic and international researchers, who established the effectiveness of high-strength reinforcement in short and medium-slenderness columns (Chistyakov, 1981: 70–80; Riskind, 1982: 5–39; Mailyan et al., 1982: 47–56; Sheikh, 1982: 703–722).

At the same time, a review of the published literature indicates that the majority of experimental studies have addressed monolithic reinforced concrete columns, whereas the structural behavior of composite reinforced concrete elements formed from concretes of different ages, strengths, and deformabilities remains insufficiently investigated. Data on the short-term compressive resistance of medium-slenderness composite columns reinforced with high-strength non-prestressed At-V reinforcement under central and eccentric loading are particularly limited (Kalyaskin, 1999: 5–140; Khelifi, 1998: 6–179).

The relevance of the present study is further supported by the widespread use, in building reconstruction practice, of column strengthening methods based on the placement of monolithic reinforced concrete jackets, which results in composite cross-sections whose structural behavior differs fundamentally from that of monolithic elements (Onufriev, 1974: 96–103). The concurrent use of concretes of different compositions and ages, together with high-strength longitudinal reinforcement, leads to non-uniform strain and stress distributions that are not fully accounted for by existing analytical models.

Thus, notwithstanding the general interest in improving the load-bearing capacity of reinforced concrete columns, comprehensive experimental data are lacking that would permit an assessment of the influence of branch joint conditions, longitudinal force eccentricity, and differences in concrete deformability on the short-term compressive resistance of composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement. This gap defines the relevance and scientific novelty of the present study.

The object of investigation is composite reinforced concrete columns of medium slenderness.

The subject of investigation is the stress-strain state and load-bearing capacity of composite reinforced concrete columns with high-strength At-V longitudinal reinforcement under short-term central and eccentric compression.

The aim of the research is to experimentally establish the behavioral features and to determine the patterns governing changes in short-term compressive resistance of composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement as functions of slenderness, branch joint conditions, and longitudinal force eccentricity.

To achieve this aim, the following tasks were formulated:

- to conduct experimental studies of short-term compression of composite reinforced concrete columns under various load eccentricities;
- to determine the influence of differences in deformability characteristics of branch concretes on the distribution of strains in concrete and reinforcement;
- to investigate the development of lateral deflections and longitudinal reinforcement strains at all loading stages;
- to establish the failure mode and ultimate strains of high-strength reinforcement;
- to compare the experimental results with data from previously published studies.

The research methods comprise experimental testing of reinforced concrete specimens under short-term compression, measurement of concrete and reinforcement strains using strain-gauge and dial-indicator instruments, and analysis and processing of experimental data in accordance with applicable regulatory standards (GOST 12004–85; GOST 10180–90; GOST 18105–86).

The study is grounded in an experimental-analytical approach that makes it possible to identify the actual features of the composite behavior of concrete and high-strength reinforcement in composite cross-sections.

The hypothesis of the study holds that the presence of concretes of different ages and deformabilities within a column leads to non-uniform strain distribution and increased deformability of the reinforcement located in the cast-in-situ (monolithic) branch, which exerts a substantial influence on load-bearing capacity and on the failure mode of columns under short-term compression.

The scientific significance of the work consists in obtaining new experimental data on the behavior of composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement, thereby broadening understanding of the mechanisms governing their deformation and failure.

The practical significance lies in the possibility of using the research findings in the analysis and design of precast-monolithic and strengthened reinforced concrete columns in the construction and reconstruction of buildings and structures.

Materials and Methods.

The present study was designed to answer the following research questions:

– How do differences in deformability and strength characteristics of the branch concretes in composite reinforced concrete columns influence the stress-strain state under short-term compression?

– How do the load-bearing capacity and failure mode of composite columns with high-strength At-V longitudinal reinforcement change under central and eccentric loading?

– To what extent do branch joint conditions and the magnitude of longitudinal force eccentricity influence the distribution of strains in concrete and reinforcement?

The research hypothesis holds that the presence of concretes of different ages and deformabilities in composite cross-sections leads to non-uniform strain distribution and elevated deformability of the high-strength reinforcement in the cast-in-situ branch, thereby reducing the efficiency of the cross-section under eccentric compression and determining the specific failure characteristics of the columns.

The study was carried out in the following stages:

– review and synthesis of results from previously published experimental and theoretical work on short-term compressive resistance of reinforced concrete columns with high-strength reinforcement (Chistyakov, 1981: 70–80; Riskind, 1982: 5–39; Kalyaskin, 1999: 5–140);

– development of the experimental program and design of test specimens of composite reinforced concrete columns;

– fabrication of column specimens, control cubes and concrete prisms, and preparation of reinforcement test coupons;

– short-term testing of composite columns under central and eccentric compression;

– determination of strength and deformability characteristics of concrete and reinforcement;

– processing and analysis of experimental data and assessment of deformation and failure behavior.

The experimental material comprised data obtained from testing six composite reinforced concrete columns of medium slenderness, fabricated from conventional heavy-weight aggregate concrete and reinforced with high-strength non-prestressed At-V (A800) longitudinal reinforcement.

Each column consisted of two branches connected along their full length by steel ties. The combined cross-section was rectangular with dimensions $h \times b = 100 \times 120$ mm, at a specimen length of 1500 mm, yielding slenderness ratios in the range $\lambda = 44\text{--}52$.

The branches had different cross-sectional dimensions (100 x 60 mm and 120 x 50 mm) and were fabricated from concretes of different compositions and ages, thereby modeling the behavior of strengthened precast-monolithic reinforced concrete columns. The branches were joined with a time interval of approximately 135 days on average, which ensured a difference in the deformability characteristics of the branch concretes.

The longitudinal reinforcement of each branch comprised two bars of 12 mm diameter, class At-V, while the transverse reinforcement consisted of steel ties made from 4 mm diameter wire of class Bp-I at a spacing of 100 mm.

To determine concrete properties, control cubes and prisms were fabricated simultaneously with the main specimens; for each concrete batch, no fewer than five cubes and three prisms were tested, thereby ensuring the statistical reliability of the data obtained (GOST 10180–90).

The primary research method was a physical experiment involving short-term compressive testing of reinforced concrete columns.

Short-term tests were performed in a purpose-built rigid steel portal frame using a hydraulic jack. Loading was applied in increments, with instrument readings recorded at each loading stage.

Tests were carried out under central and eccentric compression with relative eccentricities l_0/h ranging from 0 to 0.208. Eccentricities were applied both along the branch joint interface and in the perpendicular direction, enabling an assessment of the influence of joint conditions on column behavior.

Longitudinal reinforcement strains were measured by electrical resistance strain gauges bonded to the reinforcing bars prior to concreting, and were additionally monitored by dial-type indicators. Lateral deflections were measured by Maksimov-type deflectometers.

Strength and deformability characteristics of concrete were determined by standard methods on control specimens in accordance with GOST 10180–90 and GOST 18105–86. Tensile testing of reinforcement specimens was carried out in conformity with GOST 12004–85.

To study the deformability of concrete under sustained loading, spring-loaded creep frames were used, enabling the determination of creep and shrinkage strains necessary for assessing the influence of rapidly developing creep on the behavior of composite columns under short-term loading.

The methodological novelty of the study consists in the comprehensive experimental investigation of medium-slenderness composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement, fabricated from concretes of different ages and deformabilities, under various eccentric loading configurations. In contrast to previously published works, the present study gives particular attention to the compatibility of branch deformations and to the distribution of strains in the high-strength reinforcement, thereby enabling a more complete assessment of failure mechanisms and reserves of load-bearing capacity in such structures.

Results and Discussion.

Experimental investigations into the short-term compressive resistance of composite reinforced concrete members fabricated from conventional heavy-weight aggregate concrete with high-strength At-V (A800) longitudinal reinforcement were conducted and the results were analyzed at the Department of Transport Construction, Bridges and Tunnels of the International University of Transport and Humanities. The influence of the magnitude and direction of longitudinal force eccentricity on column strains and load-bearing capacity was examined.

The influence of the aforementioned factors was studied at slenderness values in the range $\lambda = 44$ to $\lambda = 52$.

In selecting the slenderness values, account was taken of the fact that, by the time the present research commenced, a substantial body of experimental data had already been accumulated on short-term (predominantly) and sustained compressive resistance of short reinforced concrete columns, and the practical effectiveness of high-strength longitudinal reinforcement in such elements had been firmly established. Reference is made primarily to the works of E.A. Chistyakov and his collaborators (Chistyakov, 1981: 70–80; Chistyakov, 1975: 15–127), B.Ya. Riskind (Riskind, 1982: 5–39), E.I. Gamayunov (Gamayunov, 1968: 26–39), and other investigators (Dovgalkzh, 1975: 15–137; Kalyaskin, 1999: 5–140; Khlifi, 1998: 6–179; Mailyan, 1982: 47–56; Frolov, 1988: 17; Sheikh, 1982: 703–722).

From a practical standpoint, the selected slenderness values of $\lambda = 52$ and $\lambda = 44$ may be regarded as representing the most favorable ratio between the cross-sectional dimensions and the length of compressed reinforced concrete members. In developing the experimental program, it was recognized that reliable data on columns with high-strength reinforcement at or close to these slenderness values were absent from the literature. As is well known, at these slenderness values, the use of indirect (intensified transverse) reinforcement becomes practically ineffective (Scott, 1982: 13–27).

A further significant consideration is that the behavior of reinforced concrete members assembled from concretes of different compositions essentially models the behavior of reinforced concrete columns strengthened by monolithic reinforced concrete jackets. This method of strengthening columns in buildings under reconstruction is one of the most widespread in construction practice (Onufriev, 1974: 96–103).

Additional relevance is lent to the problem by the possibility of using high-strength materials, in particular high-strength reinforcement, in the construction of precast-monolithic structures and the reconstruction of buildings.

To investigate the interaction between the constituent elements of composite reinforced concrete members containing high-strength At-V longitudinal reinforcement and concretes with different deformability and strength characteristics, six column specimens were fabricated.

Each column consisted of two branches connected along the full length by ties. The columns had a combined rectangular cross-section of dimensions $h \times b = 100 \times 120$ mm (Figures 1, 2, 3). The variable parameters were the branch joint conditions; the branches also had a rectangular cross-section with dimensions of 100×60 mm and 120×50 mm. In Series K-I specimens, the branches were joined along the 100 mm side, while the remaining Series K-II specimens were joined along the 120 mm side (Figures 1, 2, 3). The concrete mix compositions are presented in Table 1.

Table 1 – Concrete mix compositions per 1 m³

Mix No.	Cement, kg	Crushed stone, kg	Sand, kg	Water, kg	W/C
Mix 1 (Branch 1)	330	1267	700	190	0.59
Mix 2 (Branch 2)	340	1170	648	200	0.59

The spacing of steel ties made from 4 mm diameter Bp-I wire was constant at 100 mm. The longitudinal reinforcement of each branch comprised two bars of 12 mm diameter, class At-V (Zakharov, 2005: 161–163; Uzunova, 2005: 243–245; Uzunova, 2006: 125–129). The strength and deformability characteristics of the longitudinal reinforcement, determined from tensile tests of coupons cut from the main reinforcing bars (GOST 12004–85), are presented in Table 2.

Table 2 – Strength and deformability characteristics of At-V reinforcing steel

Steel grade	$\sigma_{0.02}$, MPa	$\sigma_{0.05}$, MPa	$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_u , MPa	δ_u , %	$E_s \times 10^{-5}$, MPa
At-V	628.5	777.1	985.0	1257	7.5	1.92

To determine the strength and deformability characteristics of the concrete used in the test specimens, control cubes and prisms were fabricated simultaneously with each batch of concrete (GOST 10180–90; GOST 18105–86). The mean values of concrete properties, obtained from testing five control cubes and three prisms per batch at various concrete ages, are presented in Table 3.

Table 3 – Strength and deformability characteristics of concretes

Mix No.	Concrete age, days	R, MPa	Rb, MPa	Eb × 10 ³ , MPa
Mix 1 (Branch 1)	15	14.2	9.6	2.27
	30	16.1	10.6	2.27
	60	16.7	11.0	2.34
	90	16.8	11.2	—
	150	17.0	11.6	—
	400	17.5	11.5	2.4
Mix 2 (Branch 2)	7	12.2	8.1	1.73
	35	14.6	9.6	2.17
	120	15.8	10.9	2.34
	180	16.2	11.2	—
	240	16.1	11.5	2.17

All specimens were cast in timber formwork. The concrete mix was placed by hand and consolidated using an internal vibrator. The formed specimens gained strength under ambient conditions with continuous wetting of the outer surfaces.

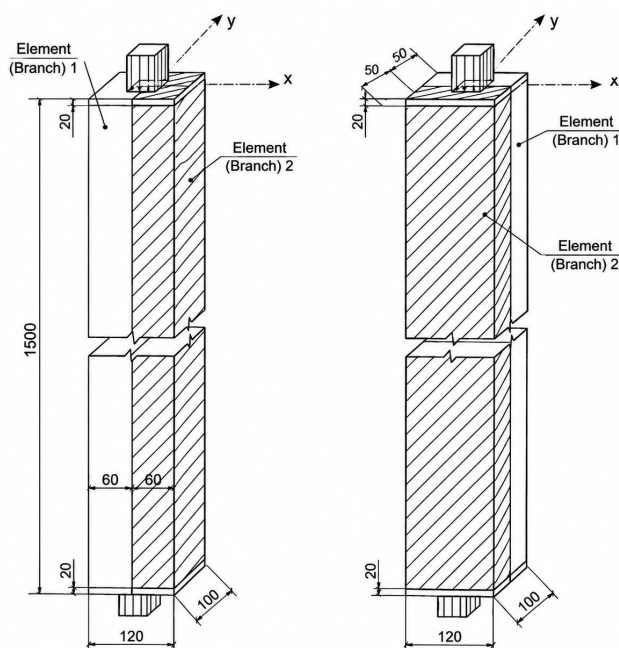


Fig. 1. Cross-sectional configurations of Series K-I and K-II column specimens and compression testing schemes

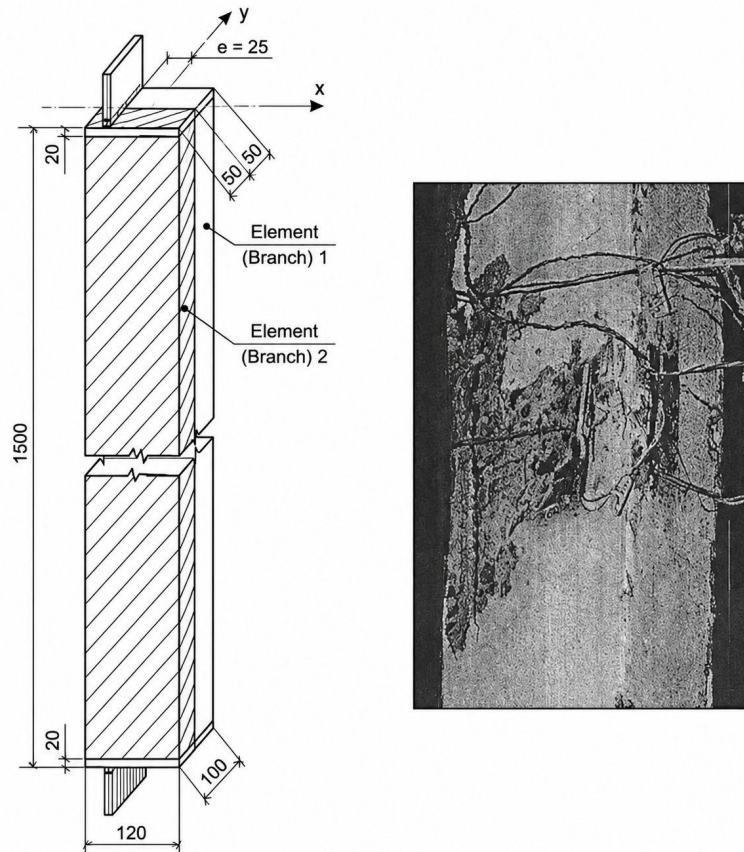


Fig. 2. Testing scheme for Series K-II columns under eccentric compression and photograph of column failure

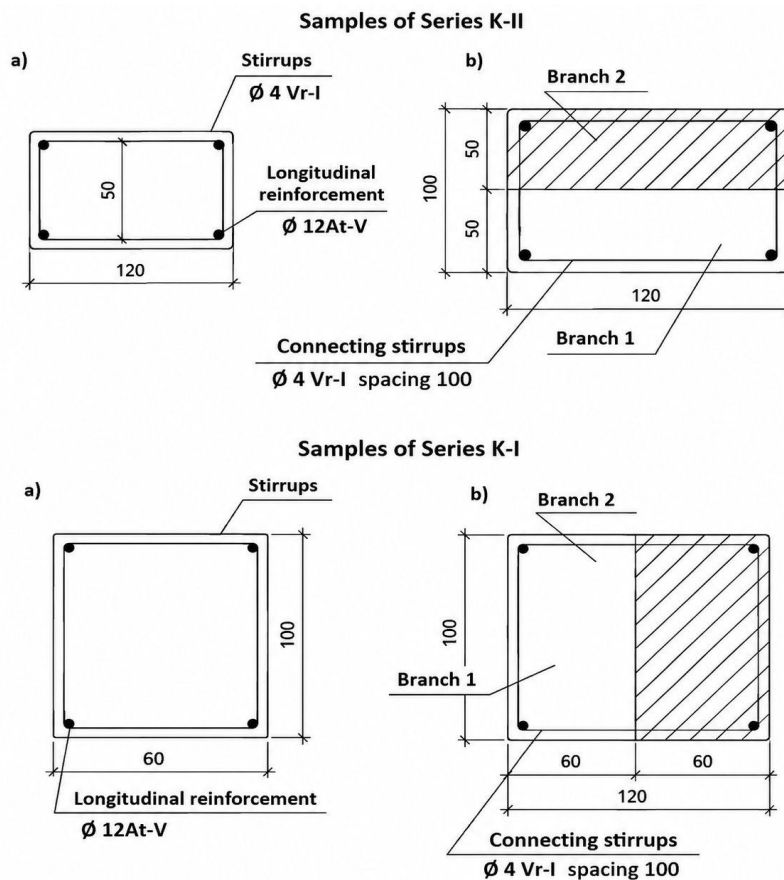


Fig. 3. Experimental reinforced concrete specimens: (a) Branch 1, representing the pre-existing (precast) concrete; (b) specimens after joining Branch 1 (earlier concrete) and Branch 2 (later concrete)]

Since the principal objective of the study was to investigate the interaction between concretes with different deformability characteristics (Branches 1 and 2) and their compatibility of deformation with At-V (A800) high-strength reinforcement, the branches were cast with a time interval averaging 135 days. Seven days after joining the precast (earlier-placed, Branch 1) and monolithic (later-placed, Branch 2) concretes, short-term tests to failure were conducted on the resulting composite members under compressive forces with relative eccentricities l_0/h varying from 0 to 0.208.

Short-term tests were carried out in a purpose-built rigid steel portal frame (Figure 4). The load was applied by a hydraulic jack connected to a manual pump station. Loading proceeded in increments; at each stage, instrument readings were taken immediately after load application and again immediately before the next increment. Longitudinal reinforcement strains were measured by electrical resistance strain gauges bonded to the bars prior to concreting and additionally monitored by dial-type indicators. Lateral deflections were measured by Maksimov-type deflectometers. Tests were conducted under the “standard scheme,” i.e., with pin-jointed end conditions. The slenderness in the plane of lateral buckling was variable; for a column length of 1500 mm and cross-sectional dimensions of 100 x 120 mm, it varied depending on the direction of the assigned or accidental eccentricity but did not exceed $\lambda = 52.5$ (Figures 1, 2, 3).

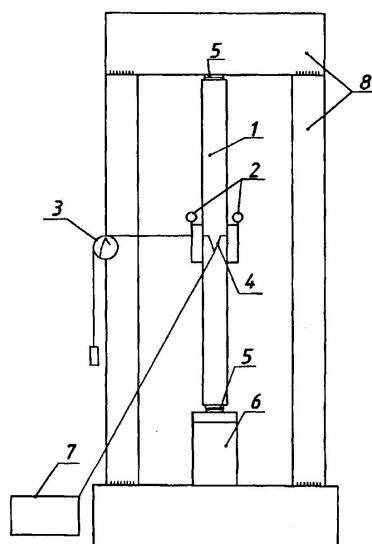


Fig. 4. Testing apparatus for short-term tests on main specimens: 1 – specimen; 2 – dial indicators; 3 – Maksimov-type deflectometer; 4 – strain gauge leads; 5 – pin support; 6 – hydraulic jack; 7 – digital voltmeter; 8 – welded steel portal frame]

The eccentricities of the longitudinal forces, including their accidental components, did not exceed 25 mm. These eccentricities were either assigned along the branch joint interface or treated as acting (accidentally) in the direction perpendicular to the joint interface, both toward the monolithic and toward the precast concrete sides. The magnitude of the assigned eccentricity was chosen so that the cross-sections of the specimens remained fully compressed at the time of loading. Accordingly, the slenderness ratios of the columns in the plane of assigned or accidental eccentricity were different (43.4 and 52.5). Thus, slenderness λ was treated as an independent variable parameter, alongside branch joint conditions and the magnitude of relative eccentricities.

Throughout the short-term tests, changes in the longitudinal strains of the high-strength reinforcement and the mid-height deflections of the columns were recorded at all loading stages, from the first increments through to failure. Loss of load-bearing capacity was identified either by physical failure of the specimen or by the onset of uncontrollable pressure decline on the manometer gauge despite continued pumping of the hydraulic station. In the latter case, significant increases in both deflection and longitudinal strain developed simultaneously and assumed an avalanche-like character. Direct failure was typically brittle in nature, manifested by

crushing of concrete in the end zones of the columns, and occurred in the majority of cases under nominally concentric compression.

Testing of auxiliary specimens (prisms and cubes) to determine concrete strength and deformability characteristics (cube and prism compressive strengths, and elastic moduli) was carried out by the standard procedure on a 500 kN press in conformity with GOST 10180–90. To study the deformability of concrete under sustained loading, spring-loaded creep frames were employed.

Concrete creep was investigated on prisms of 100 x 100 x 400 mm, each subjected to sustained compression in individual spring frames (Figure 5).

Throughout the period of sustained testing, free shrinkage strains of unloaded concrete prisms were measured with dial-type indicators having a graduation of 0.001 mm (Figure 6). In determining creep characteristics, free shrinkage strains were subtracted from the total deformations of the loaded prisms. Shrinkage curves for the two concretes are presented in Figures 7 and 8.

The effect of ambient humidity on the development of shrinkage and creep strains was monitored using a psychrometer, whose readings were recorded simultaneously with shrinkage and creep strain measurements.

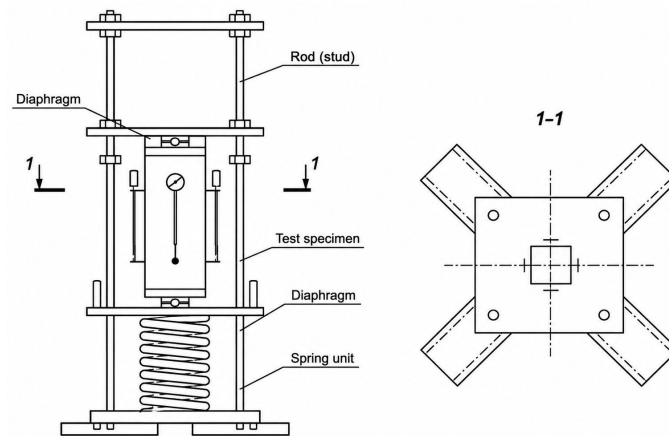


Fig. 5. General view of apparatus and specimens for concrete creep tests

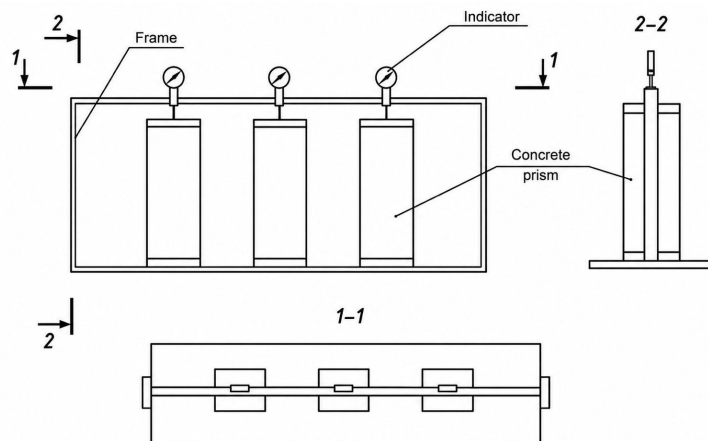


Fig. 6. General view of apparatus and specimens for concrete shrinkage tests

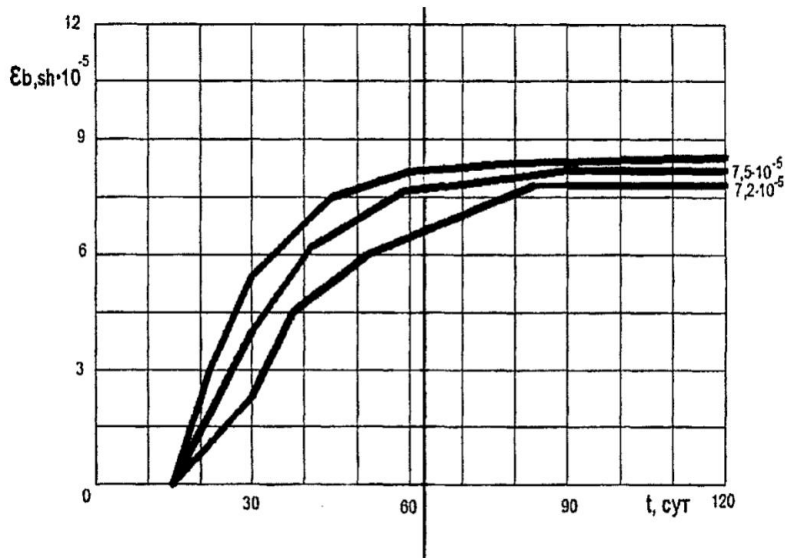


Fig. 7. Shrinkage curves for Branch 1 concrete

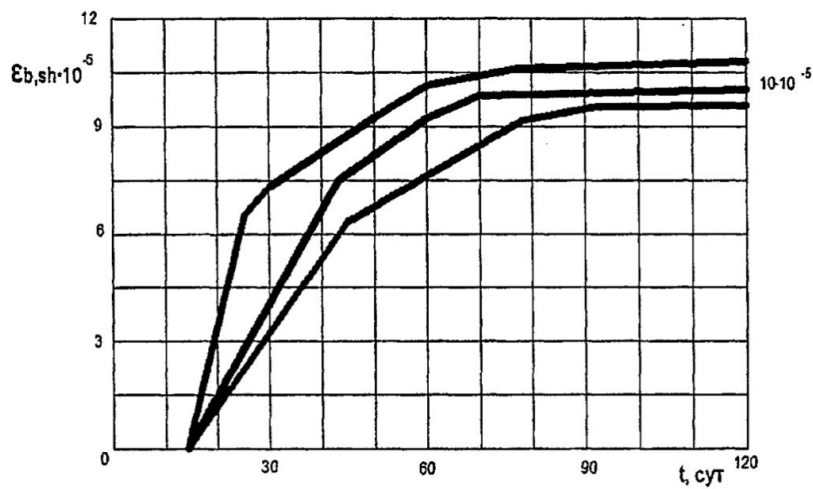


Fig. 8. Shrinkage curves for Branch 2 concrete

The results of short-term tests on auxiliary specimens, including reinforcement coupons, are presented in Tables 2 and 3. The results of sustained tests for the determination of shrinkage and creep strains for the precast (Mix 1) and monolithic (Mix 2) concretes are presented in Tables 4 through 7.

At all observation ages, the creep coefficient curves share a common feature: a rapid accumulation of strains within the first day, and even within the first hours of loading, followed by an exponential decay at an approximately uniform rate (Figure 9).

The magnitude of the rapidly developing creep strains is substantial, ranging from 40 to 60 percent of the total, i.e., ultimate, values at times when their attenuation becomes evident. These data are necessary for evaluating the effect of rapidly developing concrete creep on the stress-strain state of cross-sections under short-term service loading.

Table 4 – Mean values of shrinkage ($\epsilon_{b,Sh}$), creep ($\epsilon_{b,pl}$), elastic (ϵ_{be}), and total (ϵ_b) strains, and creep coefficient ($\phi_{b,\tau}$) for precast concrete (Mix 1) loaded at age $\tau_1 = 153$ days

Observation period $t-\tau_1$, days	$\epsilon_b \times 10^{-5}$	$\epsilon_{be} \times 10^{-5}$	$\epsilon_{b,Sh} \times 10^{-5}$	$\epsilon_{b,pl} \times 10^{-5}$	$\phi_{b,\tau}$
2	70.48	40.5	1.01	28.97	0.74
7	80.04	40.5	1.04	38.5	0.96
12	88.0	40.5	1.15	46.35	1.12

Observation period $t-\tau_1$, days	$\varepsilon_b \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{be} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,Sh} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,pl} \times 10^{-5}$	$\varphi_{b,\tau}$
17	93.0	40.5	1.03	51.47	1.26
24	95.5	40.5	1.05	53.95	1.31
33	98.0	40.5	1.0	56.5	1.42
42	95.5	40.5	1.6	53.4	1.35
52	102.2	40.5	1.52	60.0	1.5
85	112.25	40.5	1.65	70.6	1.74
149	118.26	40.5	1.86	75.9	1.87

Table 5 – Mean values of shrinkage ($\varepsilon_{b,Sh}$), creep ($\varepsilon_{b,pl}$), elastic (ε_{be}), and total (ε_b) strains, and creep coefficient ($\varphi_{b,\tau}$) for precast concrete (Mix 1) loaded at age $\tau_1 = 298$ days

Observation period $t-\tau_1$, days	$\varepsilon_b \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{be} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,Sh} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,pl} \times 10^{-5}$	$\varphi_{b,\tau}$
1	52.5	37.75	1.03	13.72	0.39
7	57.5	37.75	1.04	18.71	0.50
14	61.45	37.75	2.05	21.65	0.57
30	67.2	37.75	2.03	27.42	0.78
60	70.0	37.75	1.8	30.45	0.85
90	75.75	37.75	1.95	36.05	0.95
150	77.0	37.75	2.06	37.19	0.98

Table 6 – Mean values of shrinkage ($\varepsilon_{b,Sh}$), creep ($\varepsilon_{b,pl}$), elastic (ε_{be}), and total (ε_b) strains, and creep coefficient ($\varphi_{b,\tau}$) for monolithic concrete (Mix 2) loaded at age $\tau_1 = 7$ days

Observation period $t-\tau_1$, days	$\varepsilon_b \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{be} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,Sh} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,pl} \times 10^{-5}$	$\varphi_{b,\tau}$
2	41.1	32.9	1.0	10.2	0.31
7	58.4	32.9	4.0	21.5	0.63
12	67.1	32.9	5.5	28.7	0.87
17	74.3	32.9	6.5	34.6	1.05
24	79.2	32.9	7.5	38.8	1.18
31	83.15	32.9	8.25	42.0	1.28
40	93.7	32.9	9.7	51.1	1.55
50	110.1	32.9	10.5	66.7	2.03
83	114.4	32.9	10.8	70.7	2.15
150	122.4	32.9	11.0	78.5	2.40

Table 7 – Mean values of shrinkage ($\varepsilon_{b,Sh}$), creep ($\varepsilon_{b,pl}$), elastic (ε_{be}), and total (ε_b) strains, and creep coefficient ($\varphi_{b,\tau}$) for monolithic concrete (Mix 2) loaded at age $\tau_1 = 193$ days

Observation period $t-\tau_1$, days	$\varepsilon_b \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{be} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,Sh} \times 10^{-5}$	$\varepsilon_{b,pl} \times 10^{-5}$	$\varphi_{b,\tau}$
1	72.25	57.5	1.0	13.75	0.24
7	80.0	57.5	1.0	21.5	0.37
14	91.5	57.5	2.5	31.5	0.55
30	103.98	57.5	5.35	43.13	0.72
60	110.5	57.5	6.0	47.0	0.85

Observation period $t-\tau$, days	$\epsilon_b \times 10^{-5}$	$\epsilon_{be} \times 10^{-5}$	$\epsilon_{b,Sh} \times 10^{-5}$	$\epsilon_{b,pl} \times 10^{-5}$	$\phi_{b,\tau}$
90	121.2	57.5	7.0	56.7	0.99
150	131.2	57.5	7.2	67.5	1.17

Table 8 presents the mean values (averaged over two nominally identical specimens) of lateral deflections and longitudinal strains of the most-compressed and least-compressed reinforcement in the primary Branch 1 ($\epsilon's1$ and $\epsilon s1$) and in the strengthening Branch 2 ($\epsilon's2$ and $\epsilon s2$). These values correspond to compression levels close to the sustained loading level for those columns subsequently tested to failure after a preliminary period of sustained loading.

Table 8 – Mean values (from two specimens) of most-compressed ($\epsilon'si$) and least-compressed (ϵsi) reinforcement strains at $N/Nu = 0.74-0.79$

Specimen	N, kN	N/Nu	$e0$, mm	$\epsilon's1 \times 10^{-5}$	$\epsilon s1 \times 10^{-5}$	$\epsilon's2 \times 10^{-5}$	$\epsilon s2 \times 10^{-5}$	f, cm
K-I-1, K-I-2	277.0	0.745	0	142.7	128.0	158.0	136.0	0.4
K-II-1, K-II-2	277.0	0.79	0	—	123.3	204.8	—	0.3
K-II-7, K-II-8	184.5	0.76	25	187.7	-42.9	237	19.1	0.6

Table 9 – Ultimate reinforcement strain values

Specimen	Ultimate load $Nult$, kN	Eccentricity $e0$, mm	$\epsilon s1 \times 10^{-5}$ (Branch 1)	$\epsilon s2 \times 10^{-5}$ (Branch 2)
K-I-1, K-I-2	372	0	376	529
K-II-1, K-II-2	351	0	—	456.2
K-II-7, K-II-8	243	25	518	840

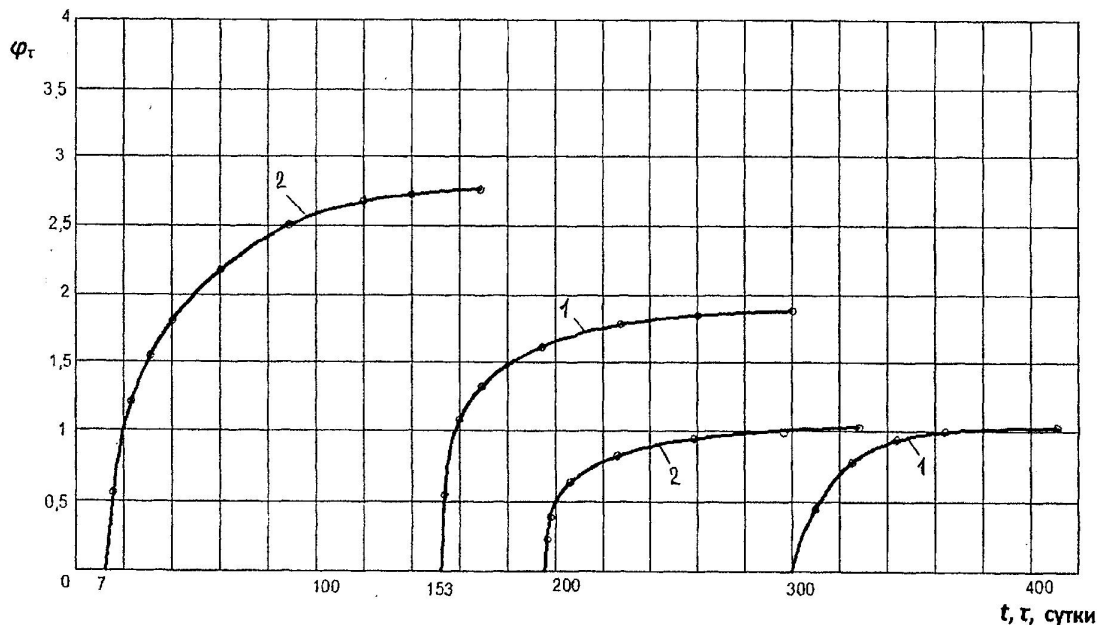


Fig. 9. Time variation of the creep coefficient ϕ_{τ} as a function of concrete age at loading τ and loading duration ($t-\tau$) for Branch 1 (earlier concrete) and Branch 2 (later concrete)

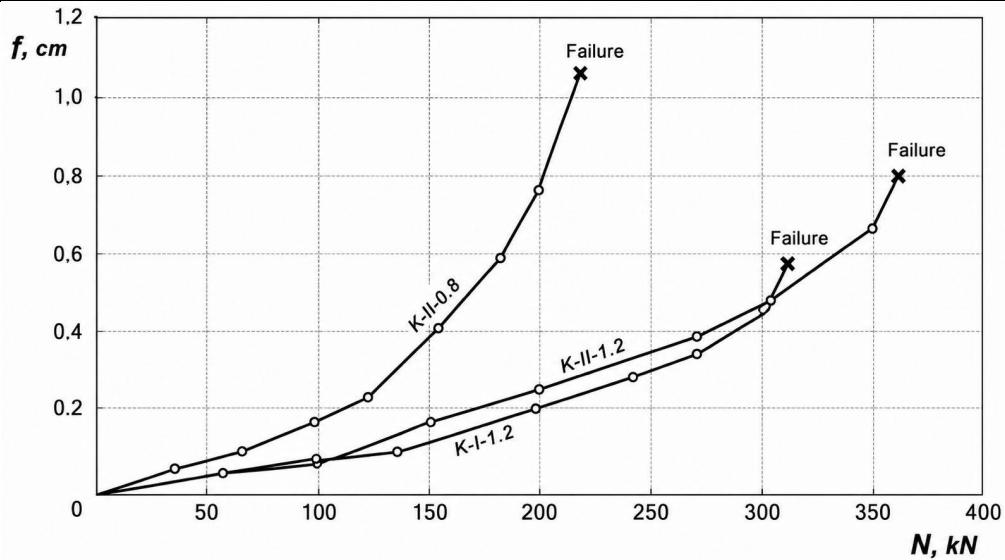


Fig. 10. Development of lateral deflections f in test columns as a function of the loading level

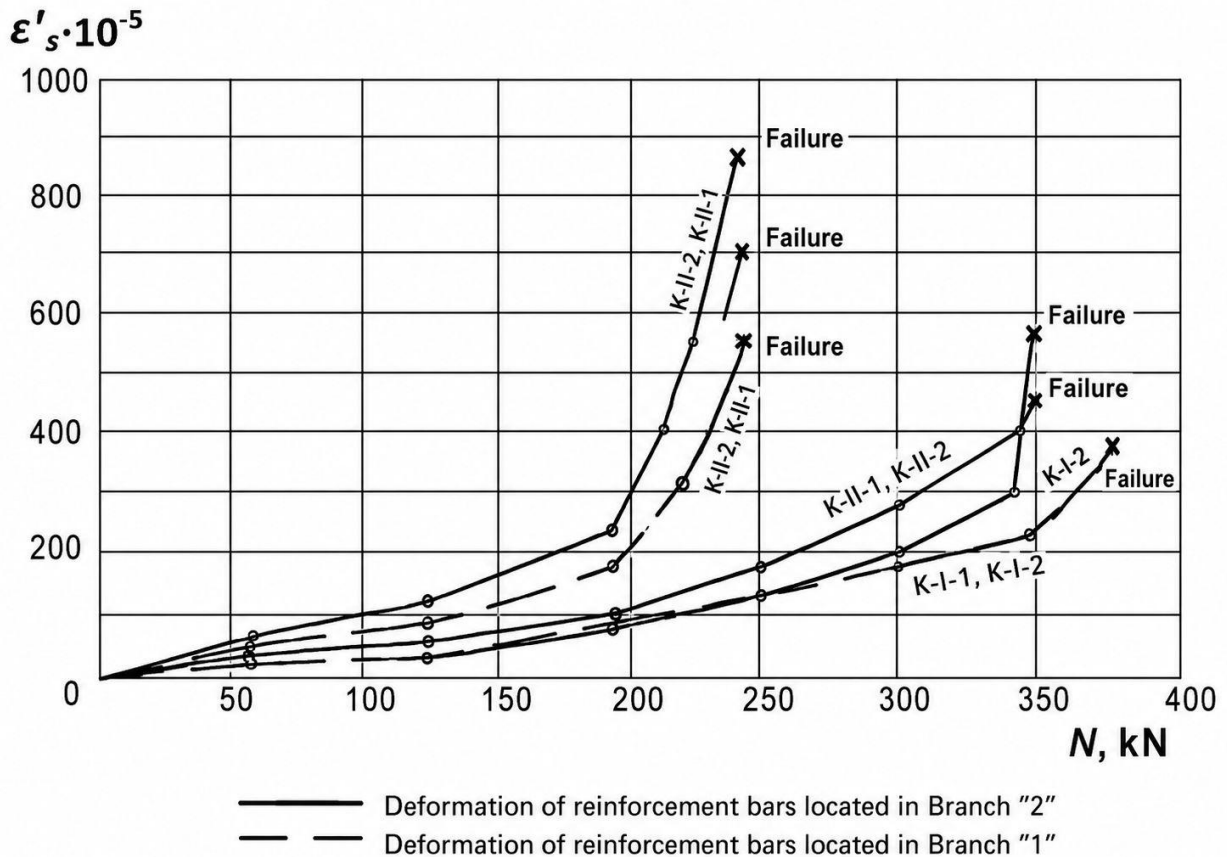


Fig. 11. Development of strains ϵ 's in the most-compressed reinforcement of test specimens

Analysis of the experimental results shows that the deformation behavior of the tested composite columns was governed not only by the magnitude of the applied longitudinal force, but also by the internal non-homogeneity of the cross-section. The presence of two concrete branches with different ages, stiffnesses, shrinkage histories, and creep characteristics caused redistribution of stresses between the branches during loading. As a result, even in specimens tested under nominally concentric compression, the stress-strain state was not symmetrical.

Under nominally central compression, the nearly linear increase in deflections and reinforcement strains up to approximately $0.75Nu$ indicates that, within this loading range, the

composite section retained sufficient stiffness and deformation compatibility between concrete and reinforcement. At this stage, the column behaved as a single composite member, and the increase in internal forces was accompanied by relatively stable deformation development. However, after reaching approximately 75% of the ultimate load, stiffness degradation became more pronounced. This was caused by the accumulation of microcracks in concrete, local crushing in highly compressed zones, and increasing non-uniformity of strain distribution between Branch 1 and Branch 2.

The sharp acceleration of deformation growth near failure indicates the transition of the columns from a stable deformation stage to an unstable limit state. At this stage, small increases in load caused disproportionately large increments of deflection and reinforcement strain. Such avalanche-like behavior is typical for compressed reinforced concrete members in which second-order effects, stiffness reduction, and concrete damage develop simultaneously. For composite columns, this process is additionally intensified by the difference in deformability between the precast and cast-in-situ concrete branches.

The experimental data confirm that eccentric compression has a much stronger effect on deformation development than nominally central compression. When initial eccentricity was introduced, bending moments arose from the first loading stages, causing an uneven distribution of stresses across the section. The compressed zone became more localized, while tensile or weakly compressed zones developed on the opposite side. As the load increased, lateral deflections grew rapidly, producing additional secondary moments. This explains why, near failure, the rate of growth of deflections and reinforcement strains increased by a factor of 5 to 6.

The difference in failure modes between centrally and eccentrically compressed specimens is also significant. Under nominally central compression, failure occurred mainly through crushing of concrete in the end zones, which indicates that the load-bearing capacity was controlled by the compressive strength of concrete and local stress concentration. In eccentrically compressed columns, failure was more complex: lateral bending, tensile cracking, and compression-zone crushing developed simultaneously. The appearance of extensive cracking in the tensile zone confirms that eccentricity changed the stress state from predominantly axial compression to combined compression and bending.

The reinforcement strain results are especially important for evaluating the effectiveness of high-strength At-V reinforcement in composite columns. In eccentrically compressed specimens, strains in the most-compressed reinforcement reached approximately 0.8%, which significantly exceeded the strain values recorded under nominally central compression. This indicates that eccentric loading promotes more active involvement of high-strength reinforcement in resisting bending moments and axial force. However, such high strain levels also demonstrate that the reinforcement operates under more unfavorable deformation conditions and that the risk of local concrete crushing or instability increases sharply near failure.

The fact that strictly concentric compression was not achieved even in specimens without assigned eccentricity is of practical importance. In real construction conditions, accidental eccentricities are almost inevitable due to geometric imperfections, uneven concrete properties, deviations during installation, and non-uniform loading. The experimental results show that even relatively small accidental eccentricities may produce measurable lateral deflections and unequal reinforcement strains at opposite faces of the column. Therefore, design methods for composite reinforced concrete columns should not assume ideal central compression without considering possible bending effects.

The repeated observation that the largest reinforcement strains developed on the side of Branch 2 confirms the decisive influence of concrete deformability on internal force redistribution. Branch 2, corresponding to the later-cast monolithic concrete, had higher deformability than Branch 1. Because of this, the reinforcement embedded in Branch 2 experienced greater longitudinal strains under otherwise identical loading conditions. This means that the stiffer branch and the more deformable branch did not participate equally in resisting the

applied load. Instead, deformation compatibility forced redistribution of stresses, increasing the role of reinforcement in the more deformable part of the section.

This effect is particularly relevant for strengthened reinforced concrete columns, where a new concrete jacket is added to an existing column. The old and new concretes usually differ in age, modulus of elasticity, shrinkage, creep, and bond conditions. As shown by the experiments, these differences may lead to non-uniform strain distribution and unequal utilization of reinforcement. Therefore, when assessing the load-bearing capacity of strengthened columns, it is necessary to account not only for the total cross-sectional area and reinforcement ratio, but also for the deformation compatibility of the old and new concrete components.

The development of tensile stresses in the reinforcement farthest from the line of action of the compressive force in eccentrically loaded specimens indicates that part of the section approached or crossed the boundary between full compression and compression with tension. This is especially important when the initial eccentricity is located near the elastic kern boundary. In such cases, small changes in accidental eccentricity or stiffness distribution may significantly alter the stress state of individual reinforcement bars. However, the experiments showed that accidental eccentricities did not substantially change the ultimate load values, which suggests that the global behavior was governed mainly by the assigned eccentricity, section stiffness, and material deformability.

The comparison of nominally identical companion specimens also indicates that composite reinforced concrete columns may exhibit noticeable scatter in strain development even under similar test conditions. This scatter is caused by the natural variability of concrete properties, local differences in bond between concrete and reinforcement, slight deviations in eccentricity, and different degrees of interaction along the joint interface. Such variability should be considered when developing calculation models and safety factors for composite compressed members.

Overall, the expanded analysis confirms that the short-term compressive behavior of composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement is governed by a combination of axial compression, bending effects, second-order deformation, concrete stiffness degradation, and deformation incompatibility between branches. The most important experimental conclusion is that the cast-in-situ branch with higher deformability consistently caused larger reinforcement strains, even when the geometry of the specimen favored eccentricity toward the stiffer branch. This demonstrates that material deformability may be more influential than geometric arrangement in determining local strain distribution.

These results have direct practical significance for the design and strengthening of reinforced concrete columns. In engineering calculations, it is advisable to consider accidental eccentricities, differences in concrete modulus of elasticity, time-dependent deformation properties, and the position of the joint interface. For strengthened columns, special attention should be given to ensuring reliable bond between old and new concrete, proper detailing of transverse ties, and adequate confinement of end zones where brittle crushing is most likely to occur.

Thus, the experimental observations confirm that composite reinforced concrete columns cannot be evaluated simply as monolithic members with averaged material properties. Their real behavior is more complex and requires design models capable of reflecting non-uniform deformation, unequal reinforcement strain development, and the influence of eccentricity on failure mode and load-bearing capacity.

Conclusion.

The present study investigated the short-term compressive resistance of composite reinforced concrete columns with high-strength longitudinal reinforcement of class At-V. The problem considered is of significant theoretical and practical importance, since composite compressed members are widely encountered in precast-monolithic construction and in the

strengthening of existing reinforced concrete columns during reconstruction. In such structures, the joint operation of concretes of different ages, strengths, and deformability characteristics creates a complex stress-strain state that is insufficiently reflected in traditional design approaches developed mainly for monolithic reinforced concrete members.

The experimental programme made it possible to evaluate the influence of column slenderness, branch joint conditions, longitudinal force eccentricity, and concrete deformability differences on the behavior of composite columns under short-term compression. Six medium-slenderness composite specimens were tested, together with control cubes, prisms, and reinforcement coupons. The use of strain gauges, dial indicators, and deflectometers enabled continuous observation of longitudinal reinforcement strains, lateral deflections, and failure development at different loading stages.

The results confirmed that concretes of different ages and deformabilities within one composite section do not deform identically under compression. Even under nominally central loading, the strain distribution across the section was non-uniform, and lateral deflections developed from the early loading stages. This indicates that absolutely concentric compression of composite reinforced concrete columns is difficult to achieve in practice due to accidental eccentricities, stiffness differences between branches, and the non-homogeneous structure of the cross-section.

A key experimental finding is that the largest longitudinal strains consistently developed in the reinforcement located in Branch 2, corresponding to the later-cast monolithic concrete. This confirms the research hypothesis that the more deformable concrete branch attracts higher reinforcement strains and influences the redistribution of internal forces within the composite section. The effect was observed both under nominally central compression and under eccentric loading, demonstrating the importance of accounting for concrete age and stiffness differences in design calculations.

The experiments showed that, under nominally central compression, deflections and reinforcement strains increased approximately uniformly up to a load level of about 0.75 of the ultimate load. After this stage, deformation growth accelerated significantly, and immediately before failure the increase in strains and deflections became avalanche-like. Failure was predominantly brittle and was accompanied by crushing of concrete in the end zones of the columns.

Under eccentric compression, the behavior of the specimens changed substantially. Lateral deflections increased more rapidly, tensile stresses appeared in the reinforcement farthest from the line of action of the longitudinal force, and failure was accompanied by more pronounced cracking in the tensile zone. Ultimate reinforcement strains in eccentrically compressed columns reached values approximately 1.5–2 times greater than those observed under nominally central compression. This confirms the significant influence of eccentricity on the deformability and failure mode of composite reinforced concrete columns.

The obtained data also demonstrate that branch joint conditions affect the redistribution of strains and the overall load-bearing capacity of composite columns. The orientation of the joint interface relative to the direction of eccentricity influences the stiffness of the section, the development of accidental bending, and the concentration of strains in individual reinforcement bars. Therefore, when designing strengthened or precast-monolithic columns, the position of the joint plane and the quality of branch connection should be treated as important structural parameters.

The results of creep and shrinkage testing further clarify the deformation behavior of composite sections. Rapidly developing creep strains constituted a considerable part of total concrete deformation, especially in the early loading period. This effect is important because short-term loading of composite columns may still be accompanied by time-dependent strain redistribution between older and newer concrete branches. Consequently, differences in

shrinkage and creep characteristics should be considered when assessing the stress-strain state of strengthened columns.

The study confirms that the use of high-strength At-V reinforcement in composite compressed members is effective, but its efficiency depends strongly on deformation compatibility between concrete branches. High-strength reinforcement can provide additional load-bearing capacity, but non-uniform strain distribution may prevent full and uniform utilization of reinforcement strength across the section. This is especially relevant for eccentrically compressed columns and for columns strengthened by monolithic jackets.

The scientific significance of the research lies in obtaining new experimental data on medium-slenderness composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement under central and eccentric compression. The results refine understanding of the interaction between concrete and reinforcement in non-homogeneous composite sections and clarify the mechanisms of deformation development, internal force redistribution, and failure formation.

The practical significance of the study consists in the possibility of applying the obtained results in the design and assessment of precast-monolithic and strengthened reinforced concrete columns in buildings and engineering structures. The findings may be used when selecting reinforcement schemes, evaluating the effectiveness of reinforced concrete jackets, determining the influence of eccentricity, and improving calculation models for composite compressed members.

Overall, the research hypothesis was confirmed. The presence of concretes of different ages and deformabilities in one composite section leads to non-uniform strain distribution, increased deformability of reinforcement in the later-cast branch, and changes in the load-bearing capacity and failure mode of the columns. These effects must be considered in engineering calculations, especially when designing strengthened columns subjected to eccentric compression.

Further research should focus on expanding the experimental database by testing columns with different concrete strength classes, reinforcement ratios, slenderness values, joint configurations, and loading durations. It is also advisable to study long-term loading effects, cyclic loading, seismic action, and the influence of different strengthening technologies. Development of refined analytical and numerical models based on the obtained experimental data will improve the reliability of design methods for composite reinforced concrete columns with high-strength reinforcement.

REFERENCES

Chistyakov 1981 – Chistyakov, V.A., Surin, V.V. (1981). Nesushchaya sposobnost' szhatykh zhelezobetonnykh kolonn s vysokoprochnoi nenapryagaemoi armaturoi [Load-bearing capacity of compressed reinforced concrete columns with high-strength non-prestressed reinforcement]. In: Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki elementov betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukttsii. — M.: NIIZhB. Pp. 70–80. [In Russ.]

Chistyakov 1975 – Chistyakov, E.A., Bakirov, K.K. (1975). Prochnost' szhatykh zhelezobetonnykh kolonn s prodol'noi vysokoprochnoi armaturoi i poperechnymi svarnymi setkami [Strength of compressed reinforced concrete columns with longitudinal high-strength reinforcement and transverse welded meshes]. Zhilishchno-grazhdanskoe stroitel'stvo. Alma-Ata. No. 3. 130 p. [In Russ.]

Riskind 1982 – Riskind, B.Ya. (1982). Primenenie vysokoprochnoi szhatoi armatury v zhelezobetonnykh konstrukttsiyakh [Application of high-strength compressed reinforcement in reinforced concrete structures]. Promyshlennost' sbornogo zhelezobetona. Series 3. — M. Issue 3. 39 p. [In Russ.]

Gamayunov 1968 – Gamayunov, E.I. (1968). O velichine predel'nykh deformatsii betona pri szhatii [On the value of ultimate concrete strains in compression]. Trudy TsNIIS. — M. Issue 24. Pp. 26–39. [In Russ.]

Dovgalkzh 1975 – Dovgalkzh, V.I., Lepskii, V.I. (1975). Kolonny s armirovaniem iz vysokoprochnoi stali. Tekhnicheskoe reshenie [Columns reinforced with high-strength steel. Technical solution]. — M.: TsNIIEP TBZ. 151 p. [In Russ.]

Kalyaskin 1999 – Kalyaskin, A.V. (1999). Soprotivlenie kratkovremennomu i dlitel'nomu osevomu szhatiyu gibkikh zhelezobetonnykh elementov s vysokoprochnoi armaturoi [Resistance to short-term and long-term axial compression of slender reinforced concrete elements with high-strength reinforcement]. PhD Thesis. Tver: TGTU. 146 p. [In Russ.]

Khelifi 1998 – Khelifi, Kh.K.B.S. (1998). Kratkovremennoe i dlitel'noe soprotivlenie tsentral'no szhatykh

kolonn srednei gibkosti s razlichnym sodержaniem vysokoprochnoi prodol'noi armatury [Short-term and long-term resistance of centrally compressed columns of medium slenderness with different contents of high-strength longitudinal reinforcement]. PhD Thesis. Tver: TGTU. 189 p. [In Russ.]

Mailyan 1982 – Mailyan, D.R., Medinskii, V.P., Azizov, A.G. (1982). Prochnost' zhelezobetonnykh kolonn s vysokoprochnoi predvaritel'no szhatoi prodol'noi armaturoi [Strength of reinforced concrete columns with high-strength prestressed longitudinal reinforcement]. In: Voprosy rascheta zhelezobetona. — Rostov-on-Don: RISI. Pp. 47–56. [In Russ.]

Frolov 1988 – Frolov, A.K., Kim, L.V. (1988). Vnetsentrenno szhatye zhelezobetonnye kolonny s vysokoprochnoi armaturoi bol'shogo diametra [Eccentrically compressed reinforced concrete columns with large-diameter high-strength reinforcement]. Sbornik trudov MISI. — M. P. 17. [In Russ.]

Sheikh 1982 – Sheikh, S., Uzumeri, S. (1982). Analytical model for concrete confinement in tied columns. Journal of Structural Division. Vol. 108. ST12. Pp. 703–722. [In Eng.]

Scott 1982 – Scott, D., Park, R., Priestley, M. (1982). Stress–strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. ACI Journal. Vol. 79. No. 1. Pp. 13–27. [In Eng.]

Onufriev 1974 – Onufriev, N.M., Zakharov, S.T. (1974). Usilenie kolonn oboimami s uchedom eksperimentov [Strengthening of columns with jackets based on experimental data]. In: Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstruksii. Leningrad: LISI. Pp. 96–103. [In Russ.]

Zakharov 2005 – Zakharov, V.F., Uzunova, L.V. (2005). Opytnye i raschetnye dannye o kratkovremennom soprotivlenii szhatiyu sostavnykh zhelezobetonnykh sterzhnei [Experimental and calculated data on short-term compressive resistance of composite reinforced concrete members]. Proceedings of the International Scientific Conference “Innovations in Science and Education – 2005.” Kaliningrad. Pp. 161–163. [In Russ.]

Uzunova 2005 – Uzunova, L.V., Zakharov, V.F. (2005). Eksperimental'noe issledovanie kratkovremennogo soprotivleniya szhatiyu sostavnykh zhelezobetonnykh sterzhnei [Experimental study of short-term compressive resistance of composite reinforced concrete members]. Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference “Effective Building Structures. Theory and Practice.” Penza. Pp. 243–245. [In Russ.]

Uzunova 2006 – Uzunova, L.V., Zakharov, V.F. (2006). Soprotivlenie kratkovremennomu szhatiyu sostavnykh sterzhnei s vysokoprochnoi armaturoi [Short-term compressive resistance of composite members with high-strength reinforcement]. Izvestiya KGTU. No. 9. Pp. 125–129. [In Russ.]

GOST 12004–85 – GOST 12004–85 (1985). Armature steel. Tensile test methods. Moscow: Izdatel'stvo standartov. 24 p. [In Russ.]

GOST 10180–90 – GOST 10180–90 (1990). Concrete. Methods for strength determination using control specimens. 24 p. [In Russ.]

GOST 18105–86 – GOST 18105–86 (1987). Concrete. Rules for strength control. Moscow: State Construction Committee. 19 p. [In Russ.]

ҚАЗАҚСТАН ӨНДІРІС КӨЛІГІ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ
КАЗАХСТАНА
INDUSTRIAL TRANSPORT
OF KAZAKHSTAN

Правила оформления статьи для публикации в журнале на сайте:
<http://prom.mtgu.edu.kz>

ISSN: 1814-5787 (print)
ISSN: 3006-0273 (online)

Собственник:

Международный транспортно-гуманитарный университет
(Казахстан, г.Алматы).

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
Мылтыкбаева Айгуль Тауарбековна

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА
Букина Светлана Владимировна

Подписано в печать 16.03.2026. Формат 60x84 1/8. Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс» .
Печать RISO. Объем 21,4 усл.п.л. Тираж 500 экз.
Отпечатано и сверстано в ИП «Salem». с.Бескайнар, ул.Мичурин, 52/1, тел.: +77072619261

Издание «Международный транспортно-гуманитарный университет»
Адрес редакции: г. Алматы, мкрн. Жетысу-1, д. 32а.