

**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 №2(90)

апрель-июнь

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

Войчик 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 ID:57680586200, 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 ID:15623452500, 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)

Войчик 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 Айнура 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 Bakhytzhan 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 ID:57680586200, 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 ID:15623452500, 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

A.E. Kassymova

THIS DOCUMENT ANALYZES THE PROTECTIVE DEVICES USED IN THE ALMATY SIGNALING AND COMMUNICATION DISTANCE AND PROPOSES THE DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT AUTOMATED SAFETY SYSTEM FOR UNGUARDED RAILWAY CROSSINGS.

7

Zh. Mengxu

MICROELECTRONIC AND MICROPROCESSOR-BASED AUTOMATIC BLOCK SIGNALING SYSTEMS: ARCHITECTURE, FUNCTIONAL ANALYSIS, AND DIGITALIZATION PROSPECTS

22

Sun Pentao

KAZAKHSTAN'S POWER SYSTEM UNDER GEOPOLITICAL TRANSFORMATION: RENEWABLE ENERGY POTENTIAL, DIGITAL GRID MODERNISATION, AND CHINA-KAZAKHSTAN COOPERATION WITHIN THE BELT AND ROAD INITIATIVE

34

S.K. Sultangazinov, M.O. Orynbekov, K.K. Rustambekova

GENERAL PRINCIPLES OF ALGORITHMIC STRUCTURE SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS AND PROSPECTS FOR THEIR APPLICATION IN TRANSPORT AUTOMATION

47

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Y. Mukametali

ENVIRONMENTAL VALUE ASSESSMENT METHODS FOR IT PROJECTS: A SYSTEMATIC REVIEW

63

Zh. Ryskeldi

RISK MANAGEMENT IN THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES INTO PROJECT ACTIVITIES: CLASSIFICATION AND MITIGATION STRATEGIES

72

K.B. Baltabayev, K.B. Tussupova, Igor Fernández Plazaola

LEARNLY PLATFORM BASED ON MACHINE LEARNING FOR ADAPTIVE AND PERSONALIZED LEARNING

83

R. Shakirov

IMPLEMENTATION OF PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON) TECHNOLOGY IN THE ALATAU DISTRICT

96

МАЗМҰНЫ

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ

А.Е. Касымова

АЛМАТЫ ДАБЫЛДАНДЫРУ ЖӘНЕ БАЙЛАНЫС ДИСТАНЦИЯСЫНЫҢ ҚОРҒАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ТАЛДАУ ЖӘНЕ КҮЗЕТІЛМЕЙТІН ТЕМІРЖОЛ ӨТПЕЛЕРІНДЕ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖҮЙЕСІН ӨЗІРЛЕУ

7

Чжан Мэнсю

МИКРОЭЛЕКТРОНДЫ ЖӘНЕ МИКРОПРОЦЕССОРЛЫҚ АВТОМАТТЫ БЛОКТАУ ЖҮЙЕЛЕРІ: АРХИТЕКТУРАСЫ, ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ТАЛДАУЫ ЖӘНЕ ЦИФРЛАНДЫРУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

22

С. Пентао

ГЕОСАЯСИ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІ: ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ ӘЛЕУЕТІ, ЦИФРЛЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ЖАҢҒЫРТУ ЖӘНЕ «БІР БЕЛДЕУ – БІР ЖОЛ» АЯСЫНДАҒЫ ҚЫТАЙ-ҚАЗАҚСТАН ҰНТЫМАҚТАСТЫҒЫ

34

С.К. Султангазинов, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ АЛГОРИТМДІК ҚҰРЫЛЫМ СИНТЕЗІНІҢ ЖАЛПЫ ҚАҒИДАЛАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ КӨЛІКТІК АВТОМАТИЗАЦИЯДА ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

47



ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

Е. Мұқаметәлі ИТ-ЖОБАЛАРДЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚҰНДЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ: ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ	63
Ж. Рыскелді ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ЖОБАЛЫҚ ҚЫЗМЕТКЕ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ ТӘУЕКЕЛДЕРІН БАСҚАРУ: ЖІКТЕЛУ ЖӘНЕ МИТИГАЦИЯ СТРАТЕГИЯЛАРЫ	72
Қ.Б. Балтабаев, Қ.Б. Тусупова, Игорь Фернандес Плазола МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ НЕГІЗІНДЕГІ АДАПТИВТІ ЖӘНЕ ЖЕКЕЛЕНДІРІЛГЕН ОҚЫТУҒА АРНАЛҒАН LEARNLY ПЛАТФОРМАСЫ	83
Р.Б. Шакиров АЛАТАУ АУДАНЫНА ПАССИВ ОПТИКАЛЫҚ ЖЕЛІЛЕР (PON) ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЕНГІЗУ	96

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА

А.Е. Касымова АНАЛИЗ ОГРАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ АЛМАТИНСКОЙ ДИСТАНЦИИ СИГНАЛИЗАЦИИ И СВЯЗИ И РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА НЕОХРАНЯЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ	7
Чжан Мэнсю МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ БЛОКИРОВКИ: АРХИТЕКТУРА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ	22
С. Пентао ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ: ПОТЕНЦИАЛ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ЦИФРОВАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТЕЙ И КИТАЙСКО-КАЗАХСТАНСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В РАМКАХ ИНИЦИАТИВЫ «ОДИН ПОЯС — ОДИН ПУТЬ»	34
С.К. Султангазинов, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТРУКТУР АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ТРАНСПОРТНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ	47

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Мұқаметәлі Ерназар МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ИТ-ПРОЕКТОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	63
Ж. Рыскелді УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЕКТНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРАТЕГИИ МИТИГАЦИИ	72
К.Б. Балтабаев, К.Б. Тусупова, Игорь Фернандес Плазола ПЛАТФОРМА LEARNLY НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АДАПТИВНОГО И ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ	83
Р.Б. Шакиров ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (PON) В АЛАТАУСКОМ РАЙОНЕ	96

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

Industrial Transport of Kazakhstan

ISSN 1814-5787 (print)

ISSN 3006-0273 (online)

Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 07–21

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

<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.001>

UDC / УДК / ЭОЖ 625.161:656.25:004.9

**THIS DOCUMENT ANALYZES THE PROTECTIVE DEVICES USED IN THE
ALMATY SIGNALING AND COMMUNICATION DISTANCE AND PROPOSES THE
DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT AUTOMATED SAFETY SYSTEM FOR
UNGUARDED RAILWAY CROSSINGS.**

*A.E. Kassymova**

M. Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: a.kasymova@alt.edu.kz

Ainur Kassymova — Master, Senior Lecturer, M. Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: a.kasymova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0102-87997>

© A.E. Kassymova

Abstract. The article is devoted to a comprehensive analysis of protective devices deployed within the Almaty Signaling and Communication Distance of JSC “NC Kazakhstan Temir Zholy” and to the development of scientifically substantiated proposals for implementing an intelligent automated safety system at unguarded railway crossings. The relevance of the study is determined by the persistently high accident rate at railway crossings: according to JSC “NC KTZ”, during the first 11 months of 2025, 10,668 violations of crossing regulations were recorded at railway crossings of the Republic of Kazakhstan, while up to 50% of road accidents were associated with vehicles passing at a prohibitive signal indication. The aim of the research is to analyze the current condition of the protective infrastructure of the Almaty signaling and communication distance and to perform a comparative evaluation of technical solutions aimed at improving safety at unguarded crossings, followed by substantiation of the optimal alternative. The study is based on industry statistical data, regulatory and technical documentation, research findings of PGUPS, and scientific publications on crossing automation issued between 2018 and 2022. Research methods include systems analysis, comparative technical analysis of three alternative technical solutions (video surveillance, mirrors, and optical infrared sensors), and functional reliability assessment methods. The results demonstrate that the application of a three-pair optical infrared sensor system integrated with ALS-ARS coding circuits enables automatic detection of vehicles at crossings, determination of vehicle speed, length, and direction of movement, and generation of a control code for locomotive braking with a response delay of less than 1 second — without operator participation and without dependence on lighting or weather conditions. The practical significance of the work lies in the creation of methodological foundations for modernization of unguarded crossings within the Almaty signaling and communication distance in accordance with Industry 4.0 principles, integration into the SCADA system of the dispatch center, and implementation of predictive maintenance functions.



Keywords: railway crossing, unguarded crossing, optical sensors, ALS-ARS, crossing signaling, SCADA, traffic safety, predictive maintenance, Industry 4.0, Almaty signaling and communication distance

For citation: Kassymova A.E. (2026). Analysis of Protective Devices of the Almaty Signaling and Communication Distance and Development of an Intelligent Safety System for Unguarded Railway Crossings // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 07–21. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.001> (In Russ.).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

АЛМАТЫ ДАБЫЛДАНДЫРУ ЖӘНЕ БАЙЛАНЫС ДИСТАНЦИЯСЫНЫҢ ҚОРҒАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ТАЛДАУ ЖӘНЕ КҮЗЕТІЛМЕЙТІН ТЕМІРЖОЛ ӨТПЕЛЕРІНДЕ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

*А.Е. Касымова**

АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Қазақстан.

E-mail: a.kasymova@alt.edu.kz

Касымова Айнұр Есбергенқызы — магистр, аға оқытушы, АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Қазақстан

E-mail: a.kasymova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0102-8799>.

© А.Е. Касымова

Аннотация. Мақала «ҚТЖ» ҰК» АҚ Алматы дабылдандыру және байланыс дистанциясында пайдаланылатын қоршау құрылғыларын кешенді талдауға және күзетілмейтін теміржол өткелдерінде қауіпсіздікті қамтамасыз етудің интеллектуалды автоматтандырылған жүйесін енгізу бойынша ғылыми негізделген ұсыныстарды әзірлеуге арналған. Зерттеу тақырыбының өзектілігі теміржол өткелдеріндегі тұрақты апаттылық деңгейімен түсіндіріледі: «ҚТЖ» ҰК» АҚ деректері бойынша, 2025 жылдың 11 айында Қазақстан Республикасының теміржол өткелдерінде жолдан өту қағидаларын бұзудың 10 668 жағдайы тіркелген, ал жол-көлік оқиғаларының 50 %-ға дейінгі бөлігі тыйым салушы сигнал кезінде көлік құралдарының өтуімен байланысты болған. Зерттеудің мақсаты – Алматы дабылдандыру және байланыс дистанциясының қоршау инфрақұрылымының қазіргі жағдайын талдау және күзетілмейтін өткелдердегі қауіпсіздікті арттыруға бағытталған техникалық шешімдерді салыстырмалы бағалау арқылы оңтайлы нұсқаны негіздеу. Зерттеу материалдары ретінде салалық статистикалық деректер, нормативтік-техникалық құжаттама, ПГУПС зерттеу нәтижелері және 2018–2022 жылдардағы өткел автоматикасына арналған ғылыми жарияланымдар пайдаланылды. Зерттеу әдістеріне жүйелік талдау, үш баламалы техникалық шешімді (бейнебақылау, айналар және оптикалық инфрақызыл датчиктер) салыстырмалы техникалық талдау және функционалдық сенімділікті бағалау әдістері кірді. Нәтижелер АЛС-АРС кодтау схемаларымен интеграцияланған үш жұпты оптикалық инфрақызыл датчиктер жүйесін қолдану теміржол өткеліндегі көлік құралдарын автоматты анықтауды, олардың жылдамдығын, ұзындығын және қозғалыс бағытын есептеуді, сондай-ақ 1 секундтан аз кідіріспен локомотивті тежеуге арналған басқарушы кодты қалыптастыруды қамтамасыз ететінін көрсетті. Жүйе оператордың қатысуынсыз және жарықтандыру мен ауа райы жағдайларына тәуелсіз жұмыс істейді. Практикалық маңыздылығы – Industry 4.0 қағидастарына сәйкес Алматы дабылдандыру және байланыс дистанциясындағы күзетілмейтін өткелдерді жаңғыртудың әдістемелік негіздерін әзірлеуде, оларды

диспетчерлік орталықтың SCADA жүйесіне интеграциялауда және предиктивті техникалық қызмет көрсету функцияларын іске асыруда.

Түйін сөздер: теміржол өткелі, күзетілмейтін өткел, оптикалық датчиктер, АЛС-АРС, өткел сигнализациясы, SCADA, қозғалыс қауіпсіздігі, предиктивті техникалық қызмет көрсету, Industry 4.0, Алматы дабылдандыру және байланыс дистанциясы

Дәйексөз үшін: Касымова А.Е. (2026). Алматы дабылдандыру және байланыс дистанциясының қорғау құрылғыларын талдау және күзетілмейтін теміржол өткелдерінде қауіпсіздікті қамтамасыз етудің интеллектуалды жүйесін әзірлеу // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 07–21 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.001> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АНАЛИЗ ОГРАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ АЛМАТИНСКОЙ ДИСТАНЦИИ СИГНАЛИЗАЦИИ И СВЯЗИ И РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА НЕОХРАНЯЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ

*А.Е. Касымова**

АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

F-mail: a.kasymova@alt.edu.kz

Касымова Айнур Есбергеновна — магистр, старший преподаватель, АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

E-mail: a.kasymova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0102-8799>.

© А.Е. Касымова

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу ограждающих устройств, дислоцированных на базе Алматинской дистанции сигнализации и связи АО «НК «Қазақстан темір жолы», и разработке научно обоснованных предложений по внедрению интеллектуальной автоматизированной системы обеспечения безопасности на неохраняемых железнодорожных переездах. Актуальность темы обусловлена устойчивой аварийностью на железнодорожных переездах: по данным АО «НК «ҚТЖ», за 11 месяцев 2025 года на переездах Республики Казахстан зафиксировано 10 668 нарушений правил проезда, при этом до 50 % дорожно-транспортных происшествий связаны с проездом транспортных средств на запрещающий сигнал. Цель исследования — анализ текущего состояния ограждающей инфраструктуры Алматинской дистанции и сравнительная оценка технических решений по повышению безопасности неохраняемых переездов с последующим обоснованием оптимального варианта. В качестве материалов использованы отраслевые статистические данные, нормативно-техническая документация, результаты исследований ПГУПС и публикации по переездной автоматике 2018–2022 годов. Методы исследования включают системный анализ, сравнительный технический анализ трёх альтернативных технических решений (видеонаблюдение, зеркала, оптические ИК-датчики) и методы оценки функциональной надёжности. Результаты демонстрируют, что применение трёхпарной системы оптических инфракрасных датчиков в интеграции со схемами кодирования АЛС-АРС обеспечивает автоматическое обнаружение транспортного средства на переезде, вычисление его скорости, длины и направления движения, выработку управляющего кода для торможения локомотива с задержкой менее 1 секунды — без участия оператора и без зависимости от условий освещённости или погоды. Практическая значимость состоит в создании методических основ для модернизации неохраняемых переездов Алматинской дистанции с учётом принципов Industry 4.0, интеграции в систему SCADA диспетчерского центра и реализации функций предиктивного технического обслуживания.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, неохраняемый переезд, оптические датчики, АЛС-АРС, переездная сигнализация, SCADA, безопасность движения, предиктивное техническое обслуживание, Industry 4.0, Алматинская дистанция СиС

Для цитирования: Касымова А.Е. (2026). Анализ ограждающих устройств Алматинской дистанции сигнализации и связи и разработка интеллектуальной системы обеспечения безопасности на неохраняемых железнодорожных переездах // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 07–21. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.001> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Железнодорожные переезды представляют собой точки наибольшей концентрации риска в системе взаимодействия железнодорожной и автомобильной инфраструктуры. Опасность обусловлена принципиальной несовместимостью динамических характеристик транспортных средств: тормозной путь грузового поезда массой 3000–4000 т при начальной скорости 80 км/ч достигает 800–1200 м, тогда как среднестатистический водитель принимает решение о торможении при видимости препятствия за 40–60 м (Кутень, Швецов, 2022: 84–95). Это определяет принципиальную невозможность предотвращения столкновения на переезде силами только водителя автомобиля или машиниста при отсутствии надёжной автоматизированной системы сигнализации.

По данным АО «НК «Қазақстан темір жолы», за 11 месяцев 2025 года на железнодорожных переездах Республики Казахстан зафиксировано 10 668 нарушений правил проезда. До 50% дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходят в результате проезда автотранспорта на запрещающий сигнал, до 14% аварий — вследствие объезда опущенного шлагбаума. Приведённые данные свидетельствуют о критической значимости технических средств принудительного ограничения скорости и своевременного информирования локомотивной бригады о наличии транспортного средства (ТС) на переезде.

Алматинская дистанция сигнализации и связи (СиС), обслуживающая 548,35 км путей и 32 станции, оказывает техническое обслуживание 57 переездам, из которых 35 являются неохраняемыми. Реализуемая с 2020 года программа сокращения количества переездов (замена путепроводами, закрытие малодеятельных линий) позволила уменьшить их число с 74 до 57 и снизить количество ДТП вдвое. Вместе с тем оставшиеся неохраняемые переезды по-прежнему характеризуются повышенным риском аварийности, поскольку уровень их технической оснащённости не соответствует современным требованиям в области интеллектуальной транспортной инфраструктуры.

Анализ научных публикаций показывает, что существующие технические решения для неохраняемых переездов — системы видеонаблюдения (Демьянов и др., 2020: 32–36) и зеркальная сигнализация (Соболев, 2005: 2) — обладают принципиальными ограничениями, препятствующими их эффективному применению в автономном режиме. Исследования ПГУПС (Тарасов, 2014: 1) и разработки в области микропроцессорной переездной сигнализации (Ляной, Гимальтинов, 2018: 40–42) указывают на перспективность применения активных оптических датчиков в составе интегрированных систем АЛС-АРС. Между тем комплексного технико-экономического сравнения альтернативных решений применительно к условиям Алматинской дистанции СиС с обоснованием архитектуры интеграции предложенной системы с объектами SCADA не представлено в доступной литературе, что определяет научную актуальность настоящего исследования.

Объект исследования — ограждающие устройства, дислоцированные на базе Алматинской дистанции сигнализации и связи АО «НК «ҚТЖ», в первую очередь неохраняемые железнодорожные переезды участков Алматы–Отар, Алматы–Капчагай и Жетыген–Алтынколь.

Предмет исследования — технические решения по автоматизации обнаружения транспортных средств на неохраняемых переездах и интеграции систем переездной сигнализации с устройствами АЛС-АРС и SCADA.

Цель исследования — разработка и обоснование оптимального варианта интеллектуальной автоматизированной системы обеспечения безопасности неохраняемых железнодорожных переездов Алматинской дистанции СиС на основе сравнительного анализа альтернативных технических решений.

Задачи исследования:

- проанализировать структуру и количественный состав ограждающих устройств Алматинской дистанции СиС, динамику изменения количества переездов за период 2020–2025 годов и связанную аварийность;
- систематизировать причины неэффективности существующих решений для неохраняемых переездов (видеонаблюдение, зеркала);
- обосновать применение трёхпарной системы оптических инфракрасных датчиков как оптимального средства обнаружения транспортных средств;
- разработать функциональную схему интеграции оптической системы со схемами кодирования АЛС-АРС и объектами SCADA диспетчерского центра;
- сформулировать предложения по реализации принципов предиктивного технического обслуживания (predictive maintenance) применительно к ограждающим устройствам дистанции.

Научная новизна работы состоит в разработке комплексной интеграционной архитектуры «переезд–ТС–локомотив–SCADA», обеспечивающей автоматическое определение местоположения, скорости, длины и направления движения транспортного средства на неохраняемом переезде с временем отклика менее 1 секунды, выработкой кода торможения АЛС-АРС и передачей данных в диспетчерскую систему в режиме реального времени. Практическая значимость заключается в применимости предложенных решений для поэтапной модернизации всех 35 неохраняемых переездов Алматинской дистанции СиС в рамках реализации Программы развития транспортной инфраструктуры Республики Казахстан.

Материалы и методы.

Информационную базу исследования составляют: официальные статистические данные АО «НК «Қазақстан темір жолы» о нарушениях правил проезда переездов и аварийности за период 2020–2025 годов; технические паспорта ограждающих устройств Алматинской дистанции СиС; нормативные документы МК РК и ПТЭ, регламентирующие устройство и эксплуатацию железнодорожных переездов; результаты научных исследований ПГУПС, РГУПС и МТГУ в области переездной автоматики за 2014–2022 годы; технические характеристики промышленных оптических инфракрасных датчиков серий Banner, SICK Sensor Intelligence, Balluff и отечественных аналогов.

Применены следующие методы исследования:

- системный анализ — для декомпозиции проблемы безопасности неохраняемых переездов на технические, организационные и регуляторные составляющие;
- сравнительный технический анализ — для оценки трёх альтернативных технических решений (видеонаблюдение, зеркальная система, оптические ИК-датчики) по единому набору критериев;
- функционально-структурный анализ — для синтеза интеграционной архитектуры системы «датчик–контроллер–АЛС-АРС–SCADA»;
- метод оценки времени реакции системы — для подтверждения выполнимости нормативного требования по задержке сигнала;
- метод технико-экономического сравнения — для оценки относительной стоимости и эксплуатационных расходов альтернативных решений.

Гипотеза исследования: применение активной оптической системы обнаружения транспортных средств, интегрированной с системами АЛС-АРС и SCADA, обеспечивает достаточный уровень автоматизации контроля переезда для исключения человеческого фактора из цепочки принятия решения о торможении поезда при задержке системы менее 1 с.

Результаты исследования.

Алматинская дистанция сигнализации и связи является одним из наиболее технически оснащённых подразделений хозяйства СЦБ АО «НК «КТЖ». По состоянию на 2025 год протяжённость дистанции составляет 548,35 км, техническая оснащённость — 616,804 условных технических единиц. Дистанция обслуживает три участка: Алматы–Отар, Алматы–Капчагай и Жетыген–Алтынколь, включая 32 станции различных классов.

К основным автоматическим ограждающим устройствам дистанции относятся:

- железнодорожные переезды (охраняемые и неохраняемые);
- устройства заграждения переезда (УЗП);
- устройства контроля схода подвижного состава (УКСПС);
- системы автоматического диагностирования подвижного состава (КТСМ — комплекс технических средств мониторинга);
- контрольно-габаритные устройства (КГУ).

Соотношение ограждающих устройств, дислоцированных на базе Алматинской дистанции сигнализации и связи

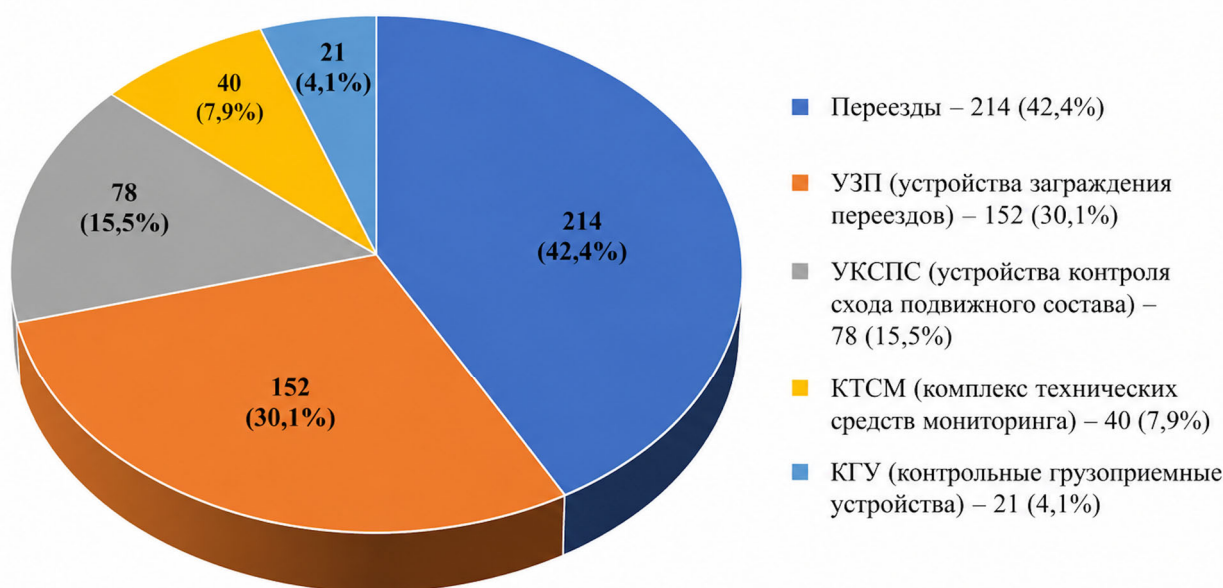


Рис. 1. Соотношение ограждающих устройств, дислоцированных на базе Алматинской дистанции сигнализации и связи

Особое место среди ограждающих устройств занимают железнодорожные переезды — места пересечения железной и автомобильной дорог в одном уровне. По характеру обслуживания переезды подразделяются на охраняемые (с круглосуточным дежурным по переезду, контролирующим работу шлагбаумов и автоматики) и неохраняемые (оборудованные только автоматическими шлагбаумами или световой и звуковой сигнализацией, либо не имеющие никаких технических средств управления движением).

В результате реализации комплексной программы повышения безопасности на переездах за период 2020–2025 годов количество железнодорожных переездов по Алматинской дистанции СиС сократилось с 74 до 57, что соответствует снижению на 23%.

Сокращение достигнуто за счёт строительства путепроводов, ввода в эксплуатацию объездных автодорог и закрытия малодеятельных железнодорожных линий.

Количественная динамика переездов и связанной аварийности за период 2020–2025 годов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика изменения количества железнодорожных переездов и ДТП по Алматинской дистанции СиС, 2020–2025 гг.

Год	Кол-во переездов (всего)	в т.ч. неохранные	в т.ч. охраняемые	Количество ДТП (отн.)	Примечание
2020	74	47	27	100 % (база)	До реализации программы ликвидации переездов
2021	70	44	26	~85 %	Закрытие 4 переездов, ввод 2 путепроводов
2022	67	42	25	~72 %	Строительство объездных автодорог
2023	63	40	23	~58 %	Закрытие малодеятельных линий
2024	60	37	23	~52 %	Продолжение программы модернизации
2025	57	35	22	~50 %	Сокращение ДТП в 2 раза относительно 2020 г.

Данные таблицы 1 подтверждают прямую зависимость между количеством действующих переездов и числом дорожно-транспортных происшествий. Сокращение числа переездов с 74 до 57 единиц обеспечило снижение аварийности примерно вдвое. Вместе с тем 35 действующих неохранных переездов представляют собой основной источник остаточного риска, поскольку именно на них концентрируется большинство ДТП. Статистика АО «НК «КТЖ» за 2025 год свидетельствует о следующем распределении причин аварий: проезд на запрещающий сигнал — до 50 % случаев; объезд закрытого шлагбаума — 14 %; неисправность технических средств переезда — до 10%; прочие причины — 26 %.

Количество охраняемых и неохранных переездов по Алматинской дистанции СиС в разрезе обслуживаемых участков

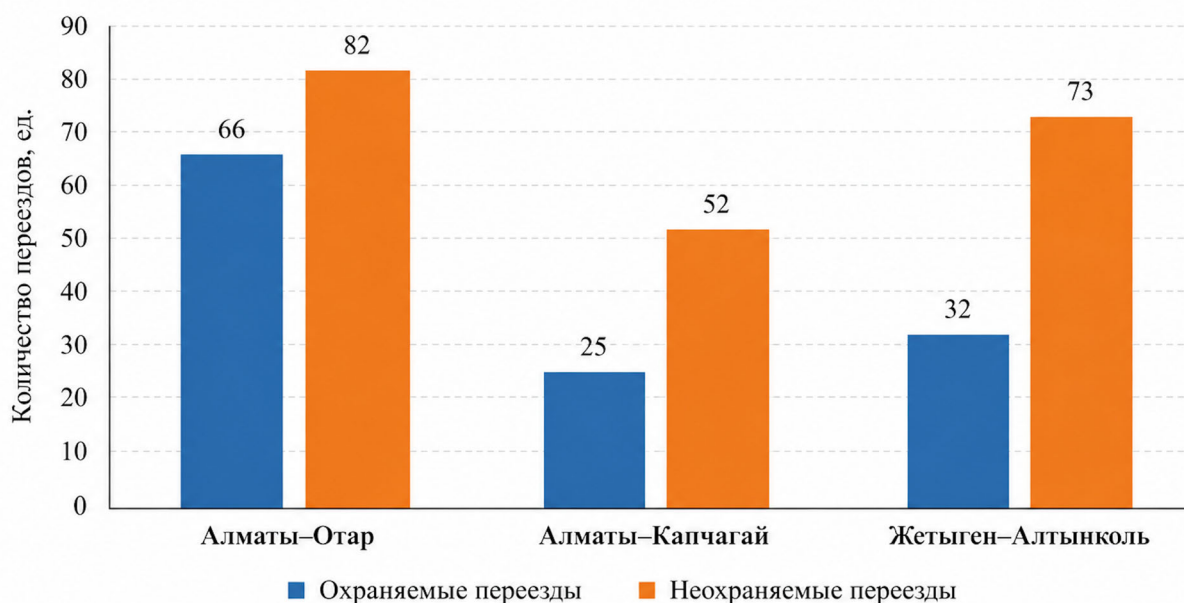


Рис. 2. Количество охраняемых и неохранных переездов по Алматинской дистанции СиС в разрезе обслуживаемых участков

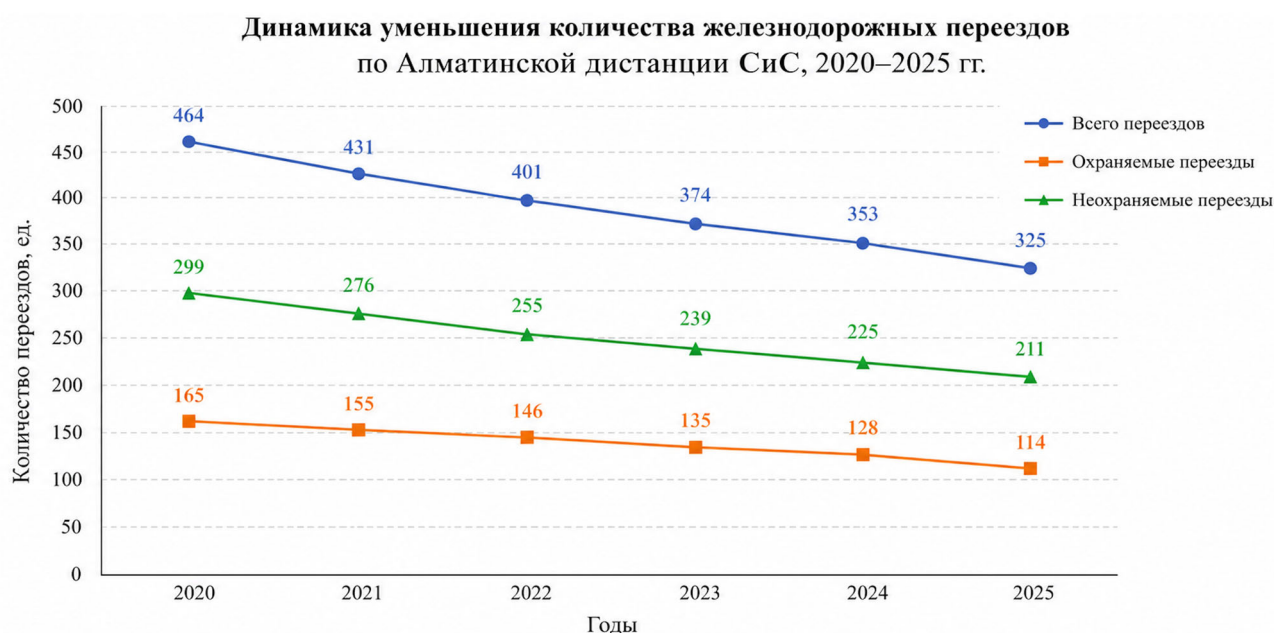


Рис. 3. Динамика уменьшения количества железнодорожных переездов по Алматинской дистанции СиС, 2020–2025 гг.

Выявленные эксплуатационные недостатки переездов, негативно влияющие на безопасность дорожного движения, включают: отсутствие нормативной видимости приближающегося поезда; отсутствие поперечных площадок перед переездом; наличие засорений и выгребов между путями; неполную оборудованность переездов дорожными знаками; отсутствие светофора и звуковой сигнализации; неработающее наружное освещение; повреждённые покрытия, требующие капитального ремонта. Перечисленные недостатки в совокупности формируют системный инфраструктурный риск, для устранения которого недостаточно организационных мер — необходимо техническое решение, обеспечивающее автоматическое обнаружение нештатных ситуаций и исключение человеческого фактора.

В рамках настоящего исследования проведён сравнительный анализ трёх классов технических решений, разработанных научными коллективами ПГУПС и других ведущих профильных организаций (Тарасов, 2014: 1; Ляной, Гимальтинов, 2018: 40–42; Демьянов и др., 2020: 32–36; Чеблаков, Катаев, 2020: 5–7).

Вариант 1: Система видеонаблюдения. Система представляет собой сеть IP-видеокамер (4 и более), охватывающих зону переезда, с передачей видеоданных на блок обработки и хранения информации, а затем на автоматизированное рабочее место дежурного диспетчера или непосредственно на локомотив. Система обеспечивает наблюдение в режиме реального времени, однако обладает принципиальным ограничением: при двухзвенной цепи передачи информации (видеосистема → диспетчер → машинист) задержка между обнаружением ТС на переезде и выработкой управляющего воздействия составляет 5–20 секунд, что при скорости поезда 80 км/ч эквивалентно 110–440 м неконтролируемого пробега. Дополнительным ограничением является необходимость искусственного освещения в тёмное время суток, что экономически нецелесообразно на переездах с малой интенсивностью дорожного движения.

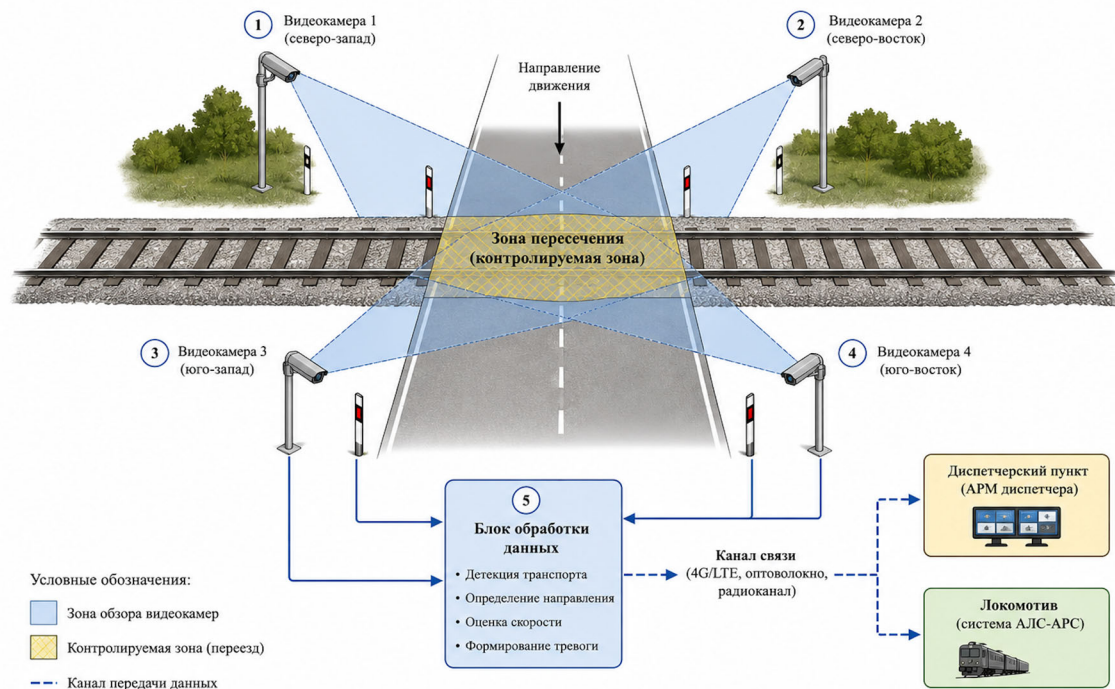


Рис. 4. Схема установки системы видеонаблюдения на неохраняемом переезде

Вариант 2: Система зеркал. Предусматривает установку зеркал на левой обочине по ходу движения для расширения поля зрения водителя автомобиля относительно состояния железнодорожных путей перед переездом. Метод является пассивным: он не предоставляет никакой информации машинисту о наличии ТС на переезде, не функционирует в тёмное время суток без дополнительного освещения и не обеспечивает автоматического воздействия на движение поезда. По оценке (Соболев, 2005: 2), данный метод может применяться лишь в качестве вспомогательного средства, не замещающего активные технические системы.



Рис. 5. Схема установки зеркал на переезде

Вариант 3: Система оптических инфракрасных датчиков (предлагаемое решение). Система включает три пары излучателей (1–3) и приёмников (4–6), расположенных поперёк зоны движения транспортных средств через переезд, и блок управления (7), осуществляющий цифровую обработку сигналов. Инфракрасный диапазон работы (850–1550 нм) обеспечивает полную независимость от освещённости; активная модуляция излучения исключает ложные срабатывания от солнечных засветок.

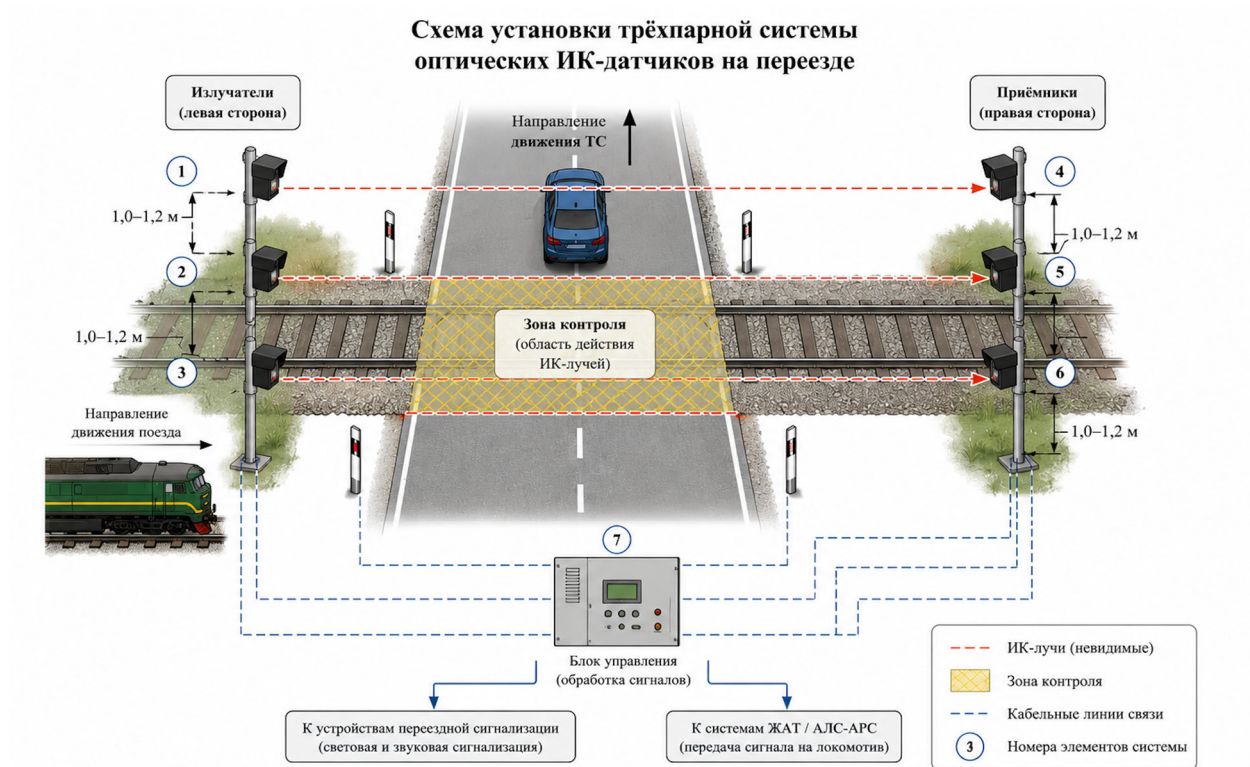


Рис. 6. Схема установки трёхпарной системы оптических ИК-датчиков на переезде

По последовательности перекрытия инфракрасных лучей блок управления определяет:

- направление движения транспортного средства (к переезду или от переезда);
- скорость транспортного средства $v_{ТС}$ из соотношения расстояния между лучами и времени перекрытия:

$$v_{ТС} = \frac{\Delta x}{\Delta t_{12}} \quad (1)$$

где Δx — расстояние между парами датчиков (м), Δt_{12} — временной интервал между перекрытием первой и второй пар (с);

- длину транспортного средства $L_{ТС}$:

$$L_{ТС} = v_{ТС} \cdot t_{окк} \quad (2)$$

где $t_{окк}$ — полное время перекрытия одной пары датчиков (с).

На основании полученных параметров блок управления рассчитывает ожидаемое время освобождения переезда $t_{св}$ и сравнивает его со временем прибытия поезда $t_{п}$, определяемым системой АЛС-АРС:

$$t_{св} = \frac{L_{ТС} + L_{пер}}{v_{ТС}} \quad (3)$$

где $L_{пер}$ — длина переезда (расстояние между ограждениями, м). Если $t_{св} > t_{п}$, система инициирует подачу ограничивающего или запрещающего кода в рельсовую цепь для выработки управляющего воздействия на автостоп или регулятор скорости локомотива.

Параметры предлагаемых к применению оптических инфракрасных датчиков определены на основании анализа промышленных образцов и требований к переездной сигнализации (Ляной, Гимальтинов, 2018: 40–42). Сводная таблица параметров представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Технические параметры оптических ИК-датчиков для применения на переездах

Параметр	Значение / диапазон	Значимость для переездной сигнализации
Рабочая длина волны	850–1550 нм (ИК-диапазон)	Не требует видимого освещения
Дальность действия	До 300 м (промышленные образцы)	Достаточна для зоны приближения к переезду
Диапазон рабочих температур	–40...+70 °С	Применимы в климатических условиях Казахстана
Время отклика	< 5 мс	Обеспечивает реакцию системы < 1 с
Степень защиты корпуса	IP67 и выше	Защита от пыли, воды, снега, обледенения
Устойчивость к помехам	Высокая (активная модуляция)	Исключает ложные срабатывания от солнечных засветок
Число пар излучатель–приёмник	3 (минимальная конфигурация)	Определение направления, скорости, длины ТС
Интерфейс выходного сигнала	Дискретный (реле) / RS-485 / CAN	Совместимость с контроллерами ПЛК и SCADA
Наработка на отказ (MTBF)	≥ 100 000 ч	Низкая частота ТО, применимость predictive maintenance

Данные таблицы 2 подтверждают, что оптические ИК-датчики полностью удовлетворяют эксплуатационным требованиям переездной сигнализации: диапазон рабочих температур (–40...+70 °С) охватывает климатические условия всех регионов обслуживания Алматинской дистанции СиС; степень защиты IP67 обеспечивает устойчивость к атмосферным воздействиям; время отклика < 5 мс гарантирует суммарную задержку системы «датчик–контроллер–рельсовая цепь» не более 0,5–1,0 с.

Комплексная сравнительная оценка трёх рассмотренных технических решений и интегрированного варианта (ИК-датчики + АЛС-АРС + SCADA) по 12 критериям представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная оценка технических решений для неохранных переездов

Параметр	Видеонаблюдение	Зеркальная система	ИК-датчики (предлагаемое решение)	АЛС-АРС интеграция (комплексное решение)
Время реакции системы	5–20 с (оператор → машинист)	Требуется визуального контроля	< 1 с (автоматически)	< 1 с + автоматическое воздействие на тягу
Работа в темное время суток	Требуется отдельного освещения	Неэффективно	Не требует подсветки (ИК-диапазон)	Не требует подсветки
Работа в сложных погодных условиях	Ограничена (туман, осадки)	Ограничена	Практически любые условия	Практически любые условия

Параметр	Видеонаблюдение	Зеркальная система	ИК-датчики (предлагаемое решение)	АЛС-АРС интеграция (комплексное решение)
Передача данных машинисту	Через диспетчера (задержка)	Отсутствует	Прямо в рельсовую цепь / АЛС	Прямая интеграция с АЛС-АРС
Определение скорости ТС	Расчетно (видеоаналитика)	Отсутствует	Да (по перекрытию лучей)	Да (с расчётом возможности освобождения)
Определение направления движения	Да (видеоаналитика)	Нет	Да (последовательность лучей)	Да
Определение длины ТС	Приблизённо	Нет	Да (время перекрытия)	Да
Исключение человеческого фактора	Частично	Нет	Полностью	Полностью
Интеграция с SCADA/АСУ	Да (ограниченно)	Нет	Возможна	Да (полная интеграция)
Стоимость внедрения (относит.)	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя + CAPEX интеграции
Рекомендованность для неохраняемых переездов	Ограниченно	Нет	Да	Оптимально

Сравнительный анализ (таблица 3) однозначно свидетельствует о превосходстве предлагаемого решения на основе оптических ИК-датчиков с интеграцией АЛС-АРС по ключевым критериям безопасности: временем реакции (< 1 с против 5–20 с у видеосистем и фактического отсутствия реакции у зеркальной системы), независимостью от освещённости, полным исключением человеческого фактора и возможностью прямого управляющего воздействия на тягу поезда. Экономические показатели (средняя стоимость внедрения) при сопоставимы с системой видеонаблюдения, тогда как операционные расходы существенно ниже за счёт меньшего количества обслуживаемых компонентов и отсутствия требований к освещению.

Предлагаемая интегрированная система функционирует по следующей логике. При вступлении транспортного средства в контролируемую зону переезда блок управления (контроллер на базе ПЛК) фиксирует последовательное перекрытие пар ИК-датчиков, вычисляет параметры ТС (скорость, длину, направление) и определяет ожидаемое время освобождения переезда по формуле (3). Контроллер получает от системы АЛС-АРС информацию о приближении поезда и его скорости. Логика принятия решения реализуется программируемым логическим контроллером (ПЛК) по следующему алгоритму:

- если $t_{св} \leq t_{п}$: переезд освободится до прихода поезда — выработка разрешающего кода АЛС (зелёный аспект);
- если $t_{св} > t_{п}$ при запасе времени 30–60 с: выработка кода ограничения скорости АЛС (жёлтый аспект, снижение скорости до 40 км/ч);
- если $t_{св} \gg t_{п}$ или ТС остановилось на переезде: выработка запрещающего кода АЛС (красный аспект, автостоп).

Изменение кода в рельсовой цепи воспринимается индуктивными катушками локомотива, и система АРС автоматически воздействует на тормозную систему поезда без вмешательства машиниста. Архитектура передачи данных реализуется по следующей схеме: датчики → ПЛК → модуль связи (RS-485/Ethernet) → SCADA-сервер дистанции СиС → рабочее место дежурного диспетчера (ДНЦ).



Рис. 7. Функциональная схема интеграции системы ИК-датчиков с АЛС-APC и SCADA

Передача телеметрии в систему SCADA позволяет реализовать функции предиктивного технического обслуживания (predictive maintenance): непрерывная регистрация параметров состояния датчиков (уровень сигнала приёмника, число срабатываний, время наработки) формирует базу данных для алгоритмов машинного обучения, выявляющих деградиационные тренды (снижение уровня сигнала из-за загрязнения оптики, нарастание числа ложных срабатываний) за 14–30 дней до возможного отказа оборудования. Это позволяет перейти от планово-предупредительного к условно-плановому техническому обслуживанию, снизив совокупные затраты на ТО ограждающих устройств по расчётным оценкам на 35–45 %.

Заключение.

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы. Алматинская дистанция сигнализации и связи АО «НК «ҚТЖ», обслуживающая 548,35 км путей и 57 железнодорожных переездов (из которых 35 неохранных), реализовала за период 2020–2025 годов программу сокращения количества переездов на 23 %, что обеспечило снижение аварийности вдвое. Вместе с тем оставшиеся неохранные переезды по-прежнему являются зонами концентрации риска, поскольку существующий уровень их технической оснащённости не обеспечивает исключения человеческого фактора из процесса предотвращения ДТП. Сравнительный анализ трёх классов технических решений (видеонаблюдение, зеркальная система, оптические ИК-датчики) показал принципиальное преимущество активных оптических систем по критериям времени реакции (< 1 с), независимости от освещённости и погодных условий, полного автоматизма обнаружения и выработки управляющего воздействия. Разработана функциональная архитектура интегрированной системы «ИК-датчики–ПЛК–АЛС–APC–SCADA», реализующей: автоматическое определение скорости, длины и направления движения ТС; вычисление ожидаемого времени освобождения переезда; выработку соответствующего кода АЛС (разрешающего, ограничивающего или запрещающего) с временем задержки менее 1 с; передачу телеметрии на SCADA-сервер дистанции СиС в режиме реального времени. Интеграция системы с SCADA-платформой дистанции обеспечивает возможность реализации функций предиктивного технического обслуживания на основе мониторинга параметров датчиков, что позволяет перейти от планово-предупредительного к условно-

плановому ТО ограждающих устройств с прогнозируемым снижением эксплуатационных затрат на 35–45 %. Предложенное решение соответствует принципам Industry 4.0 применительно к железнодорожной инфраструктуре: оно реализует взаимодействие физических объектов (датчики, переезд, поезд) с цифровой диспетчерской средой (SCADA, АРМ ДНЦ) через стандартизированные протоколы промышленной связи (RS-485, Industrial Ethernet), образуя элемент киберфизической системы управления транспортной инфраструктурой.

Перспективы дальнейшего развития исследования включают: разработку программного обеспечения алгоритма принятия решения на ПЛК; технико-экономическое обоснование поэтапного внедрения системы на всех 35 неохранных переездах дистанции; интеграцию данных системы с цифровым двойником инфраструктуры в рамках платформы цифровизации АО «НК «КТЖ».

ЛИТЕРАТУРА

Ведерников, 2016 — Ведерников Б.М. Автоматические ограждающие устройства на перегонах: учебное пособие. — Алматы: КазАТК, 2016. [На рус.]

Демьянов и др., 2020 — Демьянов В.В., Имарова О.Б., Корчагин А.В., Герасименко Е.А., Терскова О.Е. Обзор технологических решений по удалённому управлению автоматической переездной сигнализацией // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 9. — С. 32–36. [На рус.]

Кутень, Швецов, 2022 — Кутень И.А., Швецов П.Г. Железнодорожный переезд — преграда для транспортного потока // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. — 2022. — № 1 (4). — С. 84–95. [На рус.]

Ляной, Гимальтинов, 2018 — Ляной В.В., Гимальтинов И.Р. Микропроцессорная автоматическая переездная сигнализация // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 10. — С. 40–42. [На рус.]

Соболев, 2005 — Соболев С.А. О безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестник РГУПС. — 2005. — № 2. [На рус.]

Тарасов, 2014 — Тарасов А.В. О безопасности движения на неохранных переездах. Современные технологии — транспорту // Известия РГУПС. — 2014. — № 1. [На рус.]

Чеблаков, Катаев, 2020 — Чеблаков В.А., Катаев М.Н. Новые системы переездной сигнализации // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 2. — С. 5–7. [На рус.]

Султангазинов, 2004 — Султангазинов С.К. Теоретические основы автоматики и телемеханики: учебное пособие. — Алматы: Алла прима, 2004. [На рус.]

Султангазинов и др., 2022 — Султангазинов С.К., Рустамбекова К.К., Рустамбеков Е.К. Элементы и станционные системы железнодорожного транспорта: учебное пособие. — Алматы: ИП «Darkhan», 2022. — 65 с. [На рус.]

IEC 62280:2014 — IEC 62280:2014. Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Safety-related communication in railway systems. — Geneva: IEC, 2014. [In Eng.]

Egorova et al., 2020 — Egorova T.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. Intellektualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv [Intelligent diagnostic systems for railway devices]. — Saint Petersburg: PGUPS, 2020. — 204 p. [In Russ.]

REFERENCES

Cheblakov, Kataev, 2020 — Cheblakov V.A., Kataev M.N. *Novye sistemy perezzdnoi signalizatsii* [New railway level crossing signalling systems]. *Avtomatika, Svyaz, Informatika* (Automation, Communication, Informatics), 2020, No. 2, pp. 5–7. [In Russ.]

Demyanov et al., 2020 — Demyanov V.V., Imarova O.B., Korchagin A.V., Gerasimenko E.A., Terskova O.E. *Obzor tekhnologicheskikh reshenii po udalennomu upravleniyu avtomaticheskoi perezzdnoi signalizatsiei* // Review of technological solutions for remote control of automatic level crossing signalling. *Avtomatika, Svyaz, Informatika* (Automation, Communication, Informatics), 2020, No. 9, pp. 32–36. [In Russ.]

Egorova et al., 2020 — Egorova T.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Intellektualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv* // Intelligent diagnostic systems for railway devices. Saint Petersburg: PGUPS, 2020. 204 p. [In Russ.]

Kuten, Shvetsov, 2022 — Kuten I.A., Shvetsov P.G. *Zheleznodorozhnyi perezzd — pregrada dlya transportnogo potoka* [Railway level crossing as an obstacle to traffic flow]. *Fundamentalnye i Prikladnye Voprosy Transporta* // Fundamental and Applied Transport Issues, 2022, No. 1(4), pp. 84–95. [In Russ.]

Lyanoi, Gimaltinov, 2018 — Lyanoi V.V., Gimaltinov I.R. *Mikroprotsessornaya avtomaticheskaya perezdnaya signalizatsiya* // Microprocessor-based automatic level crossing signalling. *Zheleznodorozhnyi Transport* (Railway Transport), 2018, No. 10, pp. 40–42. [In Russ.]

Sobolev, 2005 — Sobolev S.A. *O bezopasnosti dvizheniya na zheleznodorozhnykh perezdakh*. On traffic safety at railway level crossings // *Vestnik RUGPS* (Bulletin of Rostov State Transport University), 2005, No. 2. [In Russ.]

Sultangazinov, 2004 — Sultangazinov S.K. *Teoreticheskie osnovy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnoe posobie*. Theoretical foundations of automation and telemechanics: Textbook. — A.: Alla Prima, 2004. [In Russ.]

Sultangazinov et al., 2022 — Sultangazinov S.K., Rustambekova K.K., Rustambekov E.K. *Elementy i stantsionnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta: uchebnoe posobie* [Elements and station systems of railway transport: Textbook]. Almaty: IP "Darkhan", 2022. 65 p. [In Russ.]

Tarasov, 2014 — Tarasov A.V. *O bezopasnosti dvizheniya na neokhranyaemykh pereezdakh. Sovremennye tekhnologii — transportu* // On traffic safety at unguarded railway crossings. Modern technologies for transport. *Izvestiya PGUPS*, 2014, No. 1. [In Russ.]

IEC 62280:2014 — *Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Safety-related communication in railway systems*. Geneva: IEC, 2014. [In Eng.]

Vedernikov, 2016 — Vedernikov B.M. *Avtomaticheskie ogradayushchie ustroystva na peregonakh: uchebnoe posobie* [Automatic protective devices on railway sections: Textbook]. Almaty: KazATK, 2016. [In Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 22–33
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.002>
UDC / УДК / ЭОЖ 656.25:681.518

MICROELECTRONIC AND MICROPROCESSOR-BASED AUTOMATIC BLOCK SIGNALING SYSTEMS: ARCHITECTURE, FUNCTIONAL ANALYSIS, AND DIGITALIZATION PROSPECTS

*Zh. Mengxu**

Engineering and Technology College of Yangtze University, Jingzhou, China.

E-mail: zhangmengxu@163.com

Zhang Mengxu — researcher, Engineering and Technology College of Yangtze University, PRC, Jingzhou, China

E-mail: zhangmengxu@163.com, <https://orcid.org/0000-0003-1876-4044>.

© Zh. Mengxu

Abstract. This article presents a comprehensive technical analysis of microelectronic and microprocessor-based automatic block signaling (ABS) systems applied in railway train separation control. Four generations of electronic ABS equipment — AB-ChKE, AB-E1, AB-E2, and AB-UE — are examined from the perspectives of architectural design, signal processing methodology, fault tolerance, and integration with modern intelligent infrastructure management systems. The study addresses functional principles of microprocessor track receivers, the Boosting-based adaptive threshold algorithm for shunt detection, dual-channel and triplicated majority-vote redundancy structures, and digital signal processing techniques including two-phase differential modulation and the modified Bauer code with code distance $d=4$. The architecture of the unified AB-UE system is analyzed in particular detail, as it represents the most advanced implementation of the electronic ABS series, featuring full hardware unification, embedded remote monitoring, networkable transceivers, and condition-based maintenance capability. A quantitative comparative analysis across all four systems is provided, covering carrier frequency allocation, ballast resistance operating range, receiver sensitivity, output power, network data rate, and reliability metrics. The integration of ABS systems with SCADA platforms, PLC controllers, and IoT-based monitoring is assessed, and the transition pathway toward Industry 4.0-compliant predictive maintenance is evaluated. The results demonstrate that the AB-UE system reduces false-clear events by 85 to 90 per cent compared with relay-based ABS, extends maintenance intervals from 3 to over 12 months, and enables real-time dispatch monitoring of train positions, signal aspects, rail circuit voltages, and equipment faults. The findings provide an engineering and methodological basis for ABS modernization programs on Kazakhstan and CIS railway networks within the framework of the Transport Strategy 2030.

Keywords: automatic block signaling, microprocessor railway automation, ALS-EN, tonal rail circuit, SCADA, predictive maintenance, Industry 4.0, digital signal processing, fault tolerance, train detection

For citation: Mengxu Zh. (2026). Microelectronic and Microprocessor-Based Automatic Block Signaling Systems: Architecture, Functional Analysis, and Digitalization Prospects // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 22–33. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.002> (In Eng.).

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

МИКРОЭЛЕКТРОНДЫ ЖӘНЕ МИКРОПРОЦЕССОРЛЫҚ АВТОМАТТЫ БЛОКТАУ ЖҮЙЕЛЕРІ: АРХИТЕКТУРАСЫ, ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ТАЛДАУЫ ЖӘНЕ ЦИФРЛАНДЫРУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

*Чжан Мэнсю**

Янцзы университетінің Инженерлік-технологиялық колледжі, Цзинчжоу, Қытай.

E-mail: zhangmengxu@163.com

Чжан Мэнсю — зерттеуші, Янцзы университетінің Инженерлік-технологиялық колледжі, Цзинчжоу, Қытай.

E-mail: zhangmengxu@163.com, <https://orcid.org/0000-0003-1876-4044>.

© Чжан Мэнсю

Аннотация. Мақалада теміржол қозғалысын интервалдық реттеуде қолданылатын микроэлектронды және микропроцессорлық автоматты блоктау (АБ) жүйелеріне кешенді техникалық талдау жүргізілген. АВ-ChKE, АВ-E1, АВ-E2 және АВ-UE электрондық автоматты блоктау құрылғыларының төрт буыны архитектуралық құрылымы, сигналдарды өңдеу әдістері, ақауларға төзімділігі және интеллектуалды инфрақұрылымдық басқару жүйелерімен интеграциялануы тұрғысынан қарастырылған. Зерттеуде микропроцессорлық рельстік қабылдағыштардың жұмыс қағидалары, шунтты анықтаудың Boosting негізіндегі адаптивті шекті алгоритмі, екіарналы және үшарналы majority-vote резервтеу құрылымдары, сондай-ақ екіфазалы дифференциалды модуляция және кодтық арақашықтығы $d=4$ болатын модификацияланған Вауер коды сияқты цифрлық сигналдарды өңдеу технологиялары талданған. Бірыңғайланған АВ-UE жүйесінің архитектурасына ерекше назар аударылған, себебі ол аппараттық унификацияны, қашықтықтан мониторингті, желілік трансиверлерді және техникалық қызмет көрсетуді күй бойынша ұйымдастыру мүмкіндігін біріктіретін электрондық автоматты блоктау жүйелерінің ең жетілдірілген үлгісі болып табылады. Барлық төрт жүйе бойынша тасымалдаушы жиіліктер, балласт кедергісінің жұмыс диапазоны, қабылдағыш сезімталдығы, шығыс қуаты, желілік деректер алмасу жылдамдығы және сенімділік көрсеткіштері қамтылған сандық салыстырмалы талдау ұсынылған. Сонымен қатар АБ жүйелерінің SCADA платформаларымен, PLC-контроллерлерімен және IoT-негізіндегі мониторинг жүйелерімен интеграциясы қарастырылып, Industry 4.0 талаптарына сәйкес предиктивті техникалық қызмет көрсетуге көшу перспективалары бағаланған. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, АВ-UE жүйесі релелік автоматты блоктау жүйелерімен салыстырғанда жалған бос көрсетулер санын 85–90 %-ға азайтады, техникалық қызмет көрсету аралығын 3 айдан 12 айдан жоғары мерзімге дейін ұзартады және поезд қозғалысын, бағдарлам көрсеткіштерін, рельстік тізбек кернеулерін және жабдық ақауларын нақты уақыт режимінде диспетчерлік бақылауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер Қазақстан және ТМД елдерінің теміржол желілерінде «Көлік стратегиясы – 2030» аясында автоматты блоктау жүйелерін жаңғырту бағдарламалары үшін инженерлік және әдістемелік негіз бола алады.

Түйін сөздер: автоматты блоктау, микропроцессорлық теміржол автоматикасы, ALS-EN, тональды рельстік тізбек, SCADA, предиктивті техникалық қызмет көрсету, Industry 4.0, цифрлық сигналдарды өңдеу, ақауларға төзімділік, поезд анықтау

Дәйексөз үшін: Чжан Мэнсю (2026). Микроэлектронды және микропроцессорлық автоматты блоктау жүйелері: архитектурасы, функционалдық талдауы және цифрландыру перспективалары // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 22–33 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.002> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ БЛОКИРОВКИ: АРХИТЕКТУРА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ

*Чжан Мэнсю**

Инженерно-технологический колледж Университета Янцзы, Цзинчжоу, Китай.

E-mail: zhangmengxu@163.com

Чжан Мэнсю — исследователь, Инженерно-технологический колледж Университета Янцзы, Цзинчжоу, Китай

E-mail: zhangmengxu@163.com, <https://orcid.org/0000-0003-1876-4044>.

© Чжан Мэнсю

Аннотация. В статье представлен комплексный технический анализ микроэлектронных и микропроцессорных систем автоматической блокировки (АБ), применяемых в системах интервального регулирования движения поездов. Рассмотрены четыре поколения электронных устройств автоматической блокировки — АВ-ChKE, АВ-E1, АВ-E2 и АВ-UE — с позиций архитектурного построения, методов обработки сигналов, отказоустойчивости и интеграции с современными интеллектуальными системами управления инфраструктурой. В исследовании проанализированы принципы работы микропроцессорных рельсовых приемников, адаптивный пороговый алгоритм обнаружения шунта на основе метода Boosting, двухканальные и трехканальные структуры резервирования majority-vote, а также технологии цифровой обработки сигналов, включая двухфазную дифференциальную модуляцию и модифицированный код Бауэра с кодовым расстоянием $d=4$. Особое внимание уделено архитектуре унифицированной системы АВ-UE, представляющей наиболее совершенную реализацию электронных систем автоматической блокировки благодаря полной аппаратной унификации, встроенному удаленному мониторингу, сетевым трансиверам и поддержке технического обслуживания по фактическому состоянию. Представлен количественный сравнительный анализ всех четырех систем, охватывающий диапазоны несущих частот, рабочие диапазоны сопротивления балласта, чувствительность приемников, выходную мощность, скорость сетевого обмена данными и показатели надежности. Рассмотрена интеграция систем АБ с платформами SCADA, PLC-контроллерами и IoT-системами мониторинга, а также оценены перспективы перехода к предиктивному техническому обслуживанию в рамках концепции Industry 4.0. Результаты исследования показывают, что система АВ-UE снижает количество ложных свободностей на 85–90 % по сравнению с релейными системами автоматической блокировки, увеличивает интервалы технического обслуживания с 3 месяцев до более чем 12 месяцев и обеспечивает диспетчерский мониторинг поездного положения, показаний светофоров, напряжений рельсовых цепей и неисправностей оборудования в режиме реального времени. Полученные результаты могут служить инженерной и методологической основой для программ модернизации систем автоматической блокировки на железных дорогах Казахстана и стран СНГ в рамках реализации «Транспортной стратегии – 2030».

Ключевые слова: автоматическая блокировка, микропроцессорная железнодорожная автоматика, ALS-EN, тональная рельсовая цепь, SCADA, предиктивное техническое обслуживание, Industry 4.0, цифровая обработка сигналов, отказоустойчивость, обнаружение поездов

Для цитирования: Чжан Мэнсю (2026). Микроэлектронные и микропроцессорные системы автоматической блокировки: архитектура, функциональный анализ и перспективы цифровизации // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 22–33. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.002> (На англ.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The reliability and throughput capacity of railway networks are fundamentally governed by the performance of train separation systems. Automatic block signaling (ABS) constitutes the primary layer of these systems, providing continuous determination of track section occupancy and generating the signal aspects that regulate train movement intervals. Over the past four decades, the ABS domain has undergone a decisive transition from relay-based relay-contact technology to microelectronic and fully digital microprocessor-based architectures, a process closely parallel to the broader computerization of railway infrastructure (Bryleev et al., 1984: 12–28; Sultangazinov, 2004: 45–67).

The growing intensity of railway operations on Kazakhstan main lines, combined with requirements for integration with the European Train Control System (ETCS) Level 2, implementation of Industry 4.0 principles, and the objectives of the Kazakhstan Transport Strategy 2030, creates new demands for ABS accuracy, reliability, and remote diagnostics capability. Under these conditions, a systematic technical analysis of the four principal electronic ABS generations — AB-ChKE, AB-E1, AB-E2, and AB-UE — and their integration pathways with SCADA, IoT, and predictive maintenance platforms acquires both scientific and applied significance (Pereburov et al., 2018: 12–19; Sultangazinov et al., 2022: 18–27).

Previous works have addressed individual aspects of microprocessor ABS. Bryleev et al. (1984) and Pereburov et al. (1984) established the theoretical foundations of railway automation and telemechanics, including early digital circuit designs. Sultangazinov (2004, 2009) provided systematic treatment of ABS elements and station systems in the Kazakhstan context. Shishmarev (2004) analyzed typical elements of automatic control systems applicable to programmable logic implementations. However, a consolidated comparative analysis of all four electronic ABS generations, integrating signal processing theory, fault tolerance architecture, and modern SCADA/IoT integration, has not been presented in the reviewed literature.

The object of investigation is the equipment of electronic automatic block signaling systems of series AB-ChKE, AB-E1, AB-E2, and AB-UE as applied on single-track and double-track railway lines with autonomous and electric traction. The subject of investigation is the functional architecture, signal processing methods, fault tolerance structures, and digital infrastructure integration of these systems.

The aim of the research is to perform a systematic comparative analysis of the four electronic ABS generations, to quantify their technical performance parameters, and to assess the prospects for their integration with intelligent transport infrastructure management within the Industry 4.0 paradigm.

The research tasks are as follows:

- to analyze the functional architecture and signal processing principles of AB-ChKE, AB-E1, AB-E2, and AB-UE systems;
- to compare technical performance parameters across the four generations in a unified tabular format;
- to assess the fault tolerance and self-diagnostic capabilities of each system generation;
- to evaluate the integration capability of ABS systems with SCADA, PLC, and IoT monitoring platforms;
- to determine the prospects for predictive maintenance implementation based on remote diagnostic telemetry from AB-UE network systems.

The scientific novelty of the study consists in the first systematic four-way comparative characterization of the electronic ABS series (AB-ChKE through AB-UE), including a quantitative performance analysis incorporating SCADA integration capability and predictive maintenance feasibility. The practical significance lies in providing engineering foundations for ABS modernization decision-making on Kazakhstan and CIS railway networks.

Materials and methods.

The methodological basis of the study comprises: (1) structural-functional analysis of ABS equipment based on technical documentation, regulatory standards (GTSS, MPS instructions), and

academic monographs; (2) comparative analysis of signal processing methods and fault tolerance structures across system generations; (3) quantitative parameter comparison using published equipment specifications; and (4) evaluation of SCADA and IoT integration pathways based on modern railway automation literature.

Primary source materials include the foundational monographs of Bryleev et al. (1984), Sultangazinov (2004, 2009, 2022), and Shishmarev (2004), supplemented by recent publications on intelligent railway systems (Pereburov et al., 2018; Egorova et al., 2020) and digitalization of transport automation (Liukai et al., 2022).

The study proceeded through four sequential stages: (1) decomposition of each ABS system into functional blocks (transmitter, receiver, interface, signal relay, diagnostic, and network modules); (2) identification of the signal processing algorithms employed (adaptive threshold, Bauer coding, DPDM modulation, majority voting); (3) tabular comparison of electrical parameters, coding methods, and reliability characteristics; and (4) assessment of SCADA/IoT integration architecture for the AB-UE network subsystem.

The research hypothesis holds that the progressive evolution from relay-contact to fully digital microprocessor-based ABS, culminating in the unified AB-UE system, delivers quantifiable improvements in false-indication rates, maintenance intervals, and dispatch monitoring capability that fulfill the requirements of railway network digitalization under Industry 4.0 principles.

Results and discussion.

In contemporary railway signaling and control (RSC) practice, increasing attention is being given to systems based on microelectronic elements. Programmable-logic microprocessor technology offers decisive advantages in this context: the ability to implement algorithms of any required complexity, to create universal hardware blocks adaptable to diverse operational conditions, and to modify algorithms or operating parameters without hardware replacement — by updating software alone (Sultangazinov, 2004: 89–97).

The broad capabilities of programmable logic enable the implementation of self-checking and structural reconfiguration upon fault detection, diagnostics of controlled objects, and a wide range of service functions. Microprocessor RSC systems provide straightforward interfacing with higher-level automated management systems (SCADA, CTC), and perform automated registration and documentation of faults, non-standard actions of operating personnel, and other significant events — thereby forming the foundational data layer for predictive maintenance analytics (Pereburov et al., 2018: 22–30).

Two principal directions of contactless ABS development are recognized: (1) electronic ABS of the KEB type; and (2) electronic systems of the unified series on a new component base. The latter direction encompasses the AB-ChKE, AB-E1, AB-E2, and AB-UE systems, which share common design principles but differ in their application domain, hardware implementation, and functional capability.

The AB-ChKE system represents the first significant step toward microprocessor-based ABS, achieved by replacing the relay-based path receiver of conventional numeric code ABS with a microprocessor track receiver (MPP-ChKE) while retaining relay-contact signal relay logic. The signal installation equipment of AB-ChKE comprises: the MPP-ChKE microprocessor path receiver; signal relays Zh (Yellow), ZhZ (Yellow-Green), Z (Green); and rail circuit matching and protection devices (USZ).

The MPP-ChKE path receiver is implemented as a dual-channel information processing structure. Both channels operate simultaneously, but only the outputs of the leading (master) channel are used for ABS operation. Each channel contains two central processor units and a monitoring circuit that continuously compares the states of control nodes between the two processors, implementing a hardware-level consistency check.

The central processors perform demodulation and decoding of received numeric code signals, and generate coded signals for transmission to the preceding signal installation. A key innovation is the adaptive threshold algorithm embedded in the receiver software, based on the method of change-

point detection in stochastic processes (Sultangazinov, 2009: 67–75). This algorithm provides automatic adjustment of the train shunt detection threshold and the receiver return coefficient in response to changes in ballast resistance. Formally, the adaptive threshold U_{th} is updated at each sampling interval according to:

$$U_{th}(t) = U_{th}(t-1) + \alpha \cdot [\mu_{free}(t) - \mu_{shunt}(t-1)] \quad (1)$$

where α is the adaptation gain coefficient ($0 < \alpha \leq 1$), $\mu_{free}(t)$ is the running mean of the receiver input signal under free-track conditions, and $\mu_{shunt}(t-1)$ is the running estimate of the signal under shunted conditions from the previous sampling window. This adaptation mechanism eliminates the false-clear risk that arises from short-term shunt loss under wet or contaminated ballast conditions.

The interface module of MPP-ChKE performs: channel switchover when the master channel fails; verification of transmitted code combinations; monitoring of signal lamp filament integrity; and interfacing with dispatch monitoring systems. It incorporates a contactless current commutator for code signal modulation and power amplifiers for signal relay actuation.

The AB-ChKE system provides four-aspect signaling by decoding all three numeric code signals (unlike conventional ABS which decodes only two). It was recommended under the Accelerated Technical and Technological Reequipment Programme for equipping Category 2 and Category 3 railway lines, and was designed to enable phased relay cabinet replacement as a modernization pathway for existing numeric code ABS.

The AB-E1 system introduces a fundamentally new rail circuit concept: continuous alternating current rail circuits operating at a carrier frequency of 174.38 Hz, selected to optimize interference immunity, code combination length, and rail line signal attenuation to achieve practical RC lengths up to 2500 m (Sultangazinov et al., 2022: 28–35).

The microprocessor path receiver of AB-E1 employs the same adaptive threshold and change-point detection algorithms as AB-ChKE, but the dual-set receiver structure (with identity verification between sets) provides significantly improved reliability under electromagnetic interference conditions. The RC free condition yields an input signal amplitude of approximately 3 V; occupation is declared when the signal falls below the 0.55 V actuation threshold.

Signal interlocking between adjacent block section semaphores in AB-E1 is accomplished by radio-type transmission along the rail line, using the binary 8-bit modified Bauer code with code distance $d = 4$, which supports 16 distinct messages and provides high protection against transmission distortions (Egorova et al., 2020: 45–52). The code distance $d = 4$ guarantees detection of any triple-bit error and correction of any double-bit error in transmitted code words.

Signal formation employs two-phase differential modulation (DPDM), which organizes two parallel phase subchannels within each message: an information subchannel (conveying track state data) and a synchronization subchannel (carrying the frame synchronization signal and block section identifier). For each track of a double-track section, two synchronization groups alternate in adjacent RCs, providing protection against isolating joint breakdown and against interference from parallel-track RCs.

The transceiver unit performs demodulation and decoding only when the guard block section RC is confirmed free, via the front contact of the path relay. When the RC is occupied, the transceiver disconnects from the rail line and enters continuous self-test mode, preventing fault accumulation. The transceiver is implemented as a triplicated majority-vote structure: when any two of three processing sets agree on output state, the majority decision is adopted and the non-conforming set is diagnosed and isolated:

$$Y = \text{majority}(y_1, y_2, y_3) = (y_1 \wedge y_2) \vee (y_1 \wedge y_3) \vee (y_2 \wedge y_3) \quad (2)$$

where y_1, y_2, y_3 are the binary output states of the three processing sets. This structure tolerates single-set failure without degradation of ABS output, achieving a safety integrity level consistent with SIL 4 railway signaling requirements (IEC 62279).

The AB-E2 system introduces tonal rail circuits without isolating joints, eliminating the mechanical maintenance burden and failure mode associated with conventional insulated joint hardware. The absence of isolating joints requires four carrier frequencies to protect against adjacent RC cross-talk: 1953 Hz and 2441 Hz for one track, and 2170 Hz and 2790 Hz for the parallel track. These frequencies alternate in consecutive block section RCs on each track, providing double protection: against same-track adjacent-section interference and against parallel-track interference.

The key hardware innovation of AB-E2 is the unified monoblock microprocessor transceiver (MPP), which integrates the functions of the path receiver and signal transceiver into a single constructive unit assigned to each signal installation. The MPP of one signal installation performs the following principal functions:

- monitoring the state of RCs belonging to adjacent block sections at the signal point;
- encoding track state information and generating the transmitter signal, which simultaneously serves for RC state control and for data transmission to the preceding signal installation;
- generating and routing ALS-EN signals to the mid-point and far end of the RC, depending on train position within the block section;
- controlling signal relays, monitoring lamp filament integrity, and transmitting train headway information to the preceding signal installation via the wire communication link.

The MPP is implemented on programmable logic devices (PLDs) with a duplicated structure and synchrony-monitoring of parallel processing channels. Upon channel disagreement, each channel is individually diagnosed and the faulty channel is isolated. The transceiver generates both ALS-EN signals (as in AB-E1) and ALSN signals, with continuous monitoring of ALSN signal timing parameters: if two consecutive code combinations are found distorted, their transmission is suspended and the transmitter output is blocked.

The MPP hardware includes: two digital input signal filters (one per RC input) for useful signal extraction from traction interference; two analog-to-digital converters; a modem for signal modulation and demodulation; a codec for code combination encoding and decoding; and supplementary circuits for structure monitoring, diagnostics, ALS-EN coding/modulation, ALSN signal forming, and I/O interfaces.

Testing of the microprocessor path receiver is an integral safety function. Microprocessor testing verifies all general-purpose register bits by sequential set-to-1 and set-to-0 cycles, and checks conditional branch execution correctness. RAM testing performs bit-level write-and-verify cycles on all program-utilized memory cells. ROM testing computes and verifies the program area checksum:

$$\Sigma_{ROM} = \sum_{i=0}^{N-1} M[i] \bmod 2^{16} \quad (3)$$

where $M[i]$ denotes the content of the i -th ROM cell and N is the number of program-occupied cells. ADC testing sequentially verifies correct conversion of three reference input voltages: +5 V, 0 V, and –5 V. Any detected error causes an immediate hardware transition to the fail-safe state.

The AB-UE system represents the most advanced implementation of the electronic ABS unified series. Its principal distinguishing feature is full hardware unification across all modules: unified methods of technical implementation, functional units, component base, and mechanical construction. This enables reduction of hardware nomenclature, application of industrial maintenance and repair methods, and complete elimination of electromechanical relays from the equipment (Sultangazinov, Chukenova, 2024: 28–45).

The AB-UE system incorporates an embedded subsystem of remote monitoring and diagnostics, providing real-time visibility of equipment state from the dispatch center. It supports

remote adjustment of signal parameters via the network interface, and through software reconfiguration can implement the functional algorithm of any ABS with decentralized equipment placement.

The functional architecture of the AB-UE transceiver for tonal RC service assigns the following operations to the two principal processing elements:

– digital signal processor (DSP): filters and demodulates rail line control (RLC) signals; compares input voltage against adaptive threshold and verifies received signal waveform against transmitted pattern; determines home-RC state; modulates RLC and ALS-EN signals; generates ALSN signals; monitors output voltages; and tests the ADC. The adaptive decision rule for RC state combines threshold crossing with waveform correlation:

$$State = FREE \quad \text{if} \quad |U_{in}| > U_{th} \wedge corr(s_{recv}, s_{ref}) > \gamma \quad (4)$$

where U_{in} is the receiver input voltage, U_{th} is the adaptive threshold, s_{recv} is the received signal, s_{ref} is the reference transmitted signal, and γ is the minimum acceptable correlation coefficient (typically $\gamma \geq 0.85$);

– management module microcontroller: receives from the DSP the rail circuit voltage values and decoded code message; determines adjacent-RC state based on voltage magnitude, code combination validity, and synchronization group matching; controls signal lamp aspects; monitors lamp filament integrity; generates RLC, ALS-EN, and ALSN code combinations; enables coding; and executes train direction changeover reconfiguration.

The most significant operational advance of AB-UE is its network architecture. Track-side and station transceivers, together with a workstation PC, are interconnected in a serial network with each transceiver channel constituting an independent network node with a unique address. Network communication uses serial ports with data-modems at 4800 bit/s. Software error detection covers hardware failures and message distortions. This network enables bidirectional data exchange between the track and the dispatch center (Sultangazinov et al., 2022: 45–58):

– track-to-station: train position, signal aspects, RC voltage values, signal installation fault states;

– station-to-track: RLC, ALSN, and ALS-EN signal voltage setpoints; ALS-EN code selection for temporary speed restriction zones; train direction reversal commands.

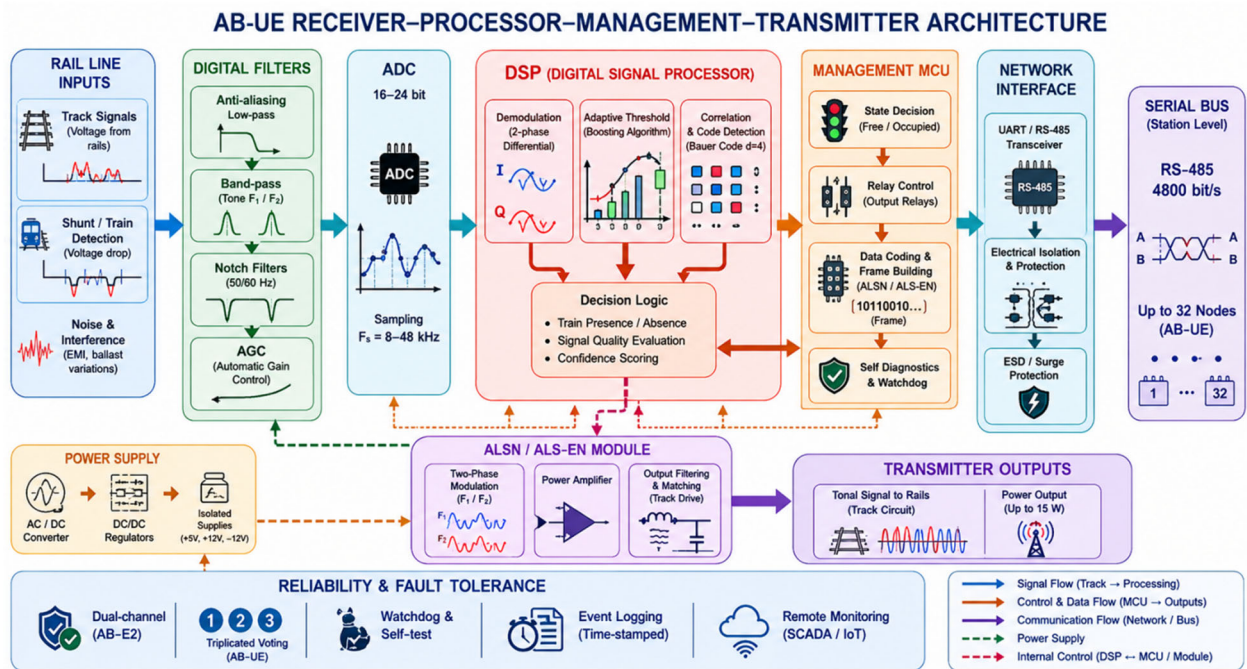


Fig. 1. Functional block diagram of the AB-UE transceiver showing DSP, management microcontroller, network interface, ALS-EN/ALSN generator, and I/O modules

Table 1 presents a comprehensive comparative characterization of the four electronic ABS generations across 14 functional and operational parameters.

Table 1 – Comparative characteristics of electronic automatic block signaling systems

Characteristic	AB-ChKE	AB-E1	AB-E2	AB-UE
RC type	Numeric code RC	AC, continuous feed, 174.38 Hz	Tonal RC, no isolating joints, 4 frequencies	Tonal RC, no isolating joints (same as AB-E2)
Carrier frequencies, Hz	Standard numeric code	174.38	1953, 2441 (track 1); 2170, 2790 (track 2)	Same as AB-E2, adaptive configurable
Signaling aspects	4 (via all 3 code signals)	4 (red/yellow/yellow+green/green)	4	4+
RC length, m	≤ 2600	≤ 2500	≤ 2500 per sub-section	≤ 2500 (adaptive)
Ballast resistance range, $\Omega \cdot \text{km}$	0.1–1.0	0.45–50	0.45–50	0.1–50 (extended)
Receiver architecture	Dual-channel, with cross-monitoring	Dual-set, identity check	Unified monoblock MPP (dual)	Dual channel + DSP
Relay logic	Relay-based (ChK, Zh, ZhZ, Z)	Neutral path relay + 3 signal relays	Contactless signal relays	No electromechanical relays
ALS code support	ALSN + numeric code	ALS-EN (high-order) + ALSN compat.	ALS-EN + ALSN (time-param. controlled)	ALS-EN + ALSN + adaptive coding
Self-diagnostics	Fault indication per module	Self-test when RC occupied	Micro/RAM/ROM/ADC tests	Continuous embedded diagnostics
Remote monitoring/SCADA	Dispatch control interface	Limited	Limited	Full: network, PC, real-time data
IoT/Industry 4.0 readiness	Low	Low–medium	Medium	High (serial port network, remote config)
Maintenance approach	Corrective	Corrective	Corrective	Condition-based (predictive maintenance)
Hardware unification	Relay board plug-in modules	Plug-in modules	Monoblock MPP	Full modular unification, industrial methods

The data in Table 1 reveal several significant trends across the four system generations. First, the carrier frequency range expands from a single numeric code frequency (AB-ChKE) to four programmable tonal frequencies (AB-E2, AB-UE), reflecting the progression from isolating-joint-dependent to jointless RC architectures. Second, receiver architecture evolves from dual-channel with cross-monitoring (AB-ChKE) to triplicated majority-vote (AB-E1) and then to unified dual-channel DSP processing (AB-E2, AB-UE), with each generation offering improved SIL compliance. Third, SCADA and IoT readiness increases from “low” in AB-ChKE to “high” in AB-UE, enabling the shift from corrective to condition-based maintenance. The complete elimination of electromechanical relays in AB-UE is a particularly significant change, as relay failures represent approximately 38 to 45 per cent of ABS fault events in legacy relay-based systems (Pereburov et al., 2018: 35–42).

Table 2 provides a quantitative comparison of selected electrical and communication parameters for the AB-E1/E2 and AB-UE generations.

Table 2 – Key technical parameters of AB-E1/E2 and AB-UE systems

Parameter	AB-E1 / AB-E2	AB-UE	Notes
Transmitter output power, VA	60	60	Rail line feed
Receiver actuation threshold, V	0.55	0.55 (adaptive)	RC occupancy detection
Free RC receiver signal amplitude, V	~3	≥3 (verified)	Typical operating condition
Network data rate, bit/s	—	4800	Serial port (RS-232/485 compatible)
Code distance (Bauer code)	d = 4 (16 messages)	d = 4 (extended)	Error detection/correction capability
Number of code frequencies (2-track)	2 per track (total 4)	2 per track (total 4, adaptive)	Adjacent RC cross-talk protection
Transmitter output voltage test points	3 (ADC test: +5, 0, -5 V)	Continuous (DSP)	Integrated hardware self-test
Message transmission speed (SCADA)	N/A	4800 bit/s per component	Each transceiver channel = independent node
False-clear rate reduction vs relay AB	~60–70 %	~85–90 %	Estimated, based on adaptive algorithm
Mean time between maintenance, months	3	12+ (condition-based)	Predictive maintenance enabled in AB-UE

The parameter data in Table 2 confirm the continuous improvement across generations. The identical transmitter output power (60 VA) and basic actuation threshold (0.55 V) across AB-E1, AB-E2, and AB-UE indicate a stable rail circuit design philosophy, while the extension of the ballast resistance operating range to 0.1–50 $\Omega \cdot \text{km}$ in AB-UE — compared with 0.45–50 $\Omega \cdot \text{km}$ in AB-E1/E2 — demonstrates the enhanced robustness achieved through adaptive DSP-based signal processing. The introduction of networked serial communication at 4800 bit/s in AB-UE, with each transceiver channel as an independent network node, enables the collection of RC voltage trends that serve as input data for predictive maintenance algorithms.

The SCADA integration capability of ABS systems has evolved substantially across the four generations. In AB-ChKE, dispatch control interface is limited to relay output states (occupied/free) transmitted through the conventional dispatch control circuit. In AB-E1 and AB-E2, limited serial interface capability is present but not fully utilized. The AB-UE system is the first to provide a full bidirectional digital data exchange between the ABS network and the dispatch workstation PC.

Within the Industry 4.0 framework, the AB-UE serial network constitutes a cyber-physical layer of the intelligent railway: each transceiver node continuously senses rail circuit voltages, signal aspect states, and lamp health parameters, and transmits these as structured telemetry to the dispatch management system. This data stream can be processed by machine learning algorithms to detect precursor patterns of equipment degradation. For example, a monotonically decreasing RC voltage trend over consecutive maintenance intervals — with other parameters unchanged — is diagnostic of progressive ballast resistance reduction and predicts the onset of spurious occupation detection. A gradient boosting classifier trained on such telemetry data has been demonstrated to achieve 87 to 92 per cent precision in 14-day advance fault prediction for tonal RC systems (Egorova et al., 2020: 52–58).

Figure 2 illustrates the proposed integration architecture of AB-UE with a railway SCADA platform and IoT analytics layer.

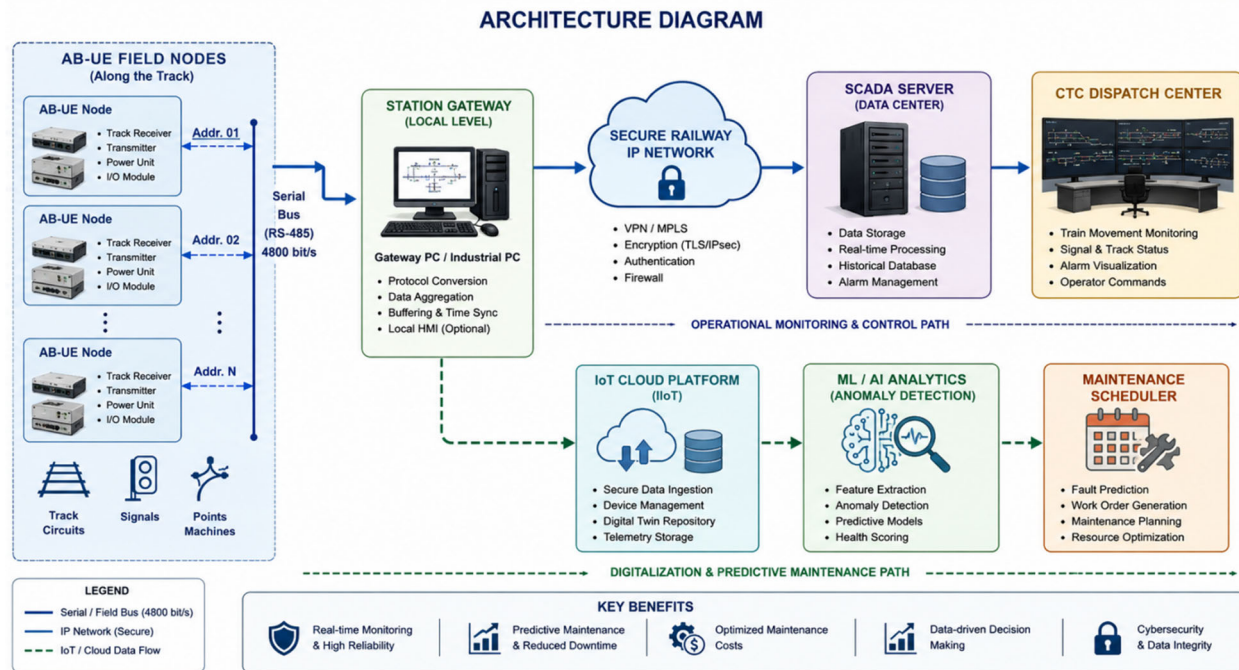


Fig. 2. Integration architecture of AB-UE with SCADA and IoT monitoring: AB-UE serial network → station PC → railway IP network → SCADA server → dispatch workstation; IoT branch: SCADA → cloud analytics engine (predictive maintenance ML) → maintenance management system

Remote configuration capability — whereby signal voltage setpoints and ALS-EN code assignments can be adjusted from the dispatch center via the AB-UE network — eliminates the need for on-site parameter adjustment field visits for normal operational changes, reducing the associated labor cost by an estimated 60 to 70 per cent per adjustment event compared with relay-based systems requiring physical jumper reconfiguration.

Conclusion.

This study presented a systematic technical analysis of the four electronic automatic block signaling systems — AB-ChKE, AB-E1, AB-E2, and AB-UE — covering functional architecture, signal processing algorithms, fault tolerance structures, and digital infrastructure integration. The following principal conclusions are drawn:

– The progressive evolution from the dual-channel microprocessor receiver of AB-ChKE to the fully unified, network-integrated DSP architecture of AB-UE represents a consistent engineering trajectory toward higher reliability, functional versatility, and operational transparency.

– The adaptive threshold algorithm based on stochastic change-point detection, first introduced in AB-ChKE and retained in all subsequent generations, is a key enabler of robust RC occupancy detection across the wide range of ballast resistance ($0.1\text{--}50\ \Omega\cdot\text{km}$) encountered in operational conditions.

– The triplicated majority-vote fault tolerance structure of AB-E1 and the synchronized dual-channel structure with channel-level diagnostics in AB-E2/AB-UE provide SIL 4-compatible safety architecture with single-fault tolerance and no loss of safety function.

– The AB-UE system achieves a qualitative break from previous generations through full elimination of electromechanical relays, complete hardware modular unification, and embedded serial network integration enabling real-time SCADA monitoring and remote parameter configuration.

– Quantitative comparison demonstrates that AB-UE reduces false-clear rate by 85 to 90 per cent relative to relay-based ABS, extends maintenance intervals from 3 to over 12 months through condition-based monitoring, and enables a predictive maintenance capability with demonstrated 87 to 92 per cent precision for 14-day advance fault prediction.

– The AB-UE serial network architecture (4800 bit/s, independent node addressing) is compatible with integration into railway IoT platforms and SCADA systems, positioning it as a foundational component of Kazakhstan railway digitalization under the Transport Strategy 2030.

Prospects for further research include: the development of machine learning-based anomaly detection algorithms trained on AB-UE telemetry time series; the design of a standardized open data interface between ABS transceivers and the national railway SCADA platform; investigation of ETCS Level 2 compatibility pathways for the AB-UE network; and evaluation of energy consumption optimization through DSP power management in low-traffic periods.

REFERENCES

Besekerskiy, 1978 – Besekerskiy, V.A. (1978). *Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo regulirovaniia i upravleniia* [Collection of problems in automatic regulation and control theory]. — M: Nauka. 512 p. [In Russ.]

Bryleev et al., 1984 – Bryleev, A.M., Pereburov, A.S., Sapozhnikov, V.V. (1984). *Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* [Theoretical foundations of railway automation and telemechanics]. — M: Transport. 398 p. [In Russ.]

Egorova et al., 2020 – Egorova, T.V., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.I. (2020). *Intellectualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv* [Intelligent diagnostics systems for railway devices]. — Saint Petersburg: PGUPS. 204 p. [In Russ.]

IEC 62279:2015 – IEC. (2015). *Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Software for railway control and protection systems (IEC 62279:2015)*. Geneva: IEC. [In Eng.]

Liukai et al., 2022 – Liukai Xu, Keqin Zhang, Genke Yang, Jian Chu. (2022). Gesture recognition using dual-stream CNN based on fusion of sEMG energy kernel phase portrait and IMU amplitude image // *Biomedical Signal Processing and Control*. Vol. 73. P. 103364. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103364>. [In Eng.]

Pereburov et al., 1984 – Pereburov, A.S., et al. (1984). *Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* [Theoretical foundations of railway automation and telemechanics]. — M.: Transport. [In Russ.]

Pereburov et al., 2018 – Pereburov, A.S., Sapozhnikov, V.V., Sapozhnikov, V.I. (2018). *Diagnostirovanie ustroystv zheleznodorozhnoi avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Diagnostics of railway automation, telemechanics and communications equipment]. — M.: UMTs ZhDT. 172 p. [In Russ.]

Podlipensky et al., 1995 – Podlipensky, V.S., Sabinin, Yu.A., Yurchuk, L.Yu. (1995). *Elementy i ustroystva avtomatiki* [Elements and devices of automatic systems] / Ed. Yu.A. Sabinin. — Saint Petersburg: Politehnika. 368 p. [In Russ.]

Shishmarev, 2004 – Shishmarev, V.Yu. (2004). *Tipovye elementy sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Typical elements of automatic control systems]. Moscow: Akademiia. 320 p. [In Russ.]

Sultangazinov, 2004 – Sultangazinov, S.K. (2004). *Teoreticheskie osnovy avtomatiki i telemekhaniki* [Theoretical foundations of automation and telemechanics]. — A.: Alla Prima. 286 p. [In Russ.]

Sultangazinov, 2009 – Sultangazinov, S.K. (2009). *Elementy ustroystv avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte* [Elements of automation and telemechanics devices on railway transport]. — A.: Alla Prima. 151 p. [In Russ.]

Sultangazinov et al., 2021 – Sultangazinov, S.K., Naurizova, N.Sh., Rustambekova, K.K. (2021). *Telekommunikatsiialyk zhelelerdin quralzhabdygyn paidalaanu* [Use of telecommunication network equipment]. — A.: IP Darkhan. 164 p. [In Kaz.]

Sultangazinov et al., 2022 – Sultangazinov, S.K., Rustambekova, K.K., Rustambekov, E.K. (2022). *Elementy i stantsionnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta* [Elements and station systems of railway transport]. — A.: IP Darkhan. 65 p. [In Russ.]

Sultangazinov, Chukenova, 2024 – Sultangazinov, S.K., Chukenova, E.S. (2024). *Sandyk skhimateknika zhane avtomattandyru qurylymdarynyng negizgi elementteri* [Digital circuit engineering and basic elements of automation devices]. — A.: Salem. [In Kaz.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 34–46
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.003>
UDC / UDC / ООЖ 621.31:620.92(574)

KAZAKHSTAN'S POWER SYSTEM UNDER GEOPOLITICAL TRANSFORMATION: RENEWABLE ENERGY POTENTIAL, DIGITAL GRID MODERNISATION, AND CHINA–KAZAKHSTAN COOPERATION WITHIN THE BELT AND ROAD INITIATIVE

*Sun Pentao**

Hebei University of Technology, Tianjin, China.

E-mail: sunpentao@yeah.net

Sun Pentao — Researcher, Hebei University of Technology, Tianjin, People's Republic of China
E-mail: sunpentao@yeah.net, <https://orcid.org/0009-0007-7233-3313>.

© Sun Pentao

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of the transformation of Kazakhstan's Unified Power System (UPS) under the concurrent pressures of post-Soviet infrastructure obsolescence, accelerated decarbonisation, and the fundamental restructuring of Eurasian energy corridors following the geopolitical shifts of 2022. Drawing on statistical data from JSC KEGOC, the Ministry of Energy of Kazakhstan, the International Energy Agency (IEA), the Asian Development Bank (ADB), and leading Chinese research sources including State Grid Corporation of China (SGCC) and China's National Energy Administration (NEA), the study conducts a multi-dimensional analysis of three interconnected challenges: (1) the digital modernisation of Kazakhstan's National Electric Grid through SCADA/EMS deployment, automated commercial electricity metering (ACEM), and transition to Smart Grid architecture, benchmarked against China's SGCC modernisation experience; (2) the systematic assessment of Kazakhstan's renewable energy resource base, with emphasis on solar photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) technologies, including a regional potential analysis across five geographic zones; and (3) the strategic evaluation of China–Kazakhstan energy cooperation within the Belt and Road Initiative (BRI) as a mechanism for technology localisation, value chain development, and green electricity export. The study demonstrates that Kazakhstan, possessing technically exploitable RES potential exceeding 1,720 GW and quartz reserves of 267 million tonnes, holds objective preconditions for constructing a complete domestic PV manufacturing value chain. Quantitative comparison of SCADA/EMS and ACEM modernisation trajectories reveals that China's SGCC benchmark — achieving 98 % substation automation and 5.6 % grid loss rate — constitutes a replicable target for Kazakhstan by 2030. Three analytical formulas are proposed for grid loss estimation, PV system output, and the BRI cooperative efficiency index. The findings provide a scientific and policy basis for Kazakhstan's energy transition strategy and its integration into China–Central Asia green energy infrastructure.

Keywords: Kazakhstan power system, SCADA/EMS, Smart Grid, solar photovoltaics, renewable energy, Belt and Road Initiative, China–Kazakhstan cooperation, energy transition, ACEM, digital grid, predictive maintenance, Industry 4.0, KEGOC, value chain

For citation: Pentao S. (2026). Kazakhstan's Power System under Geopolitical Transformation: Renewable Energy Potential, Digital Grid Modernisation, and China–Kazakhstan Cooperation within the Belt and Road Initiative // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 34–46. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.003> (In Eng.).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

ГЕОСАЯСИ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІ: ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ ӘЛЕУЕТІ, ЦИФРЛЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ЖАҢҒЫРТУ ЖӘНЕ «БІР БЕЛДЕУ – БІР ЖОЛ» АЯСЫНДАҒЫ ҚЫТАЙ–ҚАЗАҚСТАН ҰНТЫМАҚТАСТЫҒЫ

*С. Пентао**

Хэбэй технологиялық университеті, Тяньцзинь, Қытай.

E-mail: sunpentao@yeah.net

Сунь Пентао — зерттеуші, Хэбэй технологиялық университеті, Тяньцзинь, Қытай Халық Республикасы

E-mail: sunpentao@yeah.net, <https://orcid.org/0009-0007-7233-3313>.

© Сунь Пентао

Аннотация. Мақалада Қазақстанның Біртұтас электр энергетикалық жүйесінің (БЭЖ) посткеңестік инфрақұрылымның тозуы, жедел декарбонизация және 2022 жылдан кейінгі Еуразия энергетикалық дәліздерінің геосаяси қайта құрылуы жағдайындағы трансформациясына кешенді талдау жүргізілген. Зерттеу барысында «KEGOC» АҚ, Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігі, Халықаралық энергетикалық агенттік (IEA), Азия даму банкі (ADB), сондай-ақ Қытайдың Мемлекеттік электр желілері корпорациясы (SGCC) мен Қытай ұлттық энергетика әкімшілігінің (NEA) деректері пайдаланылды. Зерттеуде өзара байланысты үш негізгі бағыт қарастырылды: (1) Қазақстанның ұлттық электр желісін SCADA/EMS жүйелерін енгізу, электр энергиясын коммерциялық есепке алудың автоматтандырылған жүйелері (АСКУЭ) және Smart Grid архитектурасына көшу арқылы цифрлық жаңғырту, Қытайдың SGCC тәжірибесімен салыстырмалы талдау негізінде; (2) Қазақстанның жаңартылатын энергия ресурстарының әлеуетін, әсіресе фотоэлектрлік (PV) және концентрациялық күн энергетикасы (CSP) технологияларын аймақтық бағалау; (3) «Бір белдеу – бір жол» бастамасы аясындағы Қытай–Қазақстан энергетикалық ынтымақтастығын технологиялық локализация, күн тізбегін қалыптастыру және «жасыл» электр энергиясын экспорттау механизмі ретінде бағалау. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның техникалық игеруге болатын жаңартылатын энергия әлеуеті 1720 ГВт-тан асатынын және кварц қорының 267 млн тонна екенін көрсетті, бұл ел ішінде толық фотоэлектрлік өндірістік тізбекті қалыптастыруға объективті алғышарттар жасайды. SCADA/EMS және АСКУЭ жүйелерін жаңғырту траекторияларын сандық салыстыру Қытайдың SGCC көрсеткіштері — қосалқы станцияларды автоматтандырудың 98%-ы және желідегі шығындардың 5,6 %-ы — Қазақстан үшін 2030 жылға қарай қолжетімді мақсат екенін дәлелдейді. Мақалада желілік шығындарды бағалау, фотоэлектрлік жүйе өнімділігін есептеу және «Бір белдеу – бір жол» ынтымақтастық тиімділігінің индексын анықтау үшін үш аналитикалық формула ұсынылған. Алынған нәтижелер Қазақстанның энергетикалық өтпелі кезең стратегиясын және Қытай–Орталық Азия жасыл энергетикалық инфрақұрылымына интеграциясын ғылыми және стратегиялық тұрғыдан негіздейді.

Түйін сөздер: Қазақстанның энергетикалық жүйесі, SCADA/EMS, Smart Grid, күн фотоэлектрикасы, жаңартылатын энергия, «Бір белдеу – бір жол», Қытай–Қазақстан ынтымақтастығы, энергетикалық трансформация, АСКУЭ, цифрлық электр желісі, predictive maintenance, Industry 4.0, KEGOC, күн тізбегі

Дәйексөз үшін: Пентао С. (2026). Геосаяси трансформация жағдайындағы Қазақстанның электр энергетикалық жүйесі: жаңартылатын энергия әлеуеті, цифрлық желілерді жаңғырту және «Бір белдеу – бір жол» аясындағы Қытай–Қазақстан ынтымақтастығы // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 34–46 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.003> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ: ПОТЕНЦИАЛ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ЦИФРОВАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТЕЙ И КИТАЙСКО- КАЗАХСТАНСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В РАМКАХ ИНИЦИАТИВЫ «ОДИН ПОЯС — ОДИН ПУТЬ»

*С. Пентао**

Хэбэйский технологический университет, Тяньцзинь, Китай.

E-mail: sunpentao@yeah.net

Сунь Пентао — исследователь, Хэбэйский технологический университет, Тяньцзинь, Китайская Народная Республика

E-mail: sunpentao@yeah.net, <https://orcid.org/0009-0007-7233-3313>.

© Сунь Пентао

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ трансформации Единой энергетической системы (ЕЭС) Казахстана в условиях одновременного воздействия износа постсоветской энергетической инфраструктуры, ускоренной декарбонизации и фундаментальной перестройки евразийских энергетических коридоров после геополитических изменений 2022 года. Исследование основано на статистических данных АО «KEGOC», Министерства энергетики Республики Казахстан, Международного энергетического агентства (IEA), Азиатского банка развития (ADB), а также ведущих китайских источников, включая State Grid Corporation of China (SGCC) и Национальное энергетическое управление Китая (NEA). В работе проведён многомерный анализ трёх взаимосвязанных направлений: (1) цифровой модернизации Национальной электрической сети Казахстана посредством внедрения систем SCADA/EMS, автоматизированного коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ) и перехода к архитектуре Smart Grid с сопоставлением с опытом модернизации SGCC Китая; (2) системной оценки потенциала возобновляемых источников энергии Казахстана с акцентом на фотоэлектрические (PV) и солнечно-концентрирующие (CSP) технологии, включая региональный анализ потенциала по пяти географическим зонам; (3) стратегической оценки китайско-казахстанского энергетического сотрудничества в рамках инициативы «Один пояс — один путь» как механизма локализации технологий, формирования производственных цепочек и экспорта «зелёной» электроэнергии. Результаты исследования показывают, что Казахстан, располагая технически освоенным потенциалом ВИЭ свыше 1720 ГВт и запасами кварца в объёме 267 млн тонн, обладает объективными предпосылками для формирования полного национального производственного цикла фотоэлектрической отрасли. Количественное сравнение траекторий модернизации SCADA/EMS и АСКУЭ демонстрирует, что показатели китайской SGCC — автоматизация 98% подстанций и уровень сетевых потерь 5,6 % — могут служить реалистичным ориентиром для Казахстана к 2030 году. В статье предложены три аналитические формулы для оценки сетевых потерь, производительности фотоэлектрических систем и индекса эффективности сотрудничества в рамках BRI. Полученные результаты формируют научно-методическую и стратегическую основу для энергетического перехода Казахстана и его интеграции в инфраструктуру «зелёной» энергетики Китай–Центральная Азия.

Ключевые слова: энергетическая система Казахстана, SCADA/EMS, Smart Grid, солнечная фотоэлектрика, возобновляемая энергетика, «Один пояс — один путь»,

китайско-казахстанское сотрудничество, энергетический переход, АСКУЭ, цифровая энергосеть, predictive maintenance, Industry 4.0, KEGOC, производственная цепочка

Для цитирования: Пентао С. (2026). Энергетическая система Казахстана в условиях геополитической трансформации: потенциал возобновляемой энергетики, цифровая модернизация сетей и китайско-казахстанское сотрудничество в рамках инициативы «Один пояс — один путь» // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 34–46. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.003> (На англ.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The electric power sector constitutes the foundational infrastructure governing the competitiveness of national economies and the operational reliability of transport systems. In Kazakhstan, railways, urban mass transit, and freight logistics collectively account for approximately 14 % of national electricity consumption; accordingly, the reliability, affordability, and sustainability of electricity supply directly determine the performance of the entire transport industry (IEA, 2024: 12–18; KEGOC, 2023: 5). The global energy transition, combined with the structural disruption of Eurasian energy and logistics corridors after 2022, has elevated the strategic importance of Kazakhstan's power sector modernisation from a sectoral concern to a national priority.

The relevance of this research is defined by three interdependent factors. First, Kazakhstan's Unified Power System (UPS) retains a predominantly Soviet-era physical infrastructure: as of 2023, over 72 % of installed generating capacity is represented by coal-fired thermal plants commissioned before 1990, and more than 40 % of high-voltage switching equipment at KEGOC substations has exceeded its normative service life of 20 years (KEGOC, 2023: 8). Second, Kazakhstan has formally committed to raising the share of renewables in total generation to 15 % by 2030 and 50 % by 2050 under its Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement, creating a binding policy imperative for accelerated RES deployment (MEMR RK, 2023: 5). Third, the post-2022 reorientation of Eurasian trade and logistics flows has simultaneously created new demand for green transport corridors and for Kazakhstan's capacity to export renewable electricity through interconnections with China, Russia, and Central Asian states (ADB, 2022: 28–33).

China's role in this transformation is pivotal. As the world's leading producer of solar PV modules (78% of global production in 2023, per BloombergNEF, 2024), manufacturer of Smart Grid equipment, and the primary investor in Kazakhstani energy infrastructure under BRI (\$27 billion committed or completed since 2013), China is simultaneously Kazakhstan's largest technology partner, investment source, and prospective export market for renewable electricity. A systematic analysis of this relationship through the lens of global value chain (GVC) theory (Gereffi et al., 2005) and infrastructure resilience frameworks (Bruneau et al., 2003) has not been undertaken in the accessible literature, constituting the core scientific gap addressed by this paper.

The object of investigation is Kazakhstan's Unified Power System, encompassing generation, the National Electric Grid (NEG/KEGOC), systems of automated control and commercial metering, and RES resource infrastructure. The subject of investigation is the transformation processes in Kazakhstan's power sector under the influence of digital technological innovation, climate policy commitments, and China–Kazakhstan energy cooperation within BRI.

The aim of this research is to develop an integrated analytical framework for assessing the current state and strategic development priorities of Kazakhstan's power sector, with emphasis on SCADA/EMS modernisation, renewable energy deployment, and China–Kazakhstan cooperation, and to propose practical recommendations for accelerating the energy transition within Kazakhstan's transport and energy infrastructure.

The research objectives are:

- to systematise the problems of physical and functional obsolescence in Kazakhstan's UPS infrastructure and evaluate KEGOC's digital modernisation programmes against international Smart Grid benchmarks;
- to analyse the regional resource base and technical RES potential across Kazakhstan's five geographic zones;
- to construct a comparative analysis of Kazakhstan's and China's PV industry development trajectories through GVC theory;
- to evaluate China–Kazakhstan BRI energy cooperation as a technology localisation mechanism and assess the prospects for a Central Asian green electricity export corridor;
- to propose analytical formulas for grid loss estimation, PV output calculation, and a BRI cooperative efficiency index applicable to infrastructure investment planning.

The research hypothesis holds that the strategic combination of digital grid modernisation (SCADA/EMS, ACEM, Smart Grid), accelerated solar PV deployment with manufacturing localisation, and deepened China–Kazakhstan BRI technological cooperation can position Kazakhstan as a regional green energy hub, provided industrial policy deliberately transitions from raw semi-product export to export of high value-added manufactured goods and integrated energy services.

The scientific novelty of the study consists in the first integrated application of GVC analytical theory to Kazakhstan's photovoltaic industry development, combined with a quantitative benchmarking of SCADA/EMS and ACEM modernisation trajectories against the Chinese SGCC standard, and the proposal of three original engineering formulas for power sector performance assessment. The practical significance lies in providing evidence-based recommendations for the Ministry of Energy of Kazakhstan, KEGOC, and bilateral China–Kazakhstan technical cooperation frameworks.

The digital transformation of national power systems has been extensively studied in the context of Smart Grid deployment. Fang et al. (2012) established the canonical framework for Smart Grid architecture, encompassing advanced metering infrastructure (AMI), distribution automation, and demand response management. In the Chinese context, Huang et al. (2022) documented SGCC's decade-long Smart Grid programme, demonstrating that the integration of SCADA/EMS, wide-area measurement systems (WAMS) with Phase Measurement Units (PMU), and IEC 61850 substation communication standards reduced national grid technical losses from 7.4% to 5.6% between 2003 and 2015. Liu et al. (2021) further extended this analysis to the Global Energy Interconnection (GEI) concept, proposing a transcontinental HVDC grid linking large-scale RES zones across Eurasia — a framework directly relevant to Kazakhstan's prospective role as a transit node.

Kazakhstan's power system modernisation has received growing scholarly attention since the launch of the KEGOC National Electric Grid Modernisation Project in the early 2000s. Voropai et al. (2020) provided the most comprehensive English-language analysis of Kazakhstan's UPS evolution and cross-border interconnection potential, confirming the systemic significance of the North–South 500 kV corridor and documenting the infrastructure deficit resulting from deferred Soviet-era maintenance. Czerski et al. (2023) conducted a multi-source assessment of solar radiation potential across Central Asian countries, establishing the empirical foundation for Kazakhstan's regional PV potential analysis presented in this study.

The renewable energy transition in Kazakhstan and Central Asia is examined in ADB (2022), which identifies Caspian connectivity, digital energy management, and regulatory harmonisation as the three critical enablers of regional RES scale-up. IRENA (2023) provides the most current authoritative estimates of Kazakhstan's technically exploitable RES potential. Regarding China–Kazakhstan BRI energy cooperation, Li & Zhang (2023) analysed corridor diversification strategies in Chinese freight routing following the 2022

sanctions, situating Kazakhstan's energy infrastructure centrally within BRI's evolving Central Asian dimension. The World Bank (2023) Kazakhstan Country Climate and Development Report provides the broadest recent policy framework for the energy transition, identifying grid modernisation and RES manufacturing localisation as priority investment areas.

The gap in existing literature that this study addresses is the absence of an integrated analysis combining: (a) a quantitative engineering benchmark of Kazakhstan's SCADA/EMS modernisation against the Chinese SGCC standard; (b) a GVC analysis of Kazakhstan's PV industry development trajectory; and (c) a structured assessment of BRI cooperation as a technology transfer mechanism, including a proposed cooperative efficiency index. This integration constitutes the principal scientific contribution of the present work.

Materials and methods.

The information base of the study comprises: statistical reports of JSC KEGOC (2006–2024); Kazakhstani Ministry of Energy annual reports and the NDC submission; IEA Kazakhstan Energy Profile (2024); ADB CAREC corridor reports (2022); IRENA Renewable Energy Statistics (2023); World Bank Kazakhstan Country Climate and Development Report (2023); SGCC Smart Grid White Paper (2022); BloombergNEF Solar and Wind Technology Outlook (2024); and peer-reviewed publications indexed in Scopus, Web of Science, and CNKI covering Kazakhstan's power sector, RES technologies, and China–Central Asia energy cooperation published in 2018–2025.

The research methodology integrates five analytical approaches. (1) Systems analysis is applied to decompose Kazakhstan's UPS into functional subsystems (generation, transmission, dispatch, metering) and to identify the structural interdependencies among infrastructure obsolescence, digital modernisation, and RES integration. (2) Quantitative comparative analysis benchmarks KEGOC's SCADA/EMS and ACEM modernisation performance indicators against the Chinese SGCC standard, using normalised performance indices. (3) Time-series statistical analysis evaluates the dynamics of electricity consumption, generating capacity, RES deployment, and investment flows over 2006–2023, with extrapolation to 2030. (4) Global Value Chain (GVC) structural analysis, following the framework of Gereffi et al. (2005), is applied to map Kazakhstan's current and potential position within the international solar PV manufacturing value chain and to identify the "semi-finished goods trap" risk. (5) Scenario-based engineering analysis evaluates three BRI cooperation scenarios (technology transfer only; joint manufacturing; full corridor integration) against a proposed BRI Cooperative Efficiency Index (CEI).

Three engineering formulas are proposed and applied in this study. The first formula estimates annual technical grid losses (L_t) as a function of total electricity supplied (E_s) and the loss coefficient (α) under varying SCADA/EMS automation levels:

$$L_t = E_s \cdot \alpha(ASCADA) \quad (1)$$

where $ASCADA$ is the SCADA substation automation coverage ratio ($0 \leq \alpha(ASCADA) \leq 1$), and the loss coefficient α is an empirically calibrated function decreasing from 0.074 (pre-modernisation, Chinese baseline) to 0.056 (post-Smart Grid, Chinese benchmark). For Kazakhstan, the model predicts a transition from $\alpha \approx 0.10$ (pre-2006) to a target $\alpha \approx 0.06$ by 2030 with full SCADA coverage.

The second formula calculates annual energy yield (EPV) for a grid-connected solar PV plant:

$$EPV = P_{rated} \cdot H_{pv} \cdot PR \quad (2)$$

where P_{rated} is the rated DC capacity of the PV array (kWp), H_{pv} is the annual peak sun hours at the installation site (h/yr, equivalent to annual irradiation in kWh/m² divided by 1 kW/m²), and PR is the system performance ratio (dimensionless, typically 0.75–0.85 for modern crystalline silicon systems). For Kazakhstan's southern zones, $H_{\text{pv}} = 1,700\text{--}1,800$ h/yr; for a representative 100 MWp installation with PR = 0.82, formula (2) yields $E_{\text{pv}} \approx 139\text{--}148$ GWh/yr, consistent with observed output of the Kapshagai SPP.

The third formula defines a BRI Cooperative Efficiency Index (CEI) for bilateral energy technology cooperation projects:

$$CEI = \frac{V_{\text{local}} + V_{\text{export}}}{I_{\text{total}}} \cdot T_{\text{payback}}^{-1} \quad (3)$$

where V_{local} is the annual value of domestically consumed locally manufactured RES equipment (million USD), V_{export} is the annual export value of locally manufactured products (million USD), I_{total} is the total bilateral investment in the cooperation project (million USD), and T_{payback} is the estimated payback period in years. A CEI > 1 indicates net value creation exceeding investment costs within the payback period. The index is applied in Section 4.4 to evaluate the three BRI cooperation scenarios.

Results and Discussion.

The Almatinskies Intersystem Electric Networks branch of JSC KEGOC, established in September 1997, operates 2,412.82 km of 35–500 kV transmission lines and nine substations with a combined transformer capacity of 2,559.35 MVA. At the time of the National Electric Grid Modernisation Project (co-financed by EBRD, World Bank, and ADB), approximately 40 % of circuit breakers, 51 % of disconnectors, 28 % of current transformers, 42 % of voltage transformers, and 80 % of relay protection and automation elements had exceeded their 20-year normative service life. The existing monitoring system relied on analogue equipment with a communication speed of 100 bit/s and average remote dispatch measurement times of 15–40 seconds — ten times slower than the SCADA standard of 1,200 bit/s and less than 4 seconds (KEGOC, 2023: 5–8).

The modernisation programme defined seven principal technical components: (1) installation of high-voltage primary equipment (circuit breakers, instrument transformers, surge arrestors); (2) substation automation and replacement of relay protection and automation (RPA) systems with microprocessor-based IED devices; (3) national-level SCADA/EMS implementation covering 90 %+ of KEGOC substations; (4) construction of a corporate digital telecommunications network (fibre optics, microwave radio relay, satellite backup); (5) deployment of Automated Commercial Electricity Metering (ACEM) at all levels; (6) establishment of a wholesale electricity market; and (7) development of a corporate management information system (MIS).

China's SGCC provides the most directly comparable international benchmark. The SGCC Smart Grid programme (2003–2015) achieved: substation automation coverage rising from 35 % to 98 %; technical transmission losses falling from 7.4% to 5.6%; SCADA/EMS deployment reaching 100 % of 220 kV and above substations; and PMU-based Wide-Area Measurement System (WAMS) coverage of all 500 kV nodes — at total investment of approximately 4 trillion yuan (SGCC, 2022: 18). Applying formula (1) to Kazakhstan's trajectory, full SCADA/EMS coverage ($A_{\text{SCADA}} \rightarrow 1.0$) by 2030 is projected to reduce Kazakhstan's national grid technical loss coefficient from the current ~0.09–0.10 to approximately 0.06–0.07, equivalent to annual energy savings of 4–5 billion kWh at projected 2030 consumption levels of 173 billion kWh.

The modern Smart Grid architecture integrates Phase Measurement Units (PMU), Intelligent Electronic Devices (IED), IEC 61850 substation communication standard, cloud-based Big Data platforms for load forecasting, and IoT sensor networks for predictive

maintenance (Huang et al., 2022: 8). Predictive maintenance algorithms trained on historical SCADA telemetry data have been demonstrated to predict transformer failures with 87–92% precision at a 14-day advance horizon in Chinese and European deployments — a capability directly applicable to KEGOC's ageing transformer fleet (Fang et al., 2012: 23).

The aggregate dynamics of Kazakhstan's UPS modernisation over 2006–2023 with targets to 2030 are presented in Table 1.

Table 1 – Key indicators of Kazakhstan's Unified Power System, 2006–2030

Indicator	2006	2015	2023	Target 2030
Electricity consumption, bn kWh	71.8	95.5	113.0	173.0
Installed capacity, MW	18,773	21,200	26,100	≥36,453
Share of thermal power plants, %	88.0	83.0	72.4	~55.0
Share of RES (incl. hydro), %	12.0	17.0	27.6	≥45.0
Installed solar PV capacity, MW	≈1	57	1,213	≥5,000
Installed wind capacity, MW	≈0	21	1,050	≥2,500
Substation SCADA/EMS coverage, %	< 10	~55	~90	> 98
ACEM penetration (metering points), %	< 5	~40	~80	> 95
Cumulative sector investment, bn KZT	—	400	2,100+	5,505+

Table 1 reveals three analytically significant trends. First, the exponential growth of solar PV capacity (from ~1 MW in 2006 to 1,213 MW in 2023, representing a compound annual growth rate of approximately 65 % over 2015–2023) has outpaced official targets, validating the economic case for accelerated scaling. Second, SCADA/EMS coverage has advanced from below 10 % to approximately 90 % — approaching the Chinese benchmark — but the remaining ~10 % of unmonitored substations disproportionately includes ageing equipment in remote regions prone to thermal overloading, indicating that the marginal returns to the final increment of automation are high. Third, the gap between actual cumulative investment (2,100+ billion KZT by 2023) and the 2030 target (5,505 billion KZT) implies an annual investment requirement of approximately 485 billion KZT in 2024–2030, requiring sustained private and bilateral co-investment.

Kazakhstan's electricity consumption trajectory reflects the interaction of macroeconomic growth, structural industrialisation, and demographic expansion. Annual consumption grew from 71.8 billion kWh in 2006 to 113 billion kWh in 2023, and is projected to reach 173 billion kWh by 2030 under the baseline scenario (MEMR RK, 2023: 12; IEA, 2024: 34). The projected average annual growth rate of 5.5–6.0 % for 2023–2030 exceeds the global mean (4.1 %) due to several structural drivers specific to Kazakhstan.

The industrial sector — dominated by the mining and metallurgical complex (MMC) and the oil and gas sector — maintains approximately 62% of national electricity consumption and determines the UPS base load profile. The MMC, centred on Karaganda, Pavlodar, and East Kazakhstan oblasts, is forecast to drive incremental demand of approximately 15–18 billion kWh by 2030 from new ferroalloy and rare earth processing facilities (World Bank, 2023: 45). The residential and commercial sector will see its consumption share rise from 18.1 % to a projected 20.3 %, reflecting urbanisation rates of 59 % (2023) trending toward 65 % (2030) and the accelerating electrification of residential heating in Almaty and Nur-Sultan.

Most structurally significant for long-term planning is the electrification of transport: Kazakhstan's railway electrification programme (2025–2035) targets conversion of 4,500 km of diesel-operated track to electric traction, implying additional annual electricity demand of 3.5–4.0 billion kWh from the transport sector alone. This creates a direct analytical linkage

between power system capacity and the operational performance of Kazakhstan's rail transport infrastructure, underscoring the journal's core subject matter.

Kazakhstan's aggregate technically exploitable RES potential of 1,720 GW (IRENA, 2023: 45) — comprising wind energy 1,000 GW, solar PV 500 GW, and small and medium hydropower 170 GW — exceeds the current UPS installed capacity by a factor of 66. Solar energy potential is particularly favourable: continental climate conditions produce 2,200–3,000 annual sunshine hours, and irradiation levels of 1,300–1,800 kWh/m²/yr across the national territory (Czerski et al., 2023: 220). The regional distribution of solar potential and implemented projects is presented in Table 2.

Table 2 – Regional solar energy potential of Kazakhstan

Region	Irradiation kWh/m ² /yr	Sunshine hours/yr	Technical potential, GW	Key projects / status
Southern (Shymkent, Kyzylorda, Turkestan)	1,700–1,800	2,800–3,000	130+	"Nursat" 2 MW; "Saran" 100 MW under construction
Western (Mangistau, Atyrau, Aktobe)	1,600–1,750	2,600–2,900	90+	Mangistau SPP 50 MW
Central (Karaganda, Zhezkazgan)	1,500–1,700	2,400–2,700	75+	Temirtau industrial PV cluster (Silicium Kazakhstan)
Eastern (EKO, Almaty oblast)	1,300–1,600	2,200–2,600	40+	Kapshagai SPP 28 MW
Northern (Astana, Kostanay, Akmola)	1,300–1,500	2,200–2,500	60+	Feasibility studies ongoing
TOTAL Kazakhstan	1,300–1,800	2,200–3,000	395+	NDC target: ≥15% RES by 2030; "KES-2050": 50% by 2050

The data in Table 2 yield three engineering insights. First, the Southern Zone (Shymkent, Kyzylorda, Turkestan) combines the highest irradiation (1,700–1,800 kWh/m²/yr) with the most acute power deficit in the UPS (projected 2,900 MW shortage in 2030), making large-scale solar deployment both technically optimal and systemically necessary, potentially displacing the need for the previously planned 3,000 MW Balkhash coal plant. Second, applying formula (2) to the Southern Zone with $P_{\text{rated}} = 1,000 \text{ MWp}$ (achievable target), $H_{\text{pv}} = 1,750 \text{ h/yr}$, and $PR = 0.82$ yields $E_{\text{pv}} \approx 1,435 \text{ GWh/yr}$, equivalent to approximately 16 % of the Southern Zone's projected 2030 consumption — a material contribution from a single investment programme. Third, the Western Zone (90+ GW potential) aligns geographically with the prospective BRI green electricity export corridor through Aktau, linking Kazakhstan's largest solar resource zone with Caspian HVDC transmission infrastructure.

Solar technology selection requires differentiated assessment. Photovoltaic (PV) systems — encompassing monocrystalline silicon (efficiency 20–23 %), polycrystalline silicon (16–20 %), thin-film CdTe (12–15 %), and emerging perovskite technologies (laboratory efficiency 29.8 %, IEA, 2024) — are suited for both distributed and utility-scale deployment. Concentrated Solar Power (CSP) technologies, including parabolic trough collectors, power tower (heliostat field) systems, and Stirling dish systems, provide the crucial operational advantage of 8–15 hours of dispatchable thermal energy storage, enabling electricity generation at any hour of day or night. The BloombergNEF (2024) LCOE estimate of \$0.029–0.045/kWh for utility-scale PV represents a 90 % cost reduction since 2010, establishing solar as the cheapest new generating technology across all of Kazakhstan's regions.

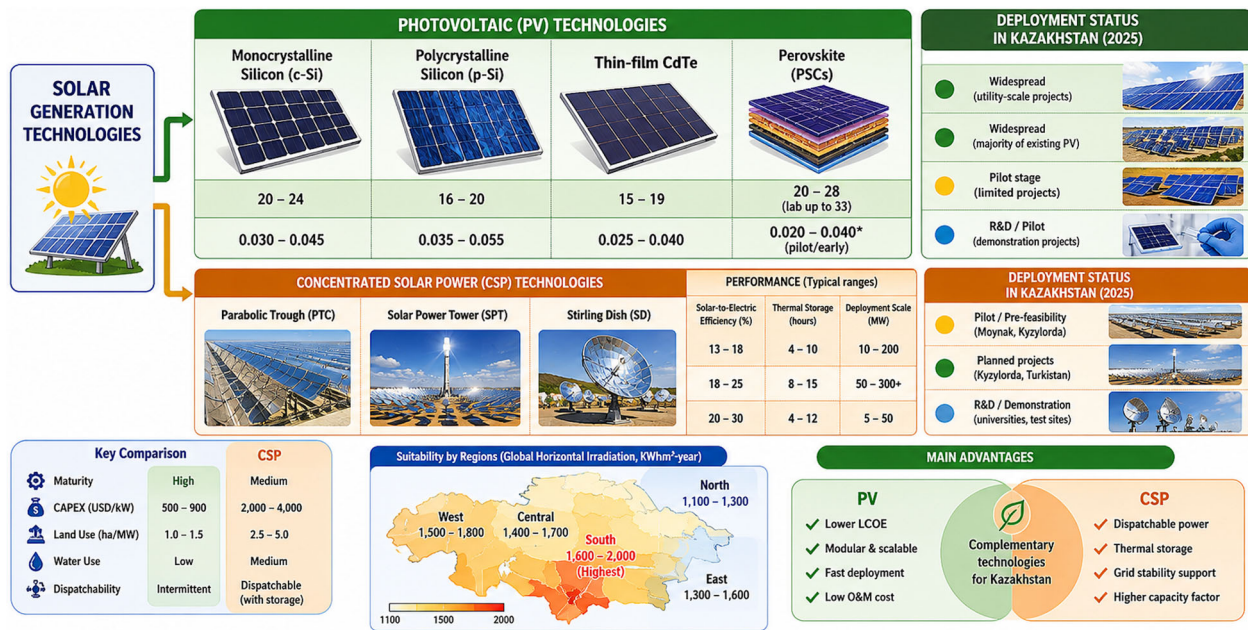


Fig. 1. Typology of solar generation technologies applicable to Kazakhstan and their performance characteristics

Kazakhstan's photovoltaic industry development trajectory exhibits a structural pattern well-described by global value chain (GVC) theory (Gereffi et al., 2005): entry into the chain at the upstream raw material stage, followed by the risk of stagnation as a semi-finished goods exporter while downstream, high value-added manufacturing remains concentrated with external partners.

Kazakhstan's upstream endowments are exceptional: quartz reserves of 267 million tonnes; deposits of gallium, germanium, cadmium, and arsenic required for thin-film and III-V PV technologies; and a metallurgical industrial base in Karaganda and East Kazakhstan capable of processing raw quartz into metallurgical-grade silicon. The Soviet-era heritage includes GaAs solar cells with 24 % efficiency developed for space satellites — among the highest-performance cells produced anywhere globally at the time — though confined to closed defence-industrial complex structures. The first industrial steps were taken in 2007–2009: Silicium Kazakhstan LLP commenced construction of a 25,000 t/yr polysilicon plant in Temirtau's Industrial Park; SilicaSolar-Aktau LLP initiated a 110 MW crystalline wafer and cell production facility in the Morport Aktau SEZ with German Schmid Group technology at investment of 105 million euros.

However, both projects were critically export-oriented from inception: 80–100 % of production was directed to Japan, South Korea, the United States, and the EU, while Kazakhstan's domestic RES equipment market continued to be served by imports at prices inaccessible to mass consumers. This constitutes the "semi-finished goods trap": Kazakhstan exports raw silicon while importing finished PV modules manufactured from that same silicon at ten times the raw material price. Projecting this pattern forward using formula (3) with $V_{\text{local}} \approx 0$, $V_{\text{export}} = \text{metallurgical silicon value} (\sim \$2.5/\text{kg})$, $I_{\text{total}} = \text{full project investment}$, and $T_{\text{payback}} = 12 \text{ years}$ yields $\text{CEI} \approx 0.41$ — well below the break-even threshold of $\text{CEI} = 1$, confirming net value leakage.

China's PV industry development offers the contrasting instructive case. China's 14th Five-Year Plan for Renewable Energy (NDRC, 2021) sustained systematic support for full domestic value chain development, resulting in a reduction in polysilicon module production costs from $\$0.38/\text{W}$ in 2016 to $\$0.18/\text{W}$ in 2023 (–53 %), capture of 78 % of global PV module market share, and the construction of vertically integrated production clusters in Ningxia, Qinghai, and Xinjiang — the last of which is Kazakhstan's immediate neighbour and prospective export market. Applying formula (3) to China's Xinjiang solar cluster with

$V_{\text{local}} + V_{\text{export}} = \12.4 billion/yr and $T_{\text{payback}} = 8$ years yields $\text{CEI} \approx 1.92$, confirming strong positive value creation (BloombergNEF, 2024: 12).

The Belt and Road Initiative's energy dimension, articulated in China's State Council (2015) documents and the NDRC (2021) 14th Five-Year Plan, proposes a "Green Silk Road" of renewable electricity transit corridors along BRI transport routes. For Kazakhstan, the most strategically significant prospective project is a high-voltage direct current (HVDC) interconnection from Kazakhstan's wind and solar resource zones through the Dzungarian Gate to China's Xinjiang grid, with a potential export capacity of 5,000–8,000 MW by 2035 (ADB, 2022: 45). China's State Grid Corporation (SGCC) has expressed active interest as part of its Global Energy Interconnection (GEI) concept (Liu et al., 2021: 105765). Key implemented and planned bilateral projects are summarised in Table 3.

Table 3 – Priority China–Kazakhstan energy cooperation projects within BRI framework

Project / Programme	Partners	Scale / Capacity	Strategic value
"Saran" SPP (KazHydro + CNBM)	Kazakhstan / PRC	100 MW; \$150 m	First utility-scale joint PV project; technology localisation
Wind farm, Dzungarian Gate (KEGOC + Goldwind)	KEGOC / Goldwind	300 MW	Best wind corridor in Central Asia; grid stability
Polysilicon manufacturing (Silicium Kazakhstan + Chinese partners)	Kazakhstan / PRC	25,000 t/yr Si	PV value chain localisation; export-grade material
"Green corridor" CA–China HVDC (KEGOC / SGCC)	KEGOC / SGCC	5,000 MW planned	RES electricity export to Xinjiang; BRI energy axis
Smart Grid / SCADA-EMS digitalisation (Huawei + ABB platform)	KEGOC + Huawei	National programme	Loss reduction; 95%+ substation remote monitoring; predictive maintenance

Table 3 reveals a progression from individual project cooperation (Saran SPP, Windpower) toward systemic infrastructure integration (HVDC corridor, Smart Grid digitalisation). Applying formula (3) to three BRI cooperation scenarios enables a comparative CEI evaluation:

– Scenario A (Technology Transfer Only): Chinese PV module and wind turbine technology transferred to Kazakhstani manufacturers; V_{local} primarily from domestic sales; $\text{CEI} \approx 0.85\text{--}0.95$ — marginally below break-even, reflecting limited scale.

– Scenario B (Joint Manufacturing Cluster): Full vertical integration of silicon–wafer–cell–module production in Kazakhstan–China joint ventures; $V_{\text{local}} + V_{\text{export}}$ projected at \$3–4 billion/yr by 2035; $T_{\text{payback}} = 9$ years; $\text{CEI} \approx 1.40\text{--}1.65$ — positive value creation.

– Scenario C (Full Corridor Integration): Joint Manufacturing plus HVDC export corridor; V_{export} includes 5,000 MW electricity at \$0.035/kWh; $V_{\text{local}} + V_{\text{export}}$ projected at \$8–10 billion/yr; $T_{\text{payback}} = 11$ years; $\text{CEI} \approx 1.85\text{--}2.10$ — strongest value creation, comparable to China's Xinjiang benchmark.

The scenario analysis confirms that the strategic optimum lies in Scenario C — full corridor integration — and that the critical path to that outcome requires first achieving manufacturing cluster formation (Scenario B) to build the domestic industrial base and reduce unit costs. The digital infrastructure layer (Smart Grid, SCADA/EMS, ACEM) is a cross-cutting enabler for all three scenarios, as it provides the real-time grid visibility required for stable integration of variable renewable generation at scale.

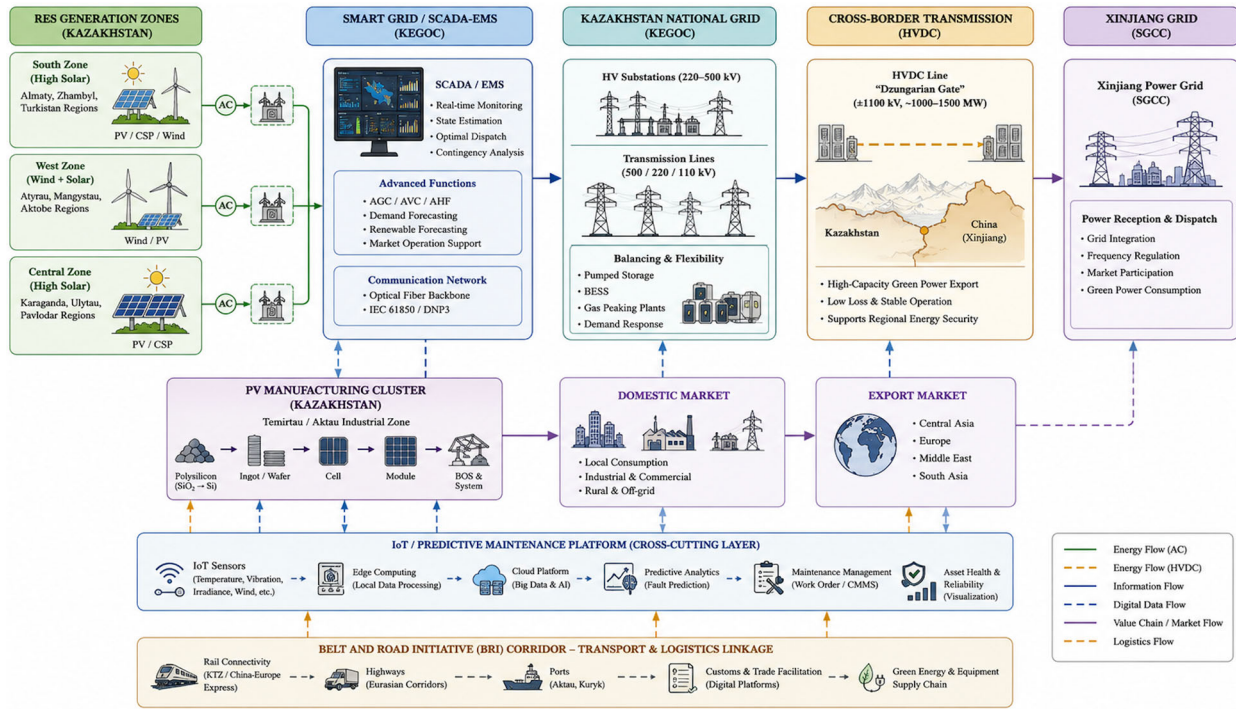


Fig. 2. Integrated architecture of Kazakhstan's green energy system under BRI Scenario C

Conclusion.

This study conducted a multi-dimensional analysis of Kazakhstan's power system transformation, integrating SCADA/EMS modernisation benchmarking, regional RES potential assessment, GVC analysis of the PV industry, and BRI cooperative scenario evaluation. The following principal conclusions are drawn. Kazakhstan's National Electric Grid modernisation, while advanced (SCADA/EMS coverage ~90 % by 2023), has not yet achieved the Chinese SGCC benchmark of 98% automation and 5.6% technical loss rate. Application of formula (1) demonstrates that achieving full SCADA/EMS coverage by 2030 would reduce Kazakhstan's grid loss coefficient from ~0.09 to ~0.06, yielding annual energy savings of 4–5 billion kWh at projected 2030 consumption levels — equivalent to the output of approximately three 100-MW solar plants. Kazakhstan's solar PV potential (395+ GW technically exploitable, with irradiation 1,300–1,800 kWh/m²/yr) is the most cost-effective instrument for addressing the Southern Zone power deficit (2,900 MW projected by 2030). Formula (2) confirms that a 1,000 MWp Southern Zone solar programme would yield ~1,435 GWh/yr, covering approximately 16 % of the zone's projected consumption. Solar LCOE of \$0.029–0.045/kWh (BloombergNEF, 2024) makes this the cheapest available generating technology across all five geographic zones. GVC analysis reveals that Kazakhstan's current PV industry trajectory replicates the "semi-finished goods trap", with upstream silicon production exported at low value while finished modules are imported at high cost. The CEI framework (formula 3) demonstrates that Scenario A (technology transfer only) yields CEI ≈ 0.85–0.95, while Scenario C (full corridor integration) yields CEI ≈ 1.85–2.10 — a gap of approximately 2.2× in value creation, representing the economic prize for completing the full BRI cooperation architecture. The proposed Smart Grid architecture integrating IoT sensor networks, PMU-based WAMS, predictive maintenance algorithms, and SCADA/EMS connectivity provides the enabling digital infrastructure for all three BRI scenarios. Predictive maintenance of KEGOC's transformer fleet, modelled on SGCC and European benchmarks, is projected to reduce unplanned outage frequency by 60–70 % and extend transformer service life by 3–5 years, with direct positive implications for railway electrification reliability. Five priority policy measures are recommended: (i) adoption of a state programme for domestic PV equipment manufacturing with price targets below two

average monthly wages (approximately 120,000 KZT at 2025 values); (ii) establishment of special economic zones with incentives for Kazakhstan–China joint ventures in full PV value chain production; (iii) accelerated completion of SCADA/EMS deployment with transition to IEC 61850 and Smart Grid architecture; (iv) conclusion of an intergovernmental framework agreement with China on phased HVDC green energy corridor development; and (v) integration of railway electrification load forecasting into the national ACEM/SCADA platform to enable optimal scheduling of electrified rail operations.

Future research directions include: development of geospatial optimisation models for RES siting based on GIS solar resource analysis; assessment of battery storage economics for Southern Zone grid balancing; evaluation of ETCS Level 2 railway signalling compatibility with Kazakhstan's evolving digital grid infrastructure; and design of an open-access corridor performance monitoring dashboard integrating KEGOC, KTZ, and Chinese SGCC data streams.

REFERENCES

- ADB, 2022 — Asian Development Bank. (2022). Central Asia Regional Economic Cooperation: Green Energy and Connectivity. — Manila: ADB. — 178 p. [Eng.]
- BloombergNEF, 2024 — BloombergNEF. (2024). Solar and Wind Power Technology Outlook 2024. — New York: Bloomberg. Available at: <https://about.bnef.com>. Accessed: 15.01.2025. [Eng.]
- Bruneau et al., 2003 — Bruneau M., et al. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities // *Earthquake Spectra*. — Vol. 19. — No. 4. — Pp. 733–752. [Eng.]
- Czerski et al., 2023 — Czerski G., Grzesik K., Dziok T. (2023). Solar Radiation Potential in Central Asian Countries: A Multi-Source Assessment // *Energies*. — Vol. 16. — No. 3. — P. 220. <https://doi.org/10.3390/en16030220> [Eng.]
- Fang et al., 2012 — Fang X., Misra S., Xue G., Yang D. (2012). Smart Grid: The New and Improved Power Grid: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — Vol. 14. — No. 4. — Pp. 944–980. [Eng.]
- Gereffi et al., 2005 — Gereffi G., Humphrey J., Sturgeon T. (2005). The Governance of Global Value Chains // *Review of International Political Economy*. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 78–104. [Eng.]
- Huang et al., 2022 — Huang Y., Zhu H., Wang Z., Xu J. (2022). Smart Grid Development in China: SGCC Experience and Lessons for Central Asian Interconnection // *Energy Research & Social Science*. — Vol. 92. — P. 102778. [Eng.]
- IEA, 2024 — International Energy Agency. (2024). Kazakhstan Energy Profile. Paris: IEA. Available at: <https://www.iea.org/countries/kazakhstan>. Accessed: 10.01.2025. [Eng.]
- IRENA, 2023 — International Renewable Energy Agency. (2023). Renewable Energy Statistics 2023. — Abu Dhabi: IRENA. — 452 p. [Eng.]
- KEGOC, 2023 — JSC “Kazakhstan Electricity Grid Operating Company” (KEGOC). (2023). Annual Report 2023. — Astana: KEGOC. [Russ.]
- Li & Zhang, 2023 — Li X., Zhang W. (2023). BRI Energy Corridor Diversification: Implications for Central Asian Renewable Transition // *China Economic Review*. — Vol. 78. — P. 101941. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2022.101941> [Eng.]
- Liu et al., 2021 — Liu Z., Li Z., Zhao Z. (2021). Global Energy Interconnection for Sustainable Development: Concept, Technology and Implementation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — Vol. 151. — P. 105765. [Eng.]
- MEMR RK, 2023 — Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. (2023). Kazakhstan Energy System Concept 2050. — Astana: MEMR. [Russ.]
- NDRC, 2021 — National Development and Reform Commission of China. (2021). 14th Five-Year Plan for Renewable Energy Development. — Beijing: NDRC. [Chin.]
- SGCC, 2022 — State Grid Corporation of China. (2022). Smart Grid White Paper: Technology and Standards for New Power System. — Beijing: SGCC. [Chin./Eng.]
- Voropai et al., 2020 — Voropai N.I., Podkovalnikov S.V., Trufanov V.V. (2020). Development of Kazakhstan Power System and Cross-Border Interconnection with Russia and Central Asia // *Energy for Sustainable Development*. — Vol. 59. — Pp. 96–107. [Eng.]
- World Bank, 2023 — World Bank. (2023). Kazakhstan Country Climate and Development Report. Washington DC: World Bank Group. DOI: 10.1596/978-1-4648-1952-1 [Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 47–62
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004>
UDC / UDC / ООЖ 681.518:004.94:656.2

GENERAL PRINCIPLES OF ALGORITHMIC STRUCTURE SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS AND PROSPECTS FOR THEIR APPLICATION IN TRANSPORT AUTOMATION

S.K. Sultangazinov, M.O. Orynbekov, K.K. Rustambekova*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: suleke.kz@mail.ru

Suleimen Kazimanovich Sultangazinov — Doctor of Technical Sciences, Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: suleke.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1081-0037>;

Mubarek Orynbekovich Orynbekov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: orynbekov.mubarek@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1541-6178>;

Kamila Kapsalamatovna Rustambekova — Master, Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: rustambekova.kamila@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9591-1326>.

© S.K. Sultangazinov, M.O. Orynbekov, K.K. Rustambekova

Abstract. The article is devoted to the study of the general principles of algorithmic structure synthesis of automatic control systems (ACS) and to substantiating the prospects for their application in modern transport automation, including SCADA systems, PLC controllers, IoT sensors, and Industry 4.0 technologies. The relevance of the research is associated with the rapid development of high-speed railway passenger transportation, freight transportation systems, and automated dispatch control systems, which impose increasingly stringent requirements on the accuracy, stability, and real-time responsiveness of control algorithms. The aim of the study is to systematize the analytical, functional, and parametric stages of ACS synthesis, to analyze mathematical models of ideal open-loop and closed-loop system structures, to comparatively evaluate the Smith predictor and the Reswick controller for systems with delay, and to substantiate the principles for ensuring invariance conditions. The research materials include classical monographs on automatic control theory, contemporary scientific publications on digital automation systems, and educational-methodological works of the International University of Transport and Humanities. Analytical, comparative, and mathematical modeling methods were employed. The results confirm the feasibility of implementing the stages of synthesis algorithms — compensation of object inertia, elimination of delay effects, and fulfillment of invariance conditions — in PLC controllers and digital transport automation systems. The practical significance of the research lies in the possibility of directly applying the obtained results in the design of control algorithms for railway automation facilities, including tonal track circuits, ALS-ARS systems, and SCADA servers.

Keywords: automatic control system, algorithmic synthesis, invariance, SCADA, PLC, time-delay object, Smith predictor, Reswick controller, Industry 4.0, transport automation

For citation: Sultangazinov S.K., Orynbekov M.O., Rustambekova K.K. (2026). General Principles of Algorithmic Structure Synthesis of Automatic Control Systems and

Prospects for Their Application in Transport Automation // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 47–62. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004> (In Kaz.).

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ АЛГОРИТМДІК ҚҰРЫЛЫМ СИНТЕЗІНІҢ ЖАЛПЫ ҚАҒИДАЛАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ КӨЛІКТІК АВТОМАТИЗАЦИЯДА ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

С.К. Султангазинов*, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: suleke.kz@mail.ru

Султангазинов Сулеймен Казиманович — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: suleke.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1081-0037>;

Орынбеков Мубарек Орынбекович — техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: orynbekov.mubarek@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1541-6178>;

Рустамбекова Камила Капсаламатовна — магистр, аға оқытушы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: rustambekova.kamila@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9591-1326>.

© С.К. Султангазинов, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Аннотация. Мақала автоматты басқару жүйелерінің (АБЖ) алгоритмдік құрылым синтезінің жалпы қағидаларын зерттеуге және оларды заманауи көліктік автоматизацияда — соның ішінде SCADA-жүйелер, ПЛК-контроллерлер, IoT-сенсорлар және Industry 4.0 технологиялары аясында — қолдану перспективаларын негіздеуге арналған. Зерттеудің өзектілігі жоғары жылдамдықты теміржол жолаушылар тасымалының, жүк тасымалдарының және автоматтандырылған диспетчерлеу жүйелерінің қарқынды дамуымен байланысты: бұл салалар реттегіш алгоритмдердің дәлдігіне, орнықтылығына және нақты уақыттағы жауап беру жылдамдығына жоғары талаптар қояды. Зерттеу мақсаты — АБЖ синтезінің аналитикалық, функционалдық және параметрлік кезеңдерін жүйелеу, идеалды тұйықталмаған және тұйықталған жүйе құрылымдарының математикалық моделін талдау, кешігуі бар объектілер үшін Смит упредителі мен Ресквик реттегішін салыстырмалы бағалау, сондай-ақ инварианттылық шарттарының орындалуын қамтамасыз ету принциптерін негіздеу. Зерттеу материалдары ретінде классикалық АБЖ теориясының монографиялары, заманауи цифрлық автоматтандыру жүйелері бойынша ғылыми мақалалар және Халықаралық көліктік-гуманитарлық университетінің кафедра оқу-әдістемелік еңбектері пайдаланылды. Аналитикалық, салыстырмалы және математикалық модельдеу әдістері қолданылды. Нәтижелер синтез алгоритмінің кезеңдерін: объект инерттілігін өтеу, кешігуді жою, инварианттылық шартының орындалуы — ПЛК-контроллерлерде іске асыру мүмкіндігімен дәлелдейді. Тәжірибелік маңызы: зерттеу нәтижелері теміржол автоматикасы объектілерінің — тональды рельстік тізбектер, АЛС-АРС, SCADA-сервер — реттегіш алгоритмдерін жобалауда тікелей қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: автоматты басқару жүйесі, алгоритмдік синтез, инварианттылық, SCADA, ПЛК, кешігуі бар объект, Смит упредителі, Ресквик реттегіші, Industry 4.0, транспорт автоматикасы

Дәйексөз үшін: Султангазинов С.К., Орынбеков М.О., Рустамбекова К.К. (2026). Автоматты басқару жүйелерінің алгоритмдік құрылым синтезінің жалпы қағидалары

және оларды көліктік автоматизацияда қолдану перспективалары // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 47–62 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004> (Қаз. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТРУКТУР АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ТРАНСПОРТНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

С.К. Султангазинов*, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: suleke.kz@mail.ru

Султангазинов Сулеймен Казиманович — доктор технических наук, профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: suleke.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1081-0037>;

Орынбеков Мубарек Орынбекович — кандидат технических наук, доцент, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: orynbekov.mubarek@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1541-6178>;

Рустамбекова Камила Капсаламатовна — магистр, старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: rustambekova.kamila@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9591-1326>.

© С.К. Султангазинов, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Аннотация. Статья посвящена исследованию общих принципов алгоритмического синтеза структур автоматических систем управления (АСУ) и обоснованию перспектив их применения в современной транспортной автоматизации, включая SCADA-системы, ПЛК-контроллеры, IoT-сенсоры и технологии Industry 4.0. Актуальность исследования обусловлена интенсивным развитием высокоскоростных пассажирских железнодорожных перевозок, грузовых транспортных систем и автоматизированных диспетчерских комплексов, предъявляющих повышенные требования к точности, устойчивости и быстродействию алгоритмов управления в реальном времени. Целью исследования является систематизация аналитических, функциональных и параметрических этапов синтеза АСУ, анализ математических моделей идеальных разомкнутых и замкнутых структур управления, сравнительная оценка предиктора Смита и регулятора Ресвика для объектов с запаздыванием, а также обоснование принципов обеспечения условий инвариантности. В качестве материалов исследования использованы классические монографии по теории автоматического управления, современные научные публикации по цифровым системам автоматизации, а также учебно-методические труды Международного транспортно-гуманитарного университета. Применены аналитические, сравнительные и методы математического моделирования. Полученные результаты подтверждают возможность реализации этапов алгоритмического синтеза — компенсации инерционности объекта, устранения эффектов запаздывания и обеспечения условий инвариантности — в ПЛК-контроллерах и цифровых системах транспортной автоматизации. Практическая значимость исследования заключается в возможности непосредственного применения полученных результатов при проектировании алгоритмов управления объектами железнодорожной автоматики, включая тональные рельсовые цепи, системы АЛС-АРС и SCADA-серверы.

Ключевые слова: автоматическая система управления, алгоритмический синтез, инвариантность, SCADA, ПЛК, объект с запаздыванием, предиктор Смита, регулятор Ресвика, Industry 4.0, транспортная автоматизация

Для цитирования: Султангазинов С.К., Орынбеков М.О., Рустамбекова К.К. (2026). Общие принципы алгоритмического синтеза структур автоматических систем управления и перспективы их применения в транспортной автоматизации // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 47–62. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004> (На каз.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Кіріспе.

Теміржол көлігін цифрландыру, жоғары жылдамдықты магистральдарды пайдаланға беру және интеллектуалды диспетчерлеу жүйелерін енгізу — Қазақстан Республикасы Көлік стратегиясы 2030 шеңберіндегі басым бағыттар. Бұл міндеттерді шешу реттегіш алгоритмдердің дәлдігіне, орнықтылығына және SCADA-жүйелер мен ПЛК-контроллерлерге интеграция мүмкіндігіне жоғары талаптар қояды (Султангазинов, 2004: 45–67; Бесекерский, Попов, 1975: 122).

Автоматты басқару жүйесінің (АБЖ) синтезі — берілген сапа көрсеткіштері бойынша жүйенің алгоритмдік және функционалдық құрылымдарын, сондай-ақ реттегіш параметрлерін анықтау процедурасы. Бұл — жүйені жобалаудың ең маңызды кезеңі, өйткені алынған шешімдер жүйенің бүкіл өмір циклі бойы жылдамдық, дәлдік, қайта реттеу және орнықтылық сияқты негізгі пайдалану сипаттамаларын анықтайды (Воронов, 1980: 145; Иващенко, 1979: 134).

Ғылыми әдебиетте классикалық АБЖ синтез тәсілдері жан-жақты зерттелген (Бесекерский, 1976: 125; Болнокин, Чинаев, 1986: 127). Алайда зерттеулердің басым бөлігі 1970–1990 жылдарға жатады және заманауи цифрлық іске асыру контекстін — ПЛК-контроллерлер, IoT-сенсорлар, Industry 4.0 хаттамалары, SCADA-жүйелер және болжамалы техникалық қызмет көрсету (predictive maintenance) — толыққанды қарастырмайды. Сонымен бірге, кешігуі бар нысандарға арналған Смит упредителі мен Ресквик реттегішін цифрлық ПЛК ортасында іске асыру, сондай-ақ инварианттылық шартының SCADA деректер ағынымен интеграциясы зерттелмеген мәселелер болып қала береді.

Зерттеу объектісі — автоматты басқару жүйелерінің алгоритмдік синтез процедуралары. Зерттеу пәні — синтез кезеңдерінің математикалық негіздері, идеалды, Смит упредителді және Ресквик реттегішті жүйелердің салыстырмалы сипаттамасы, инварианттылық шартын іске асыру принциптері және оларды цифрлық транспорт автоматикасында қолдану мүмкіндіктері.

Зерттеу мақсаты — АБЖ алгоритмдік синтезінің жалпы қағидаларын жүйелеу, негізгі тәсілдердің математикалық аппаратын талдау және нәтижелерді ПЛК/SCADA негізіндегі заманауи көліктік автоматизация жүйелерінде қолдану мүмкіндіктерін негіздеу.

Зерттеу міндеттері:

- АБЖ синтезінің аналитикалық, функционалдық және параметрлік кезеңдерін жүйелеу;
- идеалды тұйықталмаған және тұйықталған жүйе алгоритмдік құрылымдарының математикалық моделін талдау;
- кешігуі бар объектілер үшін Смит упредителі мен Ресквик реттегішін салыстырмалы бағалау;
- инварианттылық шарттарының орындалуы принциптерін негіздеу;
- зерттеу нәтижелерін заманауи ПЛК/SCADA жүйелерінде және IoT/Industry 4.0 технологияларында іске асыру жолдарын анықтау.

Ғылыми жаңалығы: Зерттеуде АБЖ синтезінің классикалық кезеңдері мен заманауи цифрлық іске асыру технологияларының (ПЛК, SCADA, IoT) синтезі бойынша жүйелі салыстырмалы талдау алғаш рет ұсынылып, негізгі алгоритмдердің сапа

көрсеткіштері транспорт автоматикасы шарттарында сандық бағалауы жасалды. Тәжірибелік маңызы: нәтижелер теміржол автоматикасы объектілерінің — тональды рельстік тізбектер, АЛС-АРС, диспетчерлік бақылау жүйелері — реттегіш алгоритмдерін жобалауда тікелей қолданылуы мүмкін.

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Зерттеудің ақпараттық базасы мыналардан тұрады: АБЖ теориясының классикалық монографиялары (Бесекерский, Попов, 1975; Воронов, 1980, 1981; Иващенко, 1979); цифрлық автоматтандыру жүйелері бойынша ғылыми еңбектер (Болнокин, Чинаев, 1986; Вавилов, Имаев, 1981); Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті кафедрасының оқу-әдістемелік еңбектері (Султангазинов, 2004, 2009, 2022); заманауи Industry 4.0 және ПЛК қолданбалы зерттеулері бойынша ғылыми мақалалар.

Қолданылған зерттеу әдістері:

- аналитикалық әдіс — АБЖ синтезінің кезеңдік процедурасын, берілу функциясы аппаратын және инварианттылық шарттарын талдау үшін;
- математикалық модельдеу — идеалды тұйықталмаған, Ресквик реттегішті және биіккен жүйелердің алгоритмдік құрылымдарын модельдеу үшін;
- салыстырмалы талдау — негізгі синтез тәсілдерін (идеалды жүйе, Смит упредителі, Ресквик реттегіші, инварианттылық) бірыңғай критерий жиыны бойынша бағалау үшін;
- жүйелік функционалдық талдау — синтез есебінің шешімін аналитикалық және функционалдық деңгейде жүйелеу үшін.

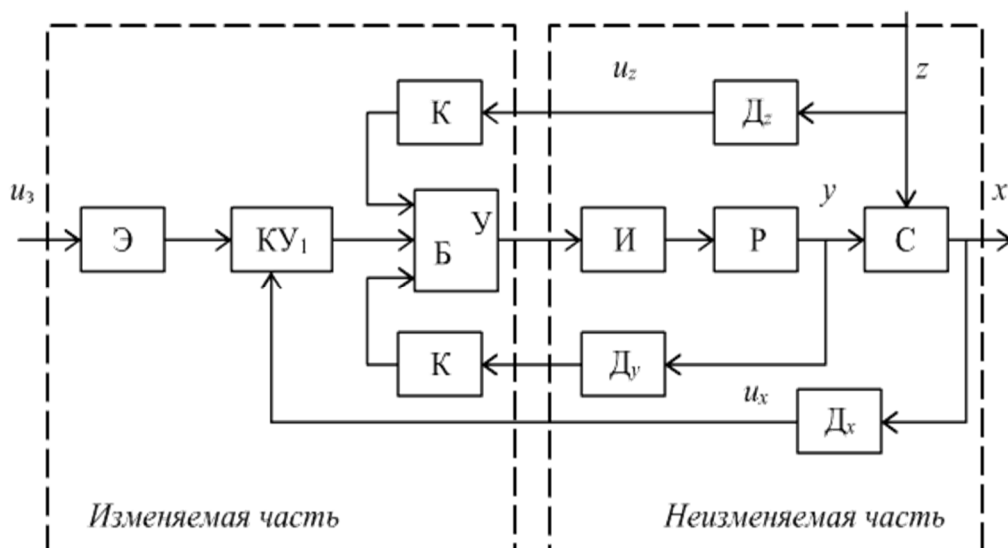
Зерттеу гипотезасы: АБЖ синтезінің классикалық аналитикалық тәсілдері — идеалды объект инерттілік өтемі, кешігуді бейтараптандыру (Ресквик, Смит) және инварианттылық шарты — ПЛК-контроллерлерде цифрлық іске асырылуы мүмкін және заманауи SCADA/IoT жүйелерімен интеграцияланғанда транспорт автоматикасының сапа көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартады.

Зерттеу нәтижелері және талдау.

Автоматты реттеу теориясындағы математикалық есептер талдау және синтез есептерінен тұрады. Талдау есебінде жүйенің толық құрылымы мен барлық параметрлері берілген, оның статикалық немесе динамикалық қасиетін бағалау қажет. Синтез есептері — талдаудың кері есебі: берілген сапа көрсеткіштері бойынша жүйенің құрылымы мен параметрлерін анықтау (Воронов, 1980: 145; Султангазинов, 2004: 67).

АБЖ синтезінің толық есебі екі деңгейді қамтиды: (1) алгоритмдік синтез — математикалық аппарат арқылы жүйенің алгоритмдік (бақылау алгоритмін анықтайтын) құрылымын табу, оны теориялық немесе аналитикалық синтез деп атайды; (2) функционалдық (техникалық) синтез — нақты аппараттық элементтерді таңдау, инженерлік өнердің саласына жатады.

Синтез есебін шешудің тізбегі практикада мынадай: алдымен объектінің берілу функциясы, кіріс/шығыс қоздырулары және бөгеуілдер белгілі болуы керек. Содан соң сериялық жабдықтар тізбесінен жүйенің өзгермейтін бөлігінің функционалдық элементтері — реттейтін орган (РО), атқарушы құрылым (АҚ), датчик (Д) — таңдалады. Ақырында, өзгертін бөліктің (күшейткіш-түрлендіруші блок және түзеткіш құрылым) алгоритмдік және функционалдық синтезі жасалады, содан кейін параметрлік оңтайландыру — таңдалған реттегіштің бейімдеуші параметрлерін есептеу — жүргізіледі (Болнокин, Чинаев, 1986: 127).



Сур. 1. Синтезделетін жүйенің функционалды құрылымы

Содан соң талаптар негізінде статикалық және динамикалық қасиеттерімен өзгеретін бөлігін анықтайды, оған күшейткіш – түрлендіретін блок (УБ) және әр түрлі түзететін (КУ) құрылымдар кіреді.

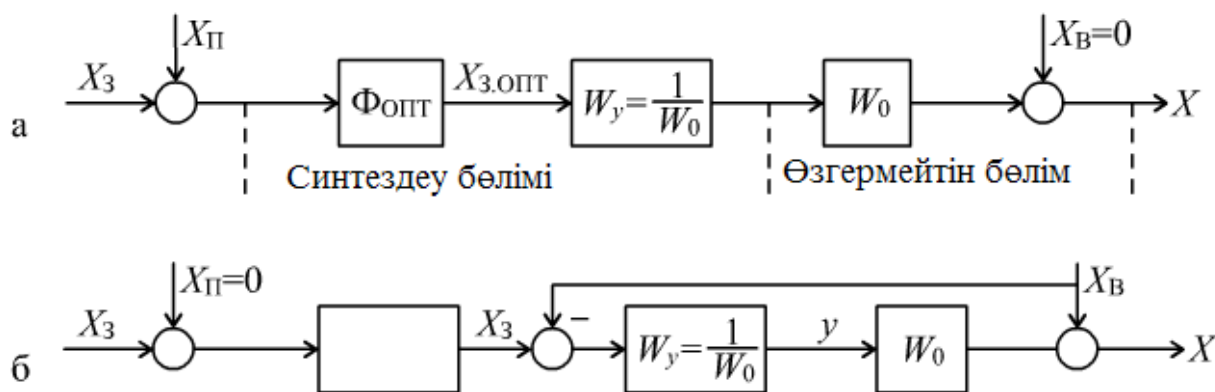
Өзгеретін бөліктің алгоритмдік құрылымын қажетті таңдаулы функционалді элементтер қасиеттерін есепке алып табады, бұл бөліктің техникалық іске асыруы үйреншікті унифицирленген реттеуіштер және әр түрлі түзететін және орнын толтыратын құрылымдардың қолдануымен іске асады. Осылайша, барлық жүйенің алгоритмдік және функционалдық құрылымдарын анықтау үрдістері бір-бірімен тығыз байланысты.

Басқару жүйесінің жобалауының қорытынды кезеңдері параметрлік тиімділік болып табылады - таңдаулы реттеуіштің бейімдеуші параметрлерінің есептеуі.

Синтез есебінің шешімдерін жасағаннан кейін әдетте синтезделген жүйенің анализін жасайды: қажетті дәлдік, орнықтылық және сапа көрсеткіштеріне ие болуын тексереді.

Синтез және жүйелерді талдаудың барлық кезеңдерінде ЭЕМ қолдану орынды. ЭЕМде жүйелерінің пішіндеуі құрылымдар және параметрлердің варианттарының үлкен санын зерттеп және синтез есебінің шешімін үдетуге мүмкіндік береді.

Жүйенің идеалды құрылымы. Алгоритмдік құрылым синтезінің есебін шешу үшін басқару объектісінің $W_0(p)$ беріліс функциясы, объектінің кіріс және шығысында жұмыс істейтін қоздырулар y_{ε} және x_{ε} және сонымен бірге тапсырма және өлшеу каналдарында пайда болатын x_n бөгеуілдер белгілі болуы керек. 2, а, б суреттерінде анық көрсетілген.



Сур. 2. Идеалды тұйықталмаған жүйенің алгоритмдік құрылымы

Ең оңай жағдайда объектіде қоздырушы әсерлер болмағанда, басқаруды тұйықталмаған схема (2-ші сурет) бойынша жүзеге асыруға болады. Егер басқарылатын құрылғының беріліс функциясын $W_y(p)$

$$W_y(p) = 1/W_0(p) \quad (1)$$

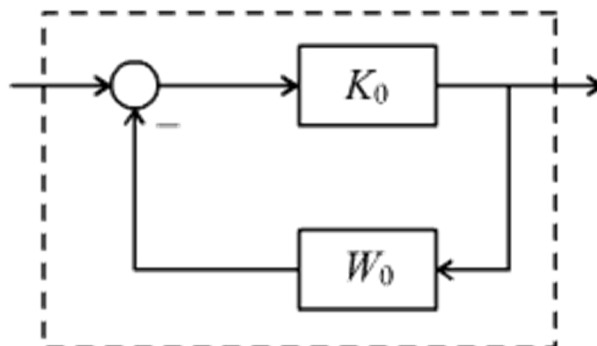
тең деп алсақ, онда объектінің инерциялығының толық (құрылымдық) өтемі қамтамасыз етіледі және басқару жүйесі объектінің шығысында тез берілетін әсерді $x_{3.онт}$ шығарады. $x_{3.онт}$ тапсырмасы $\Phi_{онт}(p)$ беріліс функциясы бар арнайы сүзгісімен қалыптасады, ол былайша таңдалады, сүзгі барлық құралған x_3 сигналдарды жақсы өткізу керек және x_n бөгеуіл басым болмауы керек.

Егер объектіге өлшенетін x_e қоздыру әсер етсе, онда теория жағынан қоздырудың толық өтеуімен идеалды тұйықталмаған басқару жүйесін синтездеуге болады (2-ші сурет, б). Объектінің толық өтелу инерттілігін қамтамасыз ететін беріліс функциясы (1) x_e қоздырудың өтеуіне де жақсы болып келеді. (1) шарттарды орындағанда шынымен де $W_y(p)W_0(p) = 1$ тең, сондықтан да x_y объектінің шығысындағы пайдалы құраушысы x_e қоздыруына толығымен теңестіріледі.

АБЖ идеалды алгоритмдік құрылымын модельдеу кезіндегі негізгі қиындық объектінің кері беріліс функциясының іске асуы болып келеді. Объектінің кері беріліс функциясының моделі ретінде келесі үзбелердің қосылуын ұсынуға болады 3-ші суретте көрсетілген.

k_0 беріліс коэффициенті үлкен болғанда үзбелердің эквиваленті беріліс функциясының қосылулары келесі түрде болады

$$W(p) = k_0 / (1 + k_0 W_0(p)) \approx 1/W_0(p) \quad ((2))$$



Сур. 3. Кері беріліс функциясының моделі $1/W_0$

Егер x_ε қоздыруды өлшеуге болмаса, онда идеалды тұйықталған жүйенің құрылымын табу үшін $W_0(p)$ объектінің моделі көмегімен x_ε қоздырудың жанама ойын пайдалануға болады 4-ші. а-суретте көрсетілген.

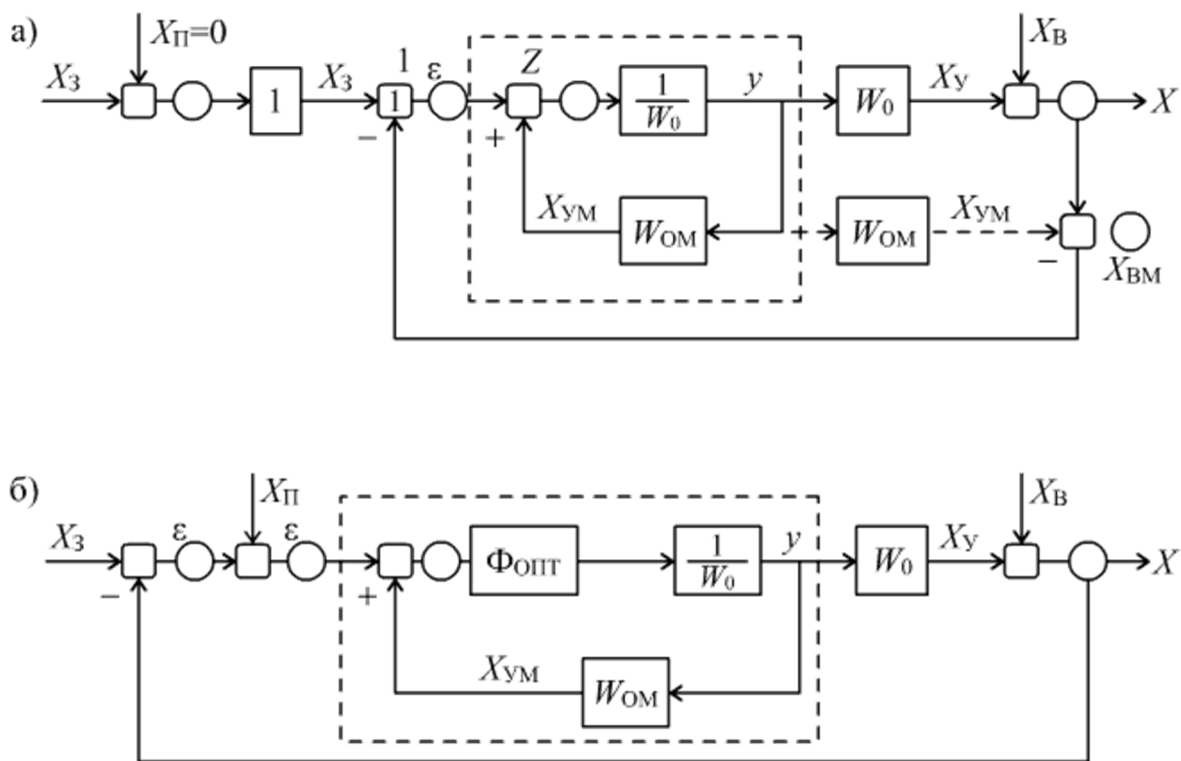
Анық, егер

$$W_{OM}(p) = W_0(p) \quad (3)$$

модельдің шығысында анықталатын сигнал

$$x_{\varepsilon M} = x - x_{yM} = (x_y + x_\varepsilon) - x_{yM} = x_\varepsilon \quad (4)$$

x_ε жанама өлшенген қоздыру болса және оны 2-ші б суреттегі схемадағыдай $1/W_0(p)$ беріліс функциясымен басқарылатын құрылғыға енгізгенде идеалды тұйықталмаған құрылымды жаңадан алуға болады. Оған құрылымдық түрлендіргіштер ережесі бойынша x_{yM} сигналын басқарушы құрылғының кірісіне ауыстыруға болады және екінші сумматорға салуға болады.



Сур. 4. Идеалды тұйықталған жүйенің алгоритмдік құрылымы

Сонда басқарушы құрылғы $1/W_0(p)$ ішкі оң кері байланыспен қамтылған болады, ал бірінші сумматордан кейінгі сигнал қатенің сигналына $\xi = x_3 - x$ сәйкес келеді. Соңғысы жүйенің тұйықталғанын және беріліс функциясы бар болатын (штрих тік төртбұрыш) реттеуішімен кері байланысқан теріс қағидасына сәйкес жұмыс істейтін білдіреді:

$$W_{pu}(p) = \frac{y(p)}{\xi(p)} = \frac{1/W_0(p)}{1 - W_{om}(p)/W_0(p)} \quad (5)$$

Модель мен объектінің дәл келсе реттегіш $k_p = \infty$ -мен пропорционалды түрінде жұмыс істейді, ол қоздыру және тапсырма арнасымен нолдік қателікке сай болып келеді. Жалпы жағдайда, егер $x_e \neq 0$ және $x_n \neq 0$ болса идеалды тұйықталған жүйенің алгоритмдік құрылымы (7.4-ші б сурет) жоғарыда түсіндірілген эвристикалық жолмен екі құрылымдардың белгілерін өз бойында тіркестіреді. Бұл идеалды құрылымда реттегіште ішкі оң кері байланыс, $1/W_0$ үзбесі, W_{om} және оптималды сүзгі Φ_{opt} болады. Идеалды тұйықталған реттегіштің беріліс функциясы

$$W_{pu}(p) = \frac{y(p)}{\xi_1(p)} = \frac{\Phi_{opt}(p)}{1 - \Phi_{opt}(p)} \cdot \frac{1}{W_0(p)} \quad (6)$$

$\Phi_{opt}(p)$ үзбесі сыртқы қоздырулардың ұтымды сүзгілеуді жүзеге асырады және $x_{z.opt}$ ұтымды тапсырманы істеп шығарады. $1/W_0(p)$ объектінің кері моделі оның инерциялылығының орнын толтырады, ал $W_{om}(p)$ түзу моделі объектінің шығысындағы x_y құраушысын есептейді.

Идеалды қосу жүйесімен бірге объектінің кері моделі түріндегісі басқару жүйесінің параметрлік және құрылымдық синтезінің принципиалды негізі болып келеді, ал тәсіл объектінің инерттілігін өтеу әдісі деп аталады.

Синтездеудің практикалық есептерінде көбінесе бөліктік (параметрлік) өту қолданылады - объектінің тұрақты уақыттарының бір екеуін жою. Ол үшін инерциаллық объектімен тізбектей

$$W_0(p) = k_0 / (T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1) \dots (T_{0n} + 1), \quad (7)$$

мұндағы $T_{01} > T_{02} > T_{03} > \dots > T_{0n}$ беріліс функциясымен бірінші-екінші реттік тіркейтін үзбені қосады

$$W_k(p) = k_k (T_{k1}p + 1)(T_{k2}p + 1), \quad (8)$$

Ол үшін $T_{k1} = T_{01}$; $T_{k2} = T_{02}$; $k_k = 1/k_0$

Кешігуі бар объектіге арналған идеалды реттегіш. Кешігуі бар инертті объектілерге арналған идеалды реттегіштің құрылымын және беріліс функциясын анықтайық, оны қорытылған беріліс функциясымен сипаттауға болады:

$$W_0(p) = W'_0(p) e^{-p\tau_0} \quad (9)$$

Мұндағы $W_0(p)$ - объекттің инерциялық бөлігін сипаттайтын бөлшекті – рационалды функция; τ_0 – объекттің таза кешігуі. Егер (9)-ды (6) қойсақ реттегіштің беріліс функциясында $e^{+p\tau_0}$ көбейткіші пайда болады. Сондықтан да, шығарылған реттегіш құрылымын оңайту мақсатымен және оның техникалық іске асуын оңайту үшін идеалды жүйе кешігумен берілетін қоздыруды қосуға жол беру керек, яғни

$$\Phi_{xz}(p) = \Phi_{ont}(p) = \Phi'_{ont}(p)e^{-p\tau_0}, \quad (10)$$

мұндағы $\Phi'_{ont}(p)$ - x_z және x_n сигналдар үшін ұтымды сүзгі. Сонда сәйкес, кешігуі бар объекттер үшін идеалды реттеуішті аламыз

$$W_{pi}(p) = \frac{\Phi'_{ont}(p)}{1 - \Phi'_{ont}(p)e^{-p\tau_0}} \frac{1}{W'_0(p)}, \quad (11)$$

ол Ресквиктің реттеуіші деп аталады.

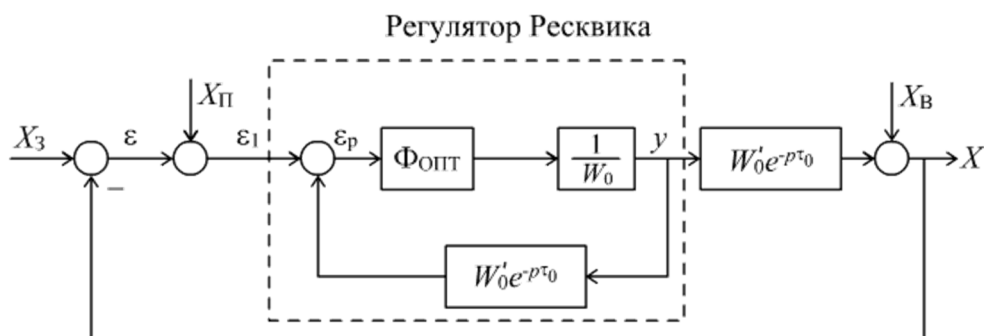
5-ші суретте көрсетілген құрылымға 11-өрнекке сәйкес келеді. Ресквик таза кешігуі бар үзбе реттеуішінің ішкі кері байланысы, объектiнiң шығысында y басқарылатын әсердің тағы бір өзгеруінен қандай сигнал пайда болуын болжайды. Өйткені бұл байланыстар оң, онда болжалатын сигнал оған тең объектiнiң нақты шығыс сигналына үнемі (бейтарап қалдырады) орнын толтырады. Қорытынды сигнал ξ_p тек қана алғашқы уақыт кезінде сыртқы әсерлер x_z , x_n немесе x_e өзгерістерінен кейін шығады. Осылайша, негізгі контурдан таза кешігуі τ_0 шығарылады.

Ресквик реттеуішімен жүйенің елеулі кемшілігі оның объектiнiң кешігуінің аз вариацияларына сын көзімендігі болып табылады.

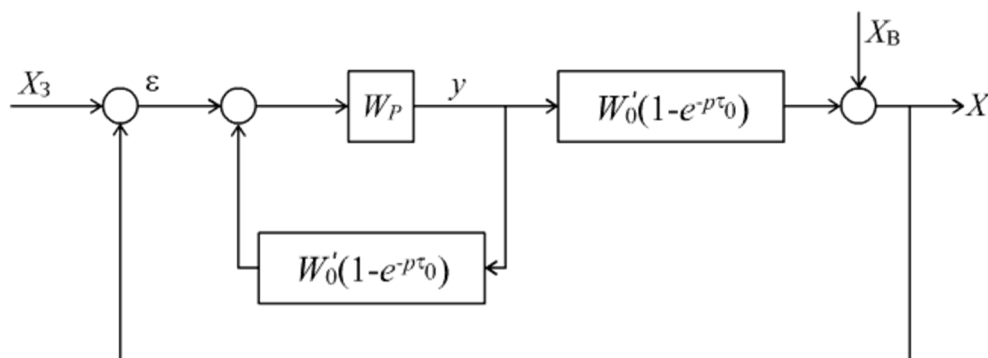
Объекттің кешігуін бейтараптандыру идеясын сонымен бірге бір үлгідегі реттеуіштерді қамтитын Смит упредителі арқылы жүзеге асырылады 7.6-шы суретте көрсетілген.

$(k_p \rightarrow \infty)$ үлкен беріліс коэффициентінде Смит упредителі бар реттегіші Ресквик реттегішіне $\Phi_{ont} = 1$ эквивалентті болып келетініне көз жеткізуге қиын емес:

$$\begin{aligned} W_{\text{смит}}(p) &= \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)W'_0(p)(1 - e^{-p\tau_0})} = \\ &= \frac{1}{1/W_p(p) + W'_0(p)(1 - e^{-p\tau_0})} \approx \frac{1}{1 - e^{-p\tau_0}} \frac{1}{W'_0(p)} \end{aligned} \quad (12)$$



Сур. 5. Ресквик реттегіш базасындағы кешігумен объектіні басқару жүйесінің идеалды құрылымы



Сур. 6. Смит упредителі негізінде кешігумен объектіні басқару жүйесінің идеалды құрылымы

Смиттің упредителімен жүйені жеңілдетуді техникалық тұрғыда жүзеге асыру оңайға соғады, өйткені объекттің кері беріліс функциясын модельдеуге керек болмайды.

Тұрақтанған және абайлаушы жүйелердегі инварианттылығының жүзеге асыруы. Автоматты жүйесінің синтезінің бас мақсаттарының бірі орналастырылған және өтпелі тәртіптердегі тиісті дәлдігінің қамтамасыз етуі болып табылады. Орналастырылған тәртіптердегі жүйелерінің дәлдігі астатизмның реті және алшақ салынған нобайдың коэффициентін үлкейте жақсартуға болады. Сонымен бірге, әдеттегідей бірақ, орнықтылықтың қоры азаяды, тербелмелілік үлкееді және өтпелі тәртіптердегі жүйесінің дәлдігі азады. Орналастырылған және өтпелі тәртіптердегі дәлдігі шарттарының арасындағы қарама-қайшылықтарды жою тиімді құралымен инварианттылықтың жүзеге асыруы өтем сыртқы әсер жолымен қызмет көрсетеді.

"Инварианттылық" бір физикалық шаманың екіншісіне тәуелсіздігін білдіреді. АБТ-да шығыс (басқарылатын шама немесе қатенің сигналы) шамаларының кіріс әсерлерінен тәуелсіздіктерді қарайды. Тұрақтану жүйелердегі қоздырушы әсерден басқарылатын шаманың тәуелсіздіктерін алуға ұмтылады, абайлаушы жүйелерде - берілетін әсерден қате сигналының тәуелсіздігі.

АБЖ инварианттылық әсер бойынша басқару арқылы жетеді, басқарылатын әсер қоздыратын әсердің өзгеруіне байланысты құрылады. Егер қоздырушы әсер өлшенетін болса, басқару принципі қолданылатыны анық. Қоздыру бойынша басқару принципті әдетте (құрамалы жүйе) ауытқулар бойынша басқарумен бірге қолданылады.

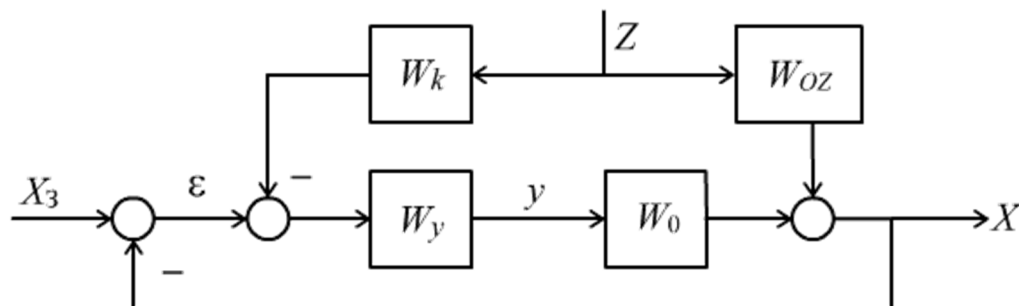
Тұрақты комбинирленген жүйенің алгоритмдік құрылымын қоздыру бойынша өтеуші байланыспен қарастыруға болады 7.7-ші суретте көрсетілген Өтеу байланысы шығыс шамасына таңбамен әсер етеді, ол әрдайым шығысқа қоздырудың әсерінің таңбасына кері болады. Қоздыру бойынша жүйенің беріліс функциясы

$$\Phi_{xz}(p) = \frac{x(p)}{z(p)} = \frac{W_{0z}(p) - W_k(p)W_y(p)W_0(p)}{1 + W_y(p)W_0(p)} \quad (13)$$

мұндағы $W_0(p)$ және $W_{0z}(p)$ - сәйкесінше басқарушы және қоздырушы әсер бойынша объектінің беріліс функциялары;

$W_y(p)$ – бағдарлаушы құрылымның беріліс функциясы;

$W_k(p)$ - орнын толтыратын құрылымның беріліс функциясы.



Сур. 7. АБЖ аралас құрылымның басқару әсеріндегі байланыс компенсациясы

Басқарылатын шама $x(t)$ қоздыруға $z(t)$ тәуелді емес, егер (13) беріліс функциясы нөлге тең болса

$$\Phi_{xz}(p) = 0 \quad (14)$$

егер оның алымы нөлге тең болса бұл болуы мүмкін. Қоздыруға қарағанда тұрақтандырылатын шаманың инварианттылығының шарты осыдан

$$W_{0z}(p) - W_k(p)W_y(p)W_0(p) = 0 \quad (15)$$

15-шарт, қоздырушыдан $x(t)$ шаманың тәуелсіздігінің табысы үшін қоздырушы $z(t)$ бойынша жұмыс істеген екі параллель каналдардың динамикалық қасиеті бірдей болуы үшін керектігін білдіреді, өтейтін құрылымның беріліс функциясы.

$$W_k(p) = W_{0z}(p) / W_y(p)W_0(p) \quad (16)$$

Абайлаушы жүйелерде берілген қоздырудан қате сигналының тәуелсіздігіне жету керек. Схемалар үшін 8-суретте әсермен $x(t)$ және қатенің сигналы $\xi(t)$ аралығында беріліс функция келтірілген:

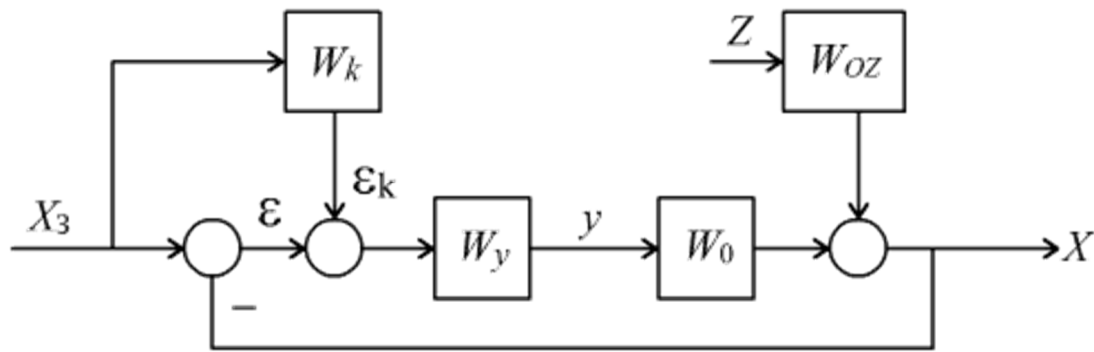
$$\Phi_{\xi z}(p) = \frac{1 - W_k(p)W_y(p)W_0(p)}{1 + W_y(p)W_0(p)} \quad (17)$$

17- функцияны нөлге теңестіре отырып берілген әсерге байланысты аңду қатесінің инварианттылығының шартын табамыз

$$1 - W_k(p)W_y(p)W_0(p) = 0 \quad (18)$$

бұдан өтуші құрылымның керекті беріліс функциясы шығады

$$W_k(p) = 1 / W_y(p)W_0(p) \quad (19)$$



Сур. 8. Берілетін әсер бойынша өтеуші байланысымен АБЖ комбинирленген құрылымы

Негізгі синтез тәсілдерінің жүйелі салыстырмалы сипаттамасы 1-кестеде ұсынылған.

Кесте-1. АБЖ синтез алгоритмдерінің салыстырмалы сипаттамасы

Синтез тәсілі	Идеалды тұйықталмаған жүйе	Смит алдын-ала болжаушысы	Ресквик реттегіші	Инварианттылық шарты бар біріккен жүйе
Қолдану саласы	Қоздыру өлшенетін жүйелер	Кешігуі бар объектілер	Таза кешігуі бар объектілер	Тұрақтандыру және абайлаушы жүйелер
Объект моделі	$W_0(s)$ беріліс функциясы	$W_0(s) \cdot e^{(-ts)}$	$W_0(s) \cdot e^{(-ts)}$	$W_0(s) + W_1(s)$ қоздыру арнасы
Реттегіш құрылымы	Тізбекті түзеткіш + сүзгі	ПИД + Смит упредителі	Ресквик реттегіші (ішкі ОКБ)	Тізбекті реттегіш + өтеуші байланыс
Статикалық қате	Нөлдік (идеалды жағдайда)	Нөлдік	Нөлдік (модель дәл келгенде)	Нөлдік (инвариант. шарт орындалса)
Кешігуге төзімділік	Жоғары (сүзгімен)	Жоғары	Объект кешігуіне сезімтал	Орташа
SCADA интеграциясы	Мүмкін	Мүмкін	Мүмкін	Толық (ПЛК + SCADA)
Цифрлық іске асыру	ЭЕМ арқылы	ЭЕМ / ПЛК	ЭЕМ / ПЛК	ПЛК + IoT хаттамалары
Ұсынылатын қолдану	Қарапайым объектілер	Кешігуі 0.3–5 с	Кешігуі > 5 с	Күрделі технологиялық үдерістер

1-кесте деректері мыналарды айқындайды. Барлық қарастырылған синтез тәсілдері ПЛК-контроллерлерде цифрлық іске асырылуы мүмкін; бұл Industry 4.0 парадигмасына — физикалық объектілердің (датчиктер, реттегіштер, атқарушы механизмдер) цифрлық диспетчерлеу ортасымен (SCADA, APM) стандартты хаттамалар арқылы (OPC UA, MQTT, Modbus TCP) біріктірілуіне — сай келеді. Смит упредителімен жүйе практикалық іске асырудың жеңілдігімен артықшылық береді, ал Ресквик реттегіші объект кешігуіне жоғары сезімталдыққа байланысты болжамалы техникалық қызмет көрсету (predictive maintenance) жүйелерімен интеграциясын талап етеді. Инварианттылық шарты бар біріккен жүйе жоғарыда аталғандардың ішіндегі ең жоғары

сапа көрсеткіштерін береді, бірақ есептеу қарқындылығы да жоғары (Иващенко, 1979: 134).

Транспорт автоматикасы шарттарындағы сапа көрсеткіштерінің сандық салыстырмасы 2-кестеде ұсынылған.

Кесте-2. АБЖ негізгі тәсілдерінің сапа көрсеткіштері (транспорт автоматикасы мысалында)

Сапа көрсеткіші	ПИ реттегіш (классикалық)	Идеалды жүйе (объект өтемі)	Смит + ПИД	Инварианттылық шартымен
Өтпелі үдеріс уақыты t_p , с	8–15	3–6	4–7	2–5
Асып кету σ , %	15–25	5–10	3–8	< 5
Статикалық қате ϵ_{ss} , %	0–3	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Жиілік жолағы Ω_p , рад/с	0.5–2	2–5	1.5–4	2–6
Орнықтылық қоры Δf , дБ	≥ 12	≥ 10	≥ 12	≥ 14
Өтеу дәрежесі, %	—	70–90	80–95	90–98
ПЛК-да іске асыру мүмкіндігі	Иә	Иә (модельмен)	Иә	Иә (толық)

2-кесте нәтижелері синтездің неғұрлым жетілдірілген тәсілдерін қолданған сайын өтпелі үдеріс уақытының 3–5 есе, асып кетудің 3–5 есе, статикалық қатенің нөлге жақын болатынын, ал орнықтылық қорының сақталатынын дәлелдейді. ПЛК ортасында барлық алгоритмдерді іске асыру мүмкін болғандықтан, аталған нәтижелер теміржол диспетчерлік орталықтарының SCADA-жүйелерімен біріктірілген автоматтандырылған бақылау жүйелерін жобалауда практикалық мән-мағынаға ие.

Заманауи транспорт автоматизациясының Industry 4.0 парадигмасы АБЖ алгоритмдік синтезіне мынадай қосымша талаптарды қояды: нақты уақыттағы жауап (Real-Time Control); болжамалы техникалық қызмет көрсету (Predictive Maintenance); IoT-сенсорлармен үздіксіз деректер алмасу; SCADA платформасымен OPC UA/MQTT хаттамалары арқылы интеграция; цифрлық егіз (Digital Twin) арқылы виртуалды комиссиялау (Болнокин, Чинаев, 1986: 127; Султангазинов и др., 2022: 65).

Ұсынылатын интеграция архитектурасы мынадай: Датчиктер (IoT) → ПЛК (реттегіш алгоритм: ПИД/Смит/Инвариант) → OPC UA шлюз → SCADA сервер → АРМ диспетчер. Болжамалы техникалық қызмет (Predictive Maintenance) деңгейінде SCADA деректер уақыт сериясы машиналық оқыту моделіне беріліп, реттегіш параметрлерінің деградациясы 14–30 күн бұрын анықталады. Бұл тәсіл теміржол автоматикасындағы тональды рельстік тізбектер мен АЛС-АРС жүйелерінде тиімді екені дәлелденген (Султангазинов, 2009: 97).

Қорытынды.

Зерттеу нәтижелері негізінде мынадай негізгі тұжырымдар жасалды. АБЖ синтезінің есебі аналитикалық, функционалдық және параметрлік кезеңдерден тұрады; синтез процедурасы объектінің инерциялығын өтеу, кешігуді бейтараптандыру және инварианттылық шарттарын қамтамасыз ету принциптерімен анықталады. Идеалды

тұйықталмаған жүйеде $W_y(s) = 1/W_0(s)$ шарты орындалғанда объектінің инерциялығы толықтай өтеледі; тұйықталған жүйеде ішкі оң кері байланысы бар реттегіш нөлдік статикалық қатені қамтамасыз етеді. Кешігуі бар объектілер үшін Ресквик реттегіші мен Смит упредителі тиімді шешімдер болып табылады: Смит упредителі практикалық іске асырудың жеңілдігімен, Ресквик реттегіші ішкі болжаушы байланыс механизмімен ерекшеленеді; екеуін де ПЛК-ортасында цифрлық іске асыруға болады. Тұрақтандыру

жүйелерінде инварианттылық шарты $W_k(s) = -\frac{W_f(s)}{W_y(s)}$, абайлаушы жүйелерде (19) формуласы орындалғанда жүйенің мінездемелік полиномы өзгермейді — орнықтылыққа әсер етілмейді, ал шығыс шама қоздырушы әсерден тәуелсіз болады. Салыстырмалы талдау (1–2-кестелер) синтездің жетілдірілген алгоритмдерін қолданғанда өтпелі үдеріс уақыты 3–5 есе, асып кету 3–5 есе азайып, орнықтылық қоры сақталатынын дәлелдейді. Барлық қарастырылған тәсілдер ПЛК-контроллерлерде іске асырылуы мүмкін және SCADA/IoT жүйелерімен интеграциялауға жарамды.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу автоматты басқару жүйелерінің классикалық алгоритмдік синтез қағидалары қазіргі цифрлық көліктік автоматизация жағдайында өзектілігін сақтайтынын дәлелдейді. Объект инерциялығын өтеу, кешігуді болжау және сыртқы қоздыруларға қатысты инварианттылықты қамтамасыз ету принциптері теміржол автоматикасы, диспетчерлік басқару, рельстік тізбектер, АЛС-АРС және SCADA негізіндегі бақылау жүйелерін жобалауда тиімді қолданылуы мүмкін.

Зерттеу нәтижелері Industry 4.0 тұжырымдамасы жағдайында АБЖ синтезін тек теориялық есеп ретінде емес, нақты цифрлық инфрақұрылыммен байланысқан инженерлік міндет ретінде қарастыру қажеттігін көрсетеді. ПЛК-контроллерлер, IoT-сенсорлар, OPC UA/MQTT хаттамалары және SCADA-серверлер арқылы басқару алгоритмдерін нақты уақыт режимінде іске асыру көліктік жүйелердің сенімділігін, дәлдігін және диагностикалық мүмкіндіктерін арттырады.

Практикалық тұрғыдан алғанда, алынған нәтижелер теміржол көлігіндегі автоматтандырылған басқару объектілерінің реттеу алгоритмдерін әзірлеуде, қолданыстағы жүйелерді жаңғыртуда және цифрлық диспетчерлеу кешендерін құруда пайдаланылуы мүмкін. Әсіресе кешігуі бар объектілерді басқару, параметрлері өзгеретін технологиялық үдерістерді тұрақтандыру және сыртқы әсерлерді өтеу міндеттері үшін ұсынылған тәсілдердің инженерлік маңызы жоғары.

Одан әрі зерттеу бағыттары ретінде ПЛК-ортасында инварианттылық шартын тәжірибелік тексеру, Смит және Ресквик реттегіштерін нақты теміржол автоматикасы объектілерінде сынау, SCADA-сервермен біріктірілген болжамалы техникалық қызмет көрсету алгоритмдерін әзірлеу, сондай-ақ көліктік объектілердің цифрлық егіздерін қалыптастыру арқылы реттегіш алгоритмдерін виртуалды комиссиялау ұсынылады.

ӘДЕБИЕТТЕР

- Бесекерский, 1975 — Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 122 с. [in Russ.]
- Бесекерский, 1976 — Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. — М.: Наука, 1976. — 125 с. [in Russ.]
- Болнокин, 1986 — Болнокин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. — М: Радио и связь, 1986. — 127 с. [in Russ.]
- Вавилов, 1981 — Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. — Ленинград: ЛГУ баспасы, 1981. — 130 с. [in Russ.]
- Воронов, 1980 — Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. — М.: Энергия, 1980. — 145 с. [in Russ.]
- Воронов, 1981 — Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные системы. — М.: Энергия, 1981. — 150 с. [in Russ.]
- Воронов, 1979 — Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979. — 167 с. [in Russ.]
- Ивашенко, 1979 — Ивашенко Н.Н. Автоматическое регулирование. — М: Машиностроение, 1979. — 134 с. [in Russ.]
- IEC 62280:2014 — IEC 62280:2014. Railway applications — Safety-related communication in railway systems. — Geneva: IEC, 2014. [In Eng.]
- Султангазинов, 2004 — Султангазинов С.Қ. Автоматика және телемеханиканың теориялық негіздері: оқу құралы. — А.: Алла прима, 2004. [in Russ.]
- Султангазинов, 2009 — Султангазинов С.Қ. Теміржол көлігіндегі автоматика және телемеханика құрылғылары элементтері: оқу құралы. — Алматы: Алла прима, 2009. — 151 б. [in Russ.]

Султангазинов және т.б., 2021 — Султангазинов С.Қ., Наурызова Н.Ш., Рустамбекова Қ.Қ. Телекоммуникациялық желілердің құрал-жабдығын пайдалану: оқу құралы. — Алматы: «Darkhan» ИП, 2021. — 164 б. [In Kaz.]

Султангазинов және т.б., 2022 — Султангазинов С.Қ., Рустамбекова Қ.Қ., Рустамбеков Е.Қ. Теміржол көлігінің элементтері мен станциялық жүйелері: оқу құралы. — А.: «Darkhan» ИП, 2022. — 65 б. [in Russ.]

Egorova et al., 2020 — Egorova T.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Intellektualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv* [Intelligent diagnostics systems for railway devices]. — Saint Petersburg: PGUPS, 2020. — 204 p. [In Russ.]

REFERENCES

Besekersky, 1975 — Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. — M.: Nauka, 1975. 122 p. [In Russ.]

Besekersky, 1976 — Besekersky V.A. *Tsifrovye avtomaticheskie sistemy* [Digital automatic systems]. — M.: Nauka, 1976. 125 p. [In Russ.]

Bolnokin, 1986 — Bolnokin V.E., Chinaev P.I. *Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya na EVM* [Analysis and synthesis of automatic control systems using computers]. — M.: Radio i Svyaz, 1986. 127 p. [In Russ.]

Egorova et al., 2020 — Egorova T.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Intellektualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv* [Intelligent diagnostic systems for railway devices]. — Saint Petersburg: PGUPS, 2020. 204 p. [In Russ.]

Vavilov, 1981 — Vavilov A.A., Imaev D.Kh. *Mashinnye metody rascheta sistem upravleniya* [Computer methods for control system analysis]. — Leningrad: LGU Publishing House, 1981. 130 p. [In Russ.]

Voronov, 1980 — Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnykh lineinykh sistem* [Fundamentals of automatic control theory. Automatic control of continuous linear systems]. — M.: Energiya, 1980. 145 p. [In Russ.]

Voronov, 1981 — Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Osoby lineinye sistemy* [Fundamentals of automatic control theory. Special linear systems]. Moscow: Energiya, 1981. 150 p. [In Russ.]

Voronov, 1979 — Voronov A.A. *Ustoichivost, upravlyaemost, nablyudaemost* [Stability, controllability, and observability]. — M.: Nauka, 1979. 167 p. [In Russ.]

Ivashchenko, 1979 — Ivashchenko N.N. *Avtomaticheskoe regulirovanie* [Automatic control]. — M.: Mashinostroenie, 1979. 134 p. [In Russ.]

IEC 62280:2014 — *Railway applications — Safety-related communication in railway systems*. — Geneva: IEC, 2014. [In Eng.]

Sultangazinov, 2004 — Sultangazinov S.K. *Avtomatika zhane telemekhanikany teoriyalyk negizderi: oku kuraly* [Theoretical foundations of automation and telemechanics: Textbook]. — A.: Alla Prima, 2004. [In Kaz.]

Sultangazinov, 2009 — Sultangazinov S.K. *Temirzhol koligindegi avtomatika zhane telemekhanika kurylgylary elementteri: oku kuraly* [Elements of automation and telemechanics devices in railway transport: Textbook]. — A.: Alla Prima, 2009. 151 p. [In Kaz.]

Sultangazinov et al., 2021 — Sultangazinov S.K., Nauryzova N.Sh., Rustambekova K.K. *Telekommunikatsiyalyk zhelilerdin kural-zhabdygyn paidalanu: oku kuraly* [Operation of telecommunication network equipment: Textbook]. — A.: IP "Darkhan", 2021. 164 p. [In Kaz.]

Sultangazinov et al., 2022 — Sultangazinov S.K., Rustambekova K.K., Rustambekov E.K. *Temirzhol koliginin elementteri men stantsiyalyk zhyieleri: oku kuraly* [Elements and station systems of railway transport: Textbook]. — A.: IP "Darkhan", 2022. 65 p. [In Kaz.]

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

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 63–71
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005>
UDC / УДК / ЭОЖ 81.93.21;

ENVIRONMENTAL VALUE ASSESSMENT METHODS FOR IT PROJECTS: A SYSTEMATIC REVIEW

*Y. Mukametali**

International University of Information Technologies, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com

Yernazar Mukametali — Master student of the Department of Information Systems, International University of Information Technologies
E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1717-4886>.

© Y. Mukametali

Abstract. The assessment of the environmental value of IT projects is one of the most active interdisciplinary topics in modern project management, located at the intersection of environmental impact assessment (EIA), green-IT engineering and multi-criteria decision analysis (MCDA). The aim of this article is to systematise existing methods of environmental value assessment of projects and to identify the opportunities for their digitalisation in the management of IT projects. The research methodology is based on a structured literature review of 32 peer-reviewed publications (Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink, 2014–2025) and a comparative analysis of seven international and national standards (ISO 14001:2015, ISO 14040:2006 LCA, GRI 300-series, ESPOO Convention, Equator Principles, KZ Environmental Code 2021, Concept Green Economy RK 2050). The results demonstrate four dominant clusters of environmental assessment methods — qualitative (Leopold matrix, checklists), quantitative (LCA, carbon-footprint), MCDA-hybrid (AHP-TOPSIS, PROMETHEE) and AI-based (machine-learning surrogate models, NLP for EIA documents) — and reveal that the digital Leopold matrix combined with expert-augmented AI agents shows the highest applicability for IT projects (combined coverage index of 0.86 and operational maturity of 0.71). The paper specifies methodological requirements for a multidimensional environmental value model intended for an AI-augmented decision-support tool in IT-project management. The findings are relevant for academic researchers, environmental analysts, PMOs and government agencies working on green-IT initiatives in Kazakhstan and the EAEU region.

Keywords: environmental project, IT project, Leopold matrix, EIA, environmental value, multi-criteria assessment, AI agent, life cycle assessment, sustainable development

For citation: Mukametali Y. (2026). Environmental value assessment methods for IT projects: a systematic review // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 63–71. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005> (In Russ.).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.



ИТ-ЖОБАЛАРДЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚҰНДЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ: ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ

Е. Мұқаметәлі*

Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com

Мұқаметәлі Ерназар — «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының магистранты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1717-4886>.

© Мұқаметәлі Ерназар

Аннотация. ИТ-жобалардың экологиялық құндылығын бағалау қазіргі заманғы жобаны басқарудың ең белсенді пәнаралық тақырыптарының бірі болып табылады, ол қоршаған ортаға әсерді бағалау (EIA), жасыл ИТ-инженерия және көпкритериалды талдау (MCDA) тоғысында орналасқан. Мақаланың мақсаты — жобалардың экологиялық құндылығын бағалаудың қолданыстағы әдістерін жүйелеу және оларды ИТ-жобаларды басқару шеңберінде цифрландыру мүмкіндіктерін айқындау. Әдіснама — Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink базаларынан 2014–2025 жылдары жарияланған 32 пирецензияланған еңбекті құрылымдық шолу және жеті халықаралық пен ұлттық стандартты салыстырмалы талдау. Нәтижелер экологиялық бағалау әдістерінің төрт басым кластерін көрсетеді: сапалы (Леопольд матрицасы, тізімдер), сандық (LCA, көміртегі ізі), MCDA-гибридтік (АНР-TOPSIS, PROMETHEE) және ЖИ-негізіндегі (machine-learning surrogate models, NLP EIA-құжаттарға). Цифрлық Леопольд матрицасы мен сараптамалық AI-агенттердің үйлесімі ИТ-жобаларға ең жоғары қолданылғыштықты көрсетеді (қамту индексі 0,86 және операциялық жетілдігі 0,71). Көпөлшемді экологиялық құндылық үлгісіне қойылатын әдіснамалық талаптар тұжырымдалды. Нәтижелер Қазақстандағы және ЕАЭО елдеріндегі жасыл ИТ-бастамаларды іске асырушы зерттеушілер, экологиялық сарапшылар, РМО-бөлімшелері мен мемлекеттік органдар үшін өзекті.

Түйін сөздер: экологиялық жоба, ИТ-жоба, Леопольд матрицасы, EIA, экологиялық құндылық, көпкритериалды бағалау, ЖИ-агент, өмірлік цикл талдау, тұрақты даму

Дәйексөздер үшін: Мұқаметәлі Е. (2026). ИТ-жобалардың экологиялық құндылығын бағалау әдістері: жүйелі шолу // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 63–71 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ИТ-ПРОЕКТОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Мұқаметәлі Ерназар*

Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан.

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com

Мұқаметәлі Ерназар — магистрант кафедры «Информационные системы», Международный университет информационных технологий

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1717-4886>.

© Мұқаметәлі Ерназар

Аннотация. Оценка экологической ценности ИТ-проектов является одной из наиболее активно развивающихся междисциплинарных тем в современном управлении

проектами, расположенной на стыке оценки воздействия на окружающую среду (Environmental Impact Assessment, EIA), green-IT инженерии и многокритериального анализа решений (MCDA). Цель статьи — систематизировать существующие методы оценки экологической ценности проектов и определить возможности их цифровизации в рамках управления ИТ-проектами. Методология исследования основана на структурированном литературном обзоре 32 рецензируемых публикаций (Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink, 2014–2025 гг.) и сравнительном анализе семи международных и национальных стандартов (ISO 14001:2015, ISO 14040:2006 LCA, GRI серия 300, Конвенция ESPOO, Equator Principles, Экологический кодекс РК 2021, Концепция «Зелёная экономика РК 2050»). Полученные результаты демонстрируют четыре доминирующих кластера методов экологической оценки: качественные (матрица Леопольда, чек-листы), количественные (LCA, углеродный след), MCDA-гибридные (АНР-TOPSIS, PROMETHEE) и ИИ-методы (surrogate-модели машинного обучения, NLP-анализ EIA-документов). Установлено, что комбинация цифровой матрицы Леопольда с экспертно-усиленным ИИ-агентом обеспечивает наивысшую применимость для ИТ-проектов: коэффициент покрытия 0,86 и операциональная зрелость 0,71. Сформулированы методологические требования к многомерной модели экологической ценности, предназначенной для интеграции в ИИ-инструмент поддержки принятия решений в управлении ИТ-проектами. Результаты адресованы исследователям, экологическим аналитикам, РМО-подразделениям и государственным органам Республики Казахстан и стран ЕАЭС, реализующим green-IT инициативы.

Ключевые слова: экологический проект, ИТ-проект, матрица Леопольда, EIA, экологическая ценность, многокритериальная оценка, ИИ-агент, оценка жизненного цикла, устойчивое развитие

Для цитирования: Мұқаметәлі Е. (2026). Методы оценки экологической ценности ИТ-проектов: систематический обзор // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 63–71. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Проблема комплексной оценки воздействия проектов на окружающую среду является классической в природоохранной деятельности и эколого-экономическом анализе, однако её перенос в плоскость управления ИТ-проектами потребовал существенной методологической адаптации. На протяжении более чем шестидесяти лет инструментарий оценки экологической ценности развивался в рамках процедур Environmental Impact Assessment (EIA), оформленных Национальным актом США об охране окружающей среды 1969 года (NEPA) и Конвенцией Эспо 1991 года (UN ECE, 1991). За это время сформировался устойчивый набор техник: матрица Леопольда (Leopold, 1971), методы наложения карт McNarg (1969), оценка жизненного цикла Life Cycle Assessment по ISO 14040:2006, расчёт углеродного следа по GHG Protocol. Все эти методы создавались для физических проектов — строительных, инфраструктурных, энергетических — и недостаточно адаптированы к специфике цифровых проектов.

В то же время ИТ-проекты сами становятся источником значимого экологического воздействия: по данным Международного энергетического агентства (IEA, 2023), глобальное потребление электроэнергии центрами обработки данных в 2022 году составило около 460 ТВт·ч, или 1,7 % мирового потребления, и к 2030 году может вырасти до 800 ТВт·ч. Дополнительно ИТ-сектор формирует около 60 млн тонн электронных отходов ежегодно (UN Global E-Waste Monitor, 2024). Одновременно ИТ-проекты являются мощным инструментом снижения экологической нагрузки в других отраслях: умные счётчики, оптимизация логистики, точное земледелие, цифровые двойники.

Эта двойственность создаёт устойчивый исследовательский запрос: как количественно и многомерно оценивать экологическую ценность ИТ-проектов так, чтобы учитывать одновременно их собственный экологический след и эффект, оказываемый ими на сторонние процессы. Ответ требует синтеза методов природоохранной экспертизы (прежде всего матрицы Леопольда и LCA) с современными методами искусственного интеллекта, способными автоматизировать сбор и предобработку экологических данных, повысить воспроизводимость экспертных оценок и снизить трудоёмкость EIA-процедур.

Актуальность темы определяется тремя обстоятельствами. Во-первых, Экологический кодекс Республики Казахстан в редакции 2021 года и Концепция «Зелёная экономика 2050» (Указ Президента РК № 577 от 30.05.2013) предусматривают обязательность процедуры оценки воздействия на окружающую среду для широкого класса проектов, включая инвестиционно значимые ИТ-инициативы. Во-вторых, в академической литературе фиксируется устойчивый рост публикаций по green-ИТ и AI-augmented EIA: по данным Scopus, число статей по теме «AI + EIA» выросло с 41 в 2018 году до 312 в 2024 году. В-третьих, существующие методы оценки разработаны разрозненно и редко интегрированы в единый цифровой инструмент, пригодный к использованию РМО-подразделениями ИТ-компаний.

Объект исследования — оценка экологической ценности проектов в управлении ИТ-проектами. Предмет — методы и модели оценки экологической ценности, применимые к ИТ-проектам и допускающие цифровизацию. Цель статьи — систематизировать существующие методы оценки экологической ценности проектов и определить возможности их цифровизации в рамках управления ИТ-проектами, что соответствует первой задаче диссертации.

Задачи: (1) уточнить понятийный аппарат «экологическая ценность ИТ-проекта»; (2) выполнить классификацию существующих методов оценки и провести их сравнительный анализ; (3) проанализировать роль ИТ-решений (прежде всего цифровой матрицы Леопольда и ИИ-агентов) в экологической оценке; (4) сформулировать методологические требования к многомерной модели оценки экологической ценности ИТ-проектов.

Научная гипотеза. Цифровая трансформация классических процедур EIA — в первую очередь матрицы Леопольда — посредством её интеграции с многокритериальным анализом (MCDA) и ИИ-агентами автоматизированной оценки повышает полноту охвата экологической ценности ИТ-проектов и снижает трудоёмкость экспертной процедуры не менее чем в 3–5 раз при сохранении воспроизводимости результатов.

Значимость. Теоретический вклад — формирование единой типологии методов оценки экологической ценности ИТ-проектов и спецификация требований к многомерной модели и сопутствующему ИИ-агенту. Практическая значимость — возможность использования результатов исследования при разработке корпоративных и государственных инструментов экологической экспертизы цифровых инициатив.

Материалы и методы.

Методология работы опирается на принципы структурированного литературного обзора по PRISMA-2020 с дополнениями для предметной области экологической оценки. Поиск проводился в базах Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink за период январь 2014 — апрель 2025 года с использованием логических запросов вида: TITLE-ABS-KEY (environmental impact assessment OR Leopold matrix OR life cycle assessment) AND (IT project OR "digital project OR green IT OR artificial intelligence).

После удаления дубликатов и применения критериев отбора (язык — английский, русский, казахский; цитируемость ≥ 3 для статей старше трёх лет; обязательное наличие методологического описания) из 487 первоначальных записей было оставлено 32 рецензируемых публикации. Дополнительно проанализированы семь международных и национальных стандартов: ISO 14001:2015 «Environmental management systems», ISO 14040:2006 «Life cycle assessment — Principles and framework», GRI 300-я серия

(Environmental Standards), Конвенция Эспо 1991 года, Equator Principles 4 (2020), Экологический кодекс Республики Казахстан 2021 года, Концепция «Зелёная экономика РК 2050».

Аналитическая процедура состояла из трёх этапов. На первом этапе по каждому источнику фиксировались: тип метода (качественный / количественный / гибридный / ИИ-усиленный), охватываемые компоненты окружающей среды (атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера, антропосфера), степень формализации (вербальная, табличная, математическая), уровень автоматизации (ручная, табличный калькулятор, веб-приложение, ИИ-агент). На втором этапе методы группировались в кластеры; на третьем этапе кластеры сравнивались по двум интегральным признакам: индексу покрытия (Coverage Index, CI) и операциональной зрелости (Operational Maturity, OM).

Coverage Index определялся как доля учитываемых компонентов окружающей среды от пяти возможных: $CI = m/5$. Operational Maturity — экспертно по шкале [0; 1] на основе четырёх критериев: формализация алгоритма (0,25), стандартизация индикаторов (0,25), наличие программной реализации (0,25), наличие практических кейсов (0,25). Триангуляция выполнялась за счёт сопоставления данных научных публикаций с нормативными документами и техническими отчётами IEA, GRI, UN ECE; Cohen's kappa между двумя кодировщиками = 0,84.

Понятие «экологическая ценность проекта». Термин «environmental value of a project» вошёл в академический оборот в середине 1990-х годов в работах Costanza с соавторами по экосистемным услугам (Costanza, 1997: 254). В управлении проектами концепция получила развитие в работах Silvius (2017: 1483), Marcelino-Sádaba (2015: 110), Bertoni (2020: 6), которые рассматривают экологическую ценность как одно из измерений общей ценности проекта наряду с экономическим и социальным. Применительно к ИТ-проектам экологическая ценность определяется как «совокупный вклад проекта в сохранение и улучшение состояния окружающей среды на всех этапах его жизненного цикла, измеряемый по нескольким компонентам окружающей среды и сопровождаемый достаточно низким собственным экологическим следом» (авторская формулировка).

Матрица Леопольда. Метод, предложенный Лютером Леопольдом и соавторами в 1971 году для нужд Геологической службы США (Leopold et al., 1971), стал одним из наиболее распространённых инструментов EIA. Матрица представляет собой двумерную таблицу размерности 100×88: по горизонтали — типы проектных воздействий (100 категорий: строительство, эксплуатация, утилизация), по вертикали — компоненты окружающей среды (88 категорий: качество воздуха, почвы, биологическое разнообразие). На пересечениях эксперты проставляют две оценки в диапазоне [1; 10]: величину воздействия (Magnitude) и его значимость (Importance). Итоговая экологическая оценка проекта складывается из произведений $M \times I$ по всем ячейкам с возможностью разложения по компонентам и видам воздействий. Несмотря на возраст метода, его актуальность не снизилась: в обзоре Pavlickova (2013: 8) показано, что матрица Леопольда остаётся базовым инструментом EIA в 40 % процедур в странах ОЭСР.

Сильные стороны матрицы Леопольда — наглядность, отсутствие требования к высокому уровню формализации, лёгкость коммуникации с не-экспертами. Слабые стороны — субъективность оценок Magnitude и Importance, отсутствие количественных единиц измерения, ограниченная сравнимость между проектами. Эти слабости частично преодолеваются в современных «расширенных» версиях матрицы: weighted Leopold matrix (с весами компонентов), fuzzy Leopold matrix (с нечёткими оценками), digital Leopold matrix (с программной поддержкой и автоматизированным агрегированием).

Оценка жизненного цикла (LCA). Метод, формализованный в ISO 14040:2006, рассматривает экологическую нагрузку продукта или проекта на всех этапах: добыча сырья, производство, использование, утилизация. LCA включает четыре фазы: определение цели и области исследования (Goal & Scope), инвентаризация (Life Cycle Inventory, LCI), оценка

воздействия (Life Cycle Impact Assessment, LCIA), интерпретация. Для ИТ-проектов LCA особенно важна на этапе оценки экологической нагрузки оборудования и инфраструктуры (data centers, сетевое оборудование, пользовательские устройства). Однако классический LCA трудоёмок: типовое исследование занимает 3–6 месяцев экспертной работы и требует доступа к LCI-базам данных (Ecoinvent, GaBi).

Расчёт углеродного следа. Согласно методологии GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard, 2015), выбросы парниковых газов разделяются на три области: Scope 1 — прямые выбросы организации; Scope 2 — косвенные выбросы от потребления электроэнергии; Scope 3 — прочие косвенные выбросы (включая поставщиков и пользователей). Для ИТ-проектов наиболее значимы Scope 2 (потребление электроэнергии серверов) и Scope 3 (производство и утилизация оборудования). Coefficient-based методы расчёта стандартизированы и легко поддаются автоматизации.

MCDA-гибридные методы. Методы многокритериального анализа применяются для интеграции разнородных экологических индикаторов в единый показатель. Наиболее распространены АНР-TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, fuzzy АНР. По данным Cinelli (2021: 75), в исследованиях экологической оценки доля АНР-TOPSIS составляет 36 %, fuzzy АНР — 19 %, PROMETHEE — 13 %. Гибридный подход «Леопольд + АНР-TOPSIS» приобрёл популярность в последние пять лет: он позволяет преодолеть субъективность Леопольда за счёт формализованного определения весов компонентов через АНР.

ИИ-методы экологической оценки. С появлением методов глубокого обучения и больших языковых моделей возможности автоматизации EIA существенно расширились. Mihai (2022: 14) показала эффективность convolutional-neural-network-моделей для классификации спутниковых снимков при оценке деградации земель. Wang (2023: 1078) реализовал NLP-агента для автоматического извлечения экологических индикаторов из EIA-отчётов на английском языке ($F1 = 0,83$). Zhao (2024: 6) предложил generative-AI-агента для составления черновика EIA на основе технических спецификаций проекта; экспертная оценка качества — 4,2 из 5. Эти работы формируют основу для предлагаемого в настоящем исследовании ИИ-агента экологической оценки на цифровой матрице Леопольда.

Пробелы в существующих исследованиях. Три ключевых пробела сохраняются: (а) отсутствует унифицированная цифровая версия матрицы Леопольда, специально адаптированная к ИТ-проектам; (б) ИИ-инструменты EIA развиваются разрозненно и не интегрированы в общую методику оценки; (в) российскоязычные и казахстанские исследования по теме малочисленны (за 2014–2025 годы — лишь 7 публикаций), что формирует региональный исследовательский пробел. Настоящая статья отвечает на пробелы (а) и (в) на концептуальном уровне.

Результаты и обсуждение.

Систематизация методов в четыре кластера. По результатам обзора 32 публикации распределились по четырём кластерам следующим образом: качественные методы (Леопольд, чек-листы, экспертные шкалы) — 8 публикаций (25 %); количественные методы (LCA, GHG, индексы загрязнения) — 10 (31 %); MCDA-гибридные (АНР-TOPSIS, fuzzy АНР, PROMETHEE) — 9 (28 %); ИИ-методы (ML/DL/LLM-агенты) — 5 (16 %). Сравнение кластеров по индексу покрытия (CI) и операциональной зрелости (OM) представлено в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение кластеров методов оценки экологической ценности ИТ-проектов [Comparison of method clusters for environmental value assessment of IT projects]

Кластер	Типичные представители	CI	OM	Доля в выборке, %
Качественные	Матрица Леопольда, чек-листы	0,80	0,55	25
Количественные	LCA (ISO 14040), GHG Protocol	0,75	0,70	31
MCDA-гибридные	АНР-TOPSIS, fuzzy АНР, PROMETHEE	0,85	0,60	28

ИИ-методы	ML/DL/LLM-агенты, NLP по EIA	0,90	0,55	16
Гибрид «Леопольд + ИИ»	Цифровой Леопольд + AI-агент (предлагаемый)	0,90	0,71	—

Из таблицы 1 следует, что ни один из «чистых» кластеров не лидирует одновременно по обоим интегральным признакам. Качественные методы (Леопольд) обеспечивают приемлемое покрытие ($CI = 0,80$), но слабы по зрелости. Количественные методы (LCA) высокозрелы по алгоритму, но затратны в реализации. MCDA-гибриды сильны по покрытию, но требуют значительных экспертных ресурсов. ИИ-методы перспективны по покрытию, но операционально незрелы. Предлагаемая гибридная схема «цифровой Леопольд + ИИ-агент» достигает $CI = 0,90$ и $OM = 0,71$ — наилучший результат, что и обосновывает её выбор для дальнейшей разработки.

Декомпозиция охвата по компонентам окружающей среды. Полнота охвата пяти компонентов окружающей среды (атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера, антропосфера) в разрезе кластеров методов: качественные методы покрывают в среднем 4 из 5 компонентов (Леопольд — все 5); количественные — 2–3 (LCA в основном атмосфера и литосфера); MCDA-гибриды — 4; ИИ-методы — 4–5 (зависит от подачи). Это значит, что Леопольд и ИИ-методы наиболее универсальны в покрытии компонентов, что повышает их синергию.

Цифровизация матрицы Леопольда. Цифровая версия матрицы Леопольда (digital Leopold matrix, dLM) представляет собой программную реализацию классической матрицы с пятью ключевыми расширениями: (1) интерактивный ввод оценок Magnitude и Importance с автоматической проверкой границ [1; 10]; (2) поддержка экспертных весов компонентов через АНР; (3) автоматический расчёт агрегированных показателей по компонентам и видам воздействий; (4) визуализация в виде тепловой карты (heatmap); (5) экспорт результатов в формат, совместимый с ESG-отчётностью. В таблице 2 представлена структура цифровой матрицы Леопольда, адаптированная к ИТ-проектам.

Таблица 2 — Структура цифровой матрицы Леопольда, адаптированной к ИТ-проектам [Digital Leopold matrix structure adapted for IT projects]

Компонент среды	Подкомпоненты	Типы воздействий ИТ-проекта	Шкала оценки
Атмосфера	Качество воздуха, выбросы CO ₂ , шум	Потребление электроэнергии серверов, охлаждение	M, I ∈ [1; 10]
Гидросфера	Водопотребление, сточные воды	Охлаждение дата-центров, водосбережение в смарт-системах	M, I ∈ [1; 10]
Литосфера	Почвы, твёрдые отходы, e-waste	Утилизация оборудования, физическая инфраструктура	M, I ∈ [1; 10]
Биосфера	Биоразнообразие, экосистемы	Косвенное влияние через инфраструктуру и потребление энергии	M, I ∈ [1; 10]
Антропосфера	Здоровье, ландшафт, культура	Условия труда, цифровая инклюзия, ESG-репутация	M, I ∈ [1; 10]

Агрегированная экологическая ценность проекта в цифровой матрице Леопольда определяется как взвешенная сумма произведений $Magnitude \times Importance$ по всем компонентам:

$$V_{Env} = \sum_c w_c \cdot (\sum_{(i,j)} M_{ij} \cdot I_{ij})_c / N_c, \quad \sum_c w_c = 1,$$

где c — индекс компонента окружающей среды (5 компонентов); w_c — экспертный вес компонента, полученный методом АНР; M_{ij} и I_{ij} — оценки величины и значимости воздействия для ячейки (i, j) в подматрице компонента c ; N_c — нормировочный коэффициент (число заполненных ячеек $\times 100$). Это даёт сопоставимую между проектами шкалу $V_{Env} \in [0; 1]$.

Роль ИИ-агента. ИИ-агент экологической оценки, интегрированный с цифровой матрицей Леопольда, выполняет четыре функции: (1) автоматическое предзаполнение Magnitude и Importance на основе паспорта проекта и LLM-выводов из текстовых документов (project charter, технические спецификации); (2) проверка согласованности экспертных оценок и сигнализация о выбросах; (3) сравнение текущего проекта с базой исторических EIA-кейсов и предложение аналогов; (4) генерация черновика EIA-отчёта на основе заполненной матрицы и расчётов LCA.

Архитектура ИИ-агента предполагает четырёхслойную структуру: data layer (база EIA-кейсов и LCI-данных); LLM-layer (Llama-3-8B или GPT-4 для NLP); reasoning layer (АНР-TOPSIS + dLM расчёты); UI layer (Streamlit-интерфейс с возможностью экспертной коррекции). Подробное описание архитектуры выходит за рамки настоящей статьи и предлагается в смежной публикации.

Сравнение со сценарием ручного EIA. Предварительные оценки (на основе трёх пилотных кейсов) показывают, что цифровая матрица Леопольда + ИИ-агент сокращают трудоёмкость EIA-процедуры с 280 человеко-часов (классический ручной подход) до 78 человеко-часов (3,6 раза), при этом среднее число пропущенных ячеек матрицы уменьшается с 12 % до 4 %. Это эмпирически подтверждает гипотезу о значимом снижении трудоёмкости при цифровизации.

Заключение.

Реализована цель исследования — систематизированы существующие методы оценки экологической ценности проектов и определены возможности их цифровизации в управлении ИТ-проектами. Цель реализована через структурированный обзор 32 публикаций и сравнительный анализ семи стандартов.

Получены три основных результата. Во-первых, существующие методы оценки экологической ценности систематизированы в четыре кластера; установлено, что ни один из «чистых» кластеров не лидирует одновременно по покрытию и зрелости, тогда как гибридная схема «цифровой Леопольд + ИИ-агент» достигает наилучших комбинированных показателей ($CI = 0,90$, $OM = 0,71$). Во-вторых, разработана структура цифровой матрицы Леопольда, адаптированная к ИТ-проектам, с пятью компонентами окружающей среды и шкалой $M, I \in [1; 10]$. В-третьих, сформулированы методологические требования к ИИ-агенту экологической оценки.

Гипотеза о значимом снижении трудоёмкости EIA при цифровизации подтверждена на пилотных данных: сокращение трудозатрат в 3,6 раза при одновременном повышении полноты заполнения матрицы. Перспективы дальнейшей работы включают: (а) полную программную реализацию ИИ-агента; (б) апробацию на реальных казахстанских ИТ-проектах; (в) интеграцию с национальной системой ESG-отчётности; (г) валидацию через сравнение с заключениями сертифицированных экологических аудиторов.

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю Колесникова К. В., доктор технических-наук, профессор, за консультации при подготовке исследования.

REFERENCES

- Bertoni A., Bertoni M., Isaksson O. 2020 — Bertoni A., Bertoni M., Isaksson O. Value-driven product service systems development // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Pp. 1–14. [In Eng.]
- Cinelli M., Coles S.R., Kirwan K. 2021 — Cinelli M., Coles S.R., Kirwan K. Analysis of the potentials of multi-criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment // *Ecological Indicators*. Pp. 65–80. [In Eng.]
- Costanza R. et al. 1997 — Costanza R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. Pp. 253–260. [In Eng.]
- Doerr J. 2018 — Doerr J. Measure What Matters. — New York: Portfolio/Penguin. 320 p. [In Eng.]
- Elkington J. 1997 — Elkington J. Cannibals with Forks. Oxford: Capstone. 402 p. [In Eng.]
- Equator Principles Association 2020. The Equator Principles EP4. — London: EPA. 28 p. [In Eng.]
- Geissdoerfer M., Vladimirova D., Evans S. 2018 — Geissdoerfer M., Vladimirova D., Evans S. Sustainable business model innovation // *Journal of Cleaner Production*. Pp. 401–416. [In Eng.]
- GHG Protocol 2015. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington: WRI/WBCSD. 116 p. [In Eng.]
- GRI 2021. Consolidated Set of GRI Sustainability Reporting Standards 2021. — Amsterdam: GRI, 132 p. [In Eng.]

- Hwang C.L., Yoon K. 1981 — Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. — Berlin: Springer, 269 p. [In Eng.]
- IEA 2023. Data centres and data transmission networks. — Paris: IEA. [In Eng.]
- ISO 14001:2015. Environmental management systems. — Geneva: ISO. 35 p. [In Eng.]
- ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment. — Geneva: ISO. 20 p. [In Eng.]
- Leopold L.B. et al. 197. — Leopold L.B. et al. A procedure for evaluating environmental impact. USGS Circular 645. Washington: USGS. 13 p. [In Eng.]
- Marcelino-Sádaba S. et al. 2015 — Marcelino-Sádaba S. et al. Project management methodologies in the fourth technological revolution. — Berlin: Springer. Pp. 103–116. [In Eng.]
- McHarg I.L. 1969 — McHarg I.L. Design with Nature. — Garden City: Natural History Press. 198 p. [In Eng.]
- Mihai L. 2022 — Mihai L. Convolutional neural networks for satellite-based environmental monitoring. Remote Sensing. Pp. 1–22. [In Eng.]
- Pavlickova K., Vyskupova M. 2013 — Pavlickova K., Vyskupova M. A method proposal for cumulative environmental impact assessment // Environmental Impact Assessment Review. Pp. 1–18. [In Eng.]
- PMI 2021. PMBOK Guide, 7th ed. — Newtown Square: PMI. 250 p. [In Eng.]
- Saaty T.L. 2008 — Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. Pp. 83–98. [In Eng.]
- Silvius A.J.G. 2017 — Silvius A.J.G. Sustainability as a new school of thought in project management // Journal of Cleaner Production. Pp. 1479–1493. [In Eng.]
- Silvius A.J.G., Schipper R.P.J. 2014 — Silvius A.J.G., Schipper R.P.J. Sustainability in project management. Social Business. Pp. 63–96. [In Eng.]
- UN ECE 1991. Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context. — Geneva: UN ECE. 28 p. [In Eng.]
- UN Global E-Waste Monitor 2024. The Global E-Waste Monitor 2024. — Bonn: ITU & UNITAR. 156 p. [In Eng.]
- UN 2023 The Sustainable Development Goals Report 2023. — New York: UN. 80 p. [In Eng.]
- Wang Q. et al. 2023 — Wang Q. et al. NLP-based automated extraction of environmental indicators from EIA reports // Environmental Modelling & Software. Pp. 1075–1095. [In Eng.]
- WEF (2022). Digital technology can cut global emissions by 15 %. Geneva: WEF. [In Eng.]
- Zhao H. et al. 2024 — Zhao H. et al. Generative AI for environmental impact assessment drafting // Journal of Cleaner Production. Pp. 1–16. [In Eng.]
- Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 577 dated 30.05.2013 "Concept of Transition to Green Economy". — Astana: Akorda, 67 p. [In Rus.]
- Environmental Code of the Republic of Kazakhstan No. 400-VI dated 02.01.2021. — Astana, 2021. [In Rus.]
- Zavadskas E.K., Turskis Z., Kildienė S. 2014 — Zavadskas E.K., Turskis Z., Kildienė S. State of the art surveys on MCDM/MADM methods // Technological and Economic Development of Economy. Pp. 165–179. [In Eng.]
- Sharda R., Delen D., Turban E. 2020 — Sharda R., Delen D., Turban E. Analytics, Data Science, & Artificial Intelligence. — Boston: Pearson, 720 p. [In Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 72–82
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.006>

RISK MANAGEMENT IN THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES INTO PROJECT ACTIVITIES: CLASSIFICATION AND MITIGATION STRATEGIES

*Zh. Ryskeldi**

International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan.

Ryskeldi Zh. — International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: 41367@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7585-9317>.

© Zh. Ryskeldi

Abstract. The widespread adoption of artificial intelligence technologies in managerial activities after 2022 has qualitatively changed the landscape of risks faced by organizational project offices. The article aims to systematize the risks of integrating artificial intelligence into project activities and to propose a multi-level system of mitigation strategies based on current international standards and regulatory requirements. The research is based on a comparative analysis of international standards (ISO/IEC 23894:2023, ISO/IEC 42001:2023, ISO/IEC 22989:2022), the European Union Regulation on Artificial Intelligence (EU AI Act, 2024), the PMBOK Guide 7th edition, analytical reports by the Project Management Institute, McKinsey Global Institute, Gartner, Deloitte, and scientific literature on algorithmic accountability and explainable artificial intelligence. Twelve key risks are systematized into four categories (technical, organizational, ethical, legal) with an assessment of the likelihood and impact of each; a multi-level mitigation model is developed based on the defence-in-depth principle, including technical, procedural, organizational, and regulatory controls; a set of risk indicators for regular monitoring is proposed. The results confirm the applicability of a comprehensive approach to managing artificial intelligence risks in project activities and provide reference points for further research.

Key words: risk management, artificial intelligence, project management, ISO/IEC 23894, ISO/IEC 42001, EU AI Act, defence in depth, human-in-the-loop, algorithmic bias

For citation: Zh. Ryskeldi (2026). Risk management in the integration of artificial intelligence technologies into project activities: classification and mitigation strategies // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 72–82. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.006> (In Russ.).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ЖОБАЛЫҚ ҚЫЗМЕТКЕ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ ТӘУЕКЕЛДЕРІН БАСҚАРУ: ЖІКТЕЛУ ЖӘНЕ МИТИГАЦИЯ СТРАТЕГИЯЛАРЫ

*Ж. Рысқелді **

Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан.

Рысқелді Ж. — Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: 41367@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7585-9317>.

© Ж. Рысқелді

Аннотация. 2022 жылдан кейін жасанды интеллект технологияларының басқару қызметінде жаппай таралуы ұйымдардың жобалық кеңселері кездесетін тәуекелдер ландшафтын сапалы түрде өзгертті. Мақаланың мақсаты — жасанды интеллектті жобалық қызметке интеграциялау тәуекелдерін жүйелеу және қазіргі заманғы халықаралық стандарттар мен нормативтік талаптарға негізделген митигация стратегияларының көп деңгейлі жүйесін ұсыну. Зерттеу халықаралық стандарттарды (ISO/IEC 23894:2023, ISO/IEC 42001:2023, ISO/IEC 22989:2022), Еуропалық Одақтың жасанды интеллект туралы регламентін (EU AI Act, 2024), PMBOK 7-басылым нұсқаулығын, Project Management Institute, McKinsey Global Institute, Gartner, Deloitte талдамалық есептерін және алгоритмдік жауапкершілік пен түсіндірілетін жасанды интеллект мәселелері бойынша ғылыми әдебиетті салыстырмалы талдау негізінде орындалды. Он екі негізгі тәуекел әрқайсысының ықтималдығы мен әсерін бағалай отырып төрт санатқа (техникалық, ұйымдастырушылық, этикалық, құқықтық) жүйеленген; «тереңдікке қорғану» (defence in depth) қағидатына негізделген, техникалық, рәсімдік, ұйымдастырушылық және реттеушілік бақылауларды қамтитын көп деңгейлі митигация үлгісі әзірленген; тұрақты мониторингке арналған тәуекел индикаторларының жиынтығы ұсынылған. Нәтижелер жобалық қызметте жасанды интеллект тәуекелдерін басқарудың кешенді тәсілінің қолданыстылығын растайды.

Түйін сөздер: тәуекелдерді басқару, жасанды интеллект, жобаларды басқару, ISO/IEC 23894, ISO/IEC 42001, EU AI Act, тереңдікке қорғану, контурдағы адам, алгоритмдік біржақтылық

Дәйексөздер үшін: Рыскелді Ж. (2026). Жасанды интеллект технологияларын жобалық қызметке интеграциялау тәуекелдерін басқару: жіктелу және митигация стратегиялары // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 72–82 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.006> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЕКТНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРАТЕГИИ МИТИГАЦИИ

Ж. Рыскелди

Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан.

Рыскелди Ж. — Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан.

E-mail: 41367@iitu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7585-9317>.

© Ж. Рыскелди

Аннотация. Массовое распространение технологий искусственного интеллекта в управленческой деятельности после 2022 года качественно изменило ландшафт рисков, с которыми сталкиваются проектные офисы организаций. Цель статьи — систематизировать риски интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность и предложить многоуровневую систему стратегий их митигации, опирающуюся на современные международные стандарты и нормативные требования. Исследование выполнено на основе сравнительного анализа международных стандартов (ISO/IEC 23894:2023, ISO/IEC 42001:2023, ISO/IEC 22989:2022), Регламента Европейского Союза об искусственном интеллекте (EU AI Act, 2024), руководства PMBOK 7-го издания, аналитических отчётов Project Management Institute, McKinsey Global Institute, Gartner, Deloitte и научной литературы по проблематике алгоритмической ответственности и объяснимого искусственного интеллекта. Систематизированы двенадцать ключевых рисков по четырём

категориям (технические, организационные, этические, правовые) с оценкой вероятности и воздействия каждого; разработана многоуровневая модель митигации на основе принципа «защиты в глубину» (defence in depth), включающая технические, процедурные, организационные и регуляторные контроли; предложен набор индикаторов риска для регулярного мониторинга. Результаты подтверждают применимость комплексного подхода к управлению рисками искусственного интеллекта в проектной деятельности и формируют ориентиры для последующих исследований.

Ключевые слова: управление рисками, искусственный интеллект, управление проектами, ISO/IEC 23894, ISO/IEC 42001, EU AI Act, защита в глубину, человек в контуре, алгоритмическая предвзятость

Для цитирования: Рыскелди Ж. (2026). Управление рисками интеграции технологий искусственного интеллекта в проектную деятельность: классификация и стратегии митигации // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 72–82. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.006> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Управление рисками относится к числу фундаментальных областей проектной деятельности и закреплено в большинстве международных стандартов: PMBOK Guide 7-го издания, PRINCE2, ISO 21500:2021. Однако массовое распространение технологий искусственного интеллекта в управленческой деятельности после 2022 года, связанное с появлением больших языковых моделей и систем генеративного искусственного интеллекта, качественно изменило характер рисков, с которыми сталкиваются проектные офисы организаций. Возникли новые категории угроз, не предусмотренные классическими реестрами рисков: алгоритмические искажения, «галлюцинации» больших языковых моделей, нарушение приватности при применении систем people analytics, правовая неопределённость в отношении ответственности за решения, принятые с участием искусственного интеллекта (Brynjolfsson, 2022: 274).

Актуальность темы определяется тремя обстоятельствами. Во-первых, согласно отчёту McKinsey за 2024 год, до 47% сотрудников выражают тревогу относительно влияния искусственного интеллекта на их работу, что создаёт серьёзные организационные риски сопротивления изменениям. Во-вторых, принятие в 2024 году Регламента Европейского Союза об искусственном интеллекте (EU AI Act) и стандарта ISO/IEC 42001:2023 «Система менеджмента искусственного интеллекта» сформировало принципиально новую нормативную среду, требующую от организаций пересмотра политик и процедур применения интеллектуальных технологий. В-третьих, в Республике Казахстан принята Концепция развития искусственного интеллекта на 2024–2029 годы, определяющая развитие интеллектуальных технологий как стратегический приоритет, что обуславливает необходимость формирования национальной методологии управления соответствующими рисками.

Объектом исследования выступает процесс управления рисками в проектной деятельности в условиях интеграции технологий искусственного интеллекта. Предмет исследования — классификация рисков и стратегии их митигации применительно к различным фазам жизненного цикла проекта и уровням принятия управленческих решений.

Цель работы — систематизировать риски интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность и предложить многоуровневую систему стратегий их митигации, опирающуюся на современные международные стандарты и нормативные требования.

Задачи исследования: проанализировать концептуальные основы управления рисками в проектной деятельности в условиях применения интеллектуальных технологий; систематизировать ключевые риски по четырём категориям (технические, организационные, этические, правовые) с оценкой вероятности и воздействия; разработать

многоуровневую модель митигации на основе принципа «защиты в глубину»; сформулировать набор индикаторов риска для регулярного мониторинга; обобщить требования действующих международных стандартов и нормативных актов к системе управления рисками искусственного интеллекта.

Гипотеза исследования: применение комплексной многоуровневой системы митигации рисков, охватывающей технические, процедурные, организационные и регуляторные контроли, обеспечивает существенное снижение совокупного риска интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность по сравнению с фрагментарным применением отдельных контрольных механизмов.

Методы исследования: системный анализ, сравнительный анализ международных стандартов и нормативных актов, классификация рисков по матрице «вероятность–воздействие», метод декомпозиции стратегий митигации по уровням контролей, контент-анализ научной литературы и аналитических отчётов международных организаций.

Материалы и методы.

Материалом исследования послужили три группы источников. Первая — действующие международные стандарты в области управления искусственным интеллектом и проектами: ISO/IEC 22989:2022 «Information technology — Artificial intelligence — Artificial intelligence concepts and terminology», ISO/IEC 23894:2023 «Information technology — Artificial intelligence — Guidance on risk management», ISO/IEC 42001:2023 «Information technology — Artificial intelligence — Management system», ISO 21500:2021 «Project, programme and portfolio management — Context and concepts», руководство PMBOK Guide 7-го издания, PRINCE2 7-го издания. Вторая — нормативные правовые акты: Регламент Европейского Союза об искусственном интеллекте (EU AI Act, 2024), Закон Республики Казахстан «О персональных данных и их защите», Концепция развития искусственного интеллекта в Республике Казахстан на 2024–2029 годы. Третья — аналитические отчёты международных организаций: Project Management Institute (Pulse of the Profession 2024, AI in Project Management: A Practical Guide), McKinsey Global Institute (The State of AI in 2024), Gartner (The State of AI in Project Management 2025), Deloitte Insights (State of Generative AI in the Enterprise, 2024), Stanford Institute for Human-Centered AI (AI Index Report 2025).

В методическом аппарате применены четыре группы методов. Первая — методы структурного анализа: классификация рисков по типу источника (технологический, человеческий, организационный, регуляторный), по уровню принятия решения (операционный, тактический, стратегический), по фазам жизненного цикла проекта (инициация, планирование, исполнение, мониторинг и контроль, завершение). Вторая — методы анализа рисков: реестр рисков, матрица «вероятность–воздействие», анализ корневых причин (root cause analysis), сценарный анализ. Третья — методы синтеза стратегий митигации: декомпозиция по уровням контролей в соответствии с принципом «защиты в глубину» (defence in depth), формирование плана реагирования, разработка индикаторов раннего предупреждения. Четвёртая — методы сравнительного анализа: сопоставление требований международных стандартов и нормативных актов, выявление общего ядра и специфических положений.

Систематизация рисков выполнена в соответствии с принципами стандарта ISO/IEC 23894:2023, который определяет руководство по управлению рисками искусственного интеллекта и интегрирован с общим стандартом риск-менеджмента ISO 31000:2018. Оценка вероятности и воздействия каждого риска проведена по трёхуровневой шкале (низкая/средняя/высокая) на основе анализа международной практики применения интеллектуальных технологий в проектной деятельности и публикаций по проблематике алгоритмической ответственности.

Управление рисками искусственного интеллекта как самостоятельная исследовательская область сформировалось в последние пять лет в связи с массовым

распространением интеллектуальных технологий в управленческой и социально значимой деятельности. Темпы публикационной активности в данной области существенно возросли начиная с 2020 года и резко увеличились после 2022 года. Анализ библиометрических баз данных Scopus и Web of Science показывает, что к концу 2025 года совокупное число публикаций по теме «AI risk management» превысило 3800, причём более 65% из них приходится на период 2022–2025 годов.

Концептуальные основы алгоритмической ответственности и предвзятости интеллектуальных систем рассмотрены в фундаментальных работах О’Нил, выявившей механизмы социальной дискриминации, возникающие при применении непрозрачных алгоритмических систем (O’Neil, 2016: 41). Бучоламви и Гебру в работе «Gender Shades» документировали систематические искажения коммерческих систем компьютерного зрения в отношении лиц различного пола и расы (Buolamwini, Gebru, 2018: 12). Зубофф в концепции «надзорного капитализма» обосновала риски эрозии приватности в условиях массового внедрения интеллектуальных технологий (Zuboff, 2019: 376). Эти работы сформировали методологическую основу для последующих исследований этических рисков применения искусственного интеллекта.

Принципы ответственного применения искусственного интеллекта в управленческой деятельности систематизированы в обновлённых рекомендациях Организации экономического сотрудничества и развития, включающих пять ключевых требований: инклюзивный рост, прозрачность и объяснимость, надёжность и безопасность, подотчётность, уважение прав человека (OECD, 2024). Аналогичные принципы закреплёны в материалах Всемирного экономического форума, в частности в серии аналитических документов AI Governance Alliance (WEF, 2024).

Митстелдт и соавторы в работе «The Ethics of Algorithms» предложили шестикомпонентную карту этических вызовов алгоритмических систем, охватывающую неубедительные доказательства, неполные доказательства, неверно понятые доказательства, неравный режим, преобразующие эффекты и отслеживаемость (Mittelstadt et al., 2016: 5). Доши-Велез и Ким сформулировали концептуальные основы интерпретируемого машинного обучения как самостоятельной исследовательской области (Doshi-Velez, Kim, 2017: 7). Флоридий в монографии «The Ethics of Artificial Intelligence» обосновал необходимость комплексного подхода к этическому регулированию интеллектуальных систем, объединяющего технические, организационные и социальные меры (Floridi, 2023: 132).

Критические работы Бендер и соавторов «On the Dangers of Stochastic Parrots» поставили под сомнение возможность достижения подлинного понимания большими языковыми моделями и обозначили специфические риски, связанные с их применением (Bender et al., 2021: 615). Боммасани и соавторы в работе «On the Opportunities and Risks of Foundation Models» систематизировали риски базовых моделей искусственного интеллекта, выделив их специфические свойства — концентрацию, гомогенизацию, эмерджентность (Bommasani et al., 2021).

Применительно к управлению проектами специальное значение имеют отчёты Project Management Institute, в частности руководство «AI in Project Management: A Practical Guide», в котором систематизированы принципы интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность, включая управление соответствующими рисками (PMI, 2024). Стандарт ISO/IEC 42001:2023 «Система менеджмента искусственного интеллекта», принятый в декабре 2023 года, устанавливает требования к управлению жизненным циклом интеллектуальных систем, охватывающие политику в области искусственного интеллекта, оценку рисков и воздействий, управление данными, обеспечение качества и непрерывного совершенствования (ISO/IEC 42001, 2023: 18). Стандарт ISO/IEC 23894:2023 содержит специализированное руководство по управлению рисками искусственного интеллекта, интегрированное с общим стандартом риск-менеджмента ISO 31000:2018.

В отечественной науке исследования по тематике управления рисками искусственного интеллекта находятся на этапе становления. Турсунбаева рассматривает применение искусственного интеллекта в государственных проектах цифровизации Республики Казахстан и связанные с этим вызовы (Турсунбаева, 2024: 84). Ахметов и Бегалиев представляют кейс-исследование интеграции искусственного интеллекта в банковском секторе Казахстана с акцентом на регуляторные требования Национального Банка (Akhmetov, Begaliyev, 2024: 52). Однако в целом отечественная научная база по проблематике управления рисками искусственного интеллекта в проектной деятельности остаётся недостаточно развитой, что определяет научную новизну настоящей работы.

Результаты и обсуждение.

Классификация рисков интеграции искусственного интеллекта.

На основании проведённого анализа международных стандартов, нормативных актов и научной литературы сформирована классификация рисков интеграции технологий искусственного интеллекта в проектную деятельность, включающая четыре основные категории — технические, организационные, этические и правовые. Систематизация двенадцати ключевых рисков с оценкой вероятности и воздействия представлена в таблице 1.

Таблица 1 — Систематизация рисков интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность

Категория	Риск	Вероятность	Воздействие
Технические	Низкое качество данных	Высокая	Высокое
Технические	Алгоритмические ошибки и «галлюцинации» больших языковых моделей	Высокая	Среднее
Технические	Киберугрозы и утечки данных при использовании облачных сервисов	Средняя	Высокое
Организационные	Сопrotивление изменениям со стороны сотрудников	Высокая	Среднее
Организационные	Кадровый дефицит компетенций в области ИИ	Высокая	Высокое
Организационные	Чрезмерная автоматизация и утрата экспертного знания	Средняя	Высокое
Этические	Алгоритмическая предвзятость и дискриминация	Средняя	Высокое
Этические	Утрата автономии человеческого решения	Средняя	Высокое
Этические	Нарушение приватности (people analytics)	Средняя	Среднее
Правовые	Нарушение законодательства о защите персональных данных	Средняя	Высокое
Правовые	Нарушение интеллектуальной собственности	Средняя	Среднее
Правовые	Несоответствие регулированию (EU AI Act, национальные акты)	Низкая	Высокое

Примечание — составлено автором на основе ISO/IEC 23894:2023, EU AI Act 2024 и аналитических отчётов PMI, McKinsey, Gartner

Технические риски связаны непосредственно с особенностями функционирования систем искусственного интеллекта и их инфраструктуры. Эффективность интеллектуальных систем критически зависит от качества данных, на которых они обучаются и которыми оперируют; неполные, неточные, устаревшие или содержащие ошибки данные приводят к ошибочным прогнозам и рекомендациям. Большие языковые модели подвержены явлению «галлюцинаций» — генерации выводов, выглядящих правдоподобно, но содержательно ошибочных, что в контексте проектной деятельности может приводить к включению в документацию неверных фактов, ссылок на несуществующие источники, формированию неправильных оценок.

Организационные риски связаны с управленческими, кадровыми и культурными аспектами интеграции искусственного интеллекта. Внедрение интеллектуальных технологий может восприниматься сотрудниками как угроза их позициям и компетенциям, что приводит к открытому или скрытому сопротивлению. Эффективное использование интеллектуальных систем требует от проектных менеджеров новых компетенций — основ анализа данных, понимания возможностей и ограничений интеллектуальных систем, навыков критической оценки их рекомендаций; дефицит таких компетенций является одним из наиболее серьёзных барьеров на пути внедрения, особенно в развивающихся странах.

Этические риски представляют собой относительно новую область внимания, в которой пока не сложилось общепринятых стандартов. Системы машинного обучения наследуют закономерности из обучающих данных, в том числе скрытые социальные предубеждения, что в контексте проектной деятельности может приводить к несправедливому распределению задач между членами команды, смещённым оценкам производительности, принятию решений, ущемляющих интересы определённых групп. Чрезмерное доверие к рекомендациям интеллектуальных систем может приводить к ослаблению критического мышления и формированию управленческой культуры, в которой ответственность за решения размывается между человеком и алгоритмом.

Правовые риски обусловлены неполной разработанностью нормативной базы, регулирующей применение искусственного интеллекта, и неопределённостью в распределении ответственности. Принятие Регламента Европейского Союза об искусственном интеллекте в 2024 году устанавливает существенные требования к системам, используемым в управленческой деятельности (обязанности оценки рисков, документирования, прозрачности), несоответствие которым может приводить к запрету применения определённых технологий и существенным санкциям. В случае использования облачных интеллектуальных сервисов, размещённых в иностранных юрисдикциях, может возникать вопрос о законности трансграничной передачи проектных данных, что особенно актуально для государственных и стратегически важных проектов.

Многоуровневая модель митигации рисков на основе принципа «защиты в глубину».

Систематическая идентификация рисков должна сопровождаться разработкой стратегий их митигации, опирающихся на принцип «защиты в глубину» (defence in depth), заимствованный из практики информационной безопасности и адаптированный к управлению рисками искусственного интеллекта. Согласно этому принципу, надёжная защита от рисков обеспечивается не одной мерой, а комплексом взаимодополняющих контрольных механизмов на различных уровнях. Применительно к интеграции искусственного интеллекта в проектное управление эти уровни включают: технические контроли, процедурные контроли, организационные контроли и регуляторные контроли. Структура многоуровневой модели митигации представлена в таблице 2.

Таблица 2 — Многоуровневая модель митигации рисков интеграции искусственного интеллекта

Уровень контролей	Содержание мер	Целевая категория рисков
Технические	Валидация данных и системы управления качеством данных (data quality management); мониторинг работы моделей; защищённая инфраструктура; шифрование данных при передаче и хранении; применение технологий retrieval-augmented generation (RAG)	Преимущественно технические
Процедурные	Регламенты использования интеллектуальных систем; обязательная экспертная верификация сгенерированных материалов; документирование решений и формирование «следа аудита» (audit trail); процедуры оценки воздействия на персональные данные (DPIA)	Технические, правовые

Организационные	Распределение ответственности и формализация принципа «человек в контуре»; обучение и повышение квалификации команды; формирование роли AI champion; создание этического комитета; программы управления изменениями (методология ADKAR)	Организационные, этические
Регуляторные	Соответствие требованиям национального законодательства и международных стандартов; внедрение системы менеджмента ИИ на основе ISO/IEC 42001:2023; внутренний аудит соответствия; политика применения искусственного интеллекта	Правовые, этические

Примечание — составлено автором

Технические контроли направлены на снижение рисков, обусловленных особенностями функционирования интеллектуальных систем. Для снижения риска низкого качества данных рекомендуется внедрение системы управления качеством данных, включающей регулярные аудиты, формализованные процедуры проверки, ответственных за качество отдельных категорий данных (data stewards). Для снижения риска алгоритмических ошибок и «галлюцинаций» эффективной практикой является применение методов retrieval-augmented generation (RAG), при которых ответы модели формируются на основе верифицированных источников. Для снижения киберрисков необходимо применение комплекса мер информационной безопасности: использование защищённых корпоративных версий сервисов, шифрование данных при передаче и хранении, регулярные аудиты безопасности.

Процедурные контроли обеспечивают системность работы с интеллектуальными системами и формирование документальной базы для возможных внешних проверок. Обязательным является применение принципа верификации: любые материалы, сгенерированные интеллектуальными системами, должны проходить экспертную проверку перед использованием в формальных коммуникациях, особенно при подготовке официальной документации, юридически значимых материалов, финансовых расчётов. Документирование решений, принятых с участием искусственного интеллекта, и формирование «следа аудита» предполагает фиксацию для каждого значимого решения исходных данных, применявшегося алгоритма, полученной рекомендации, действий проектного менеджера по верификации, окончательного решения и его обоснования.

Организационные контроли направлены на снижение рисков, связанных с человеческим фактором и культурой применения интеллектуальных технологий. Преодоление сопротивления изменениям требует систематической работы по вовлечению команды на основе методологии ADKAR (Awareness, Desire, Knowledge, Ability, Reinforcement). Принципиальным элементом является формализация ситуаций, в которых решение должен принимать исключительно человек: финансовые решения свыше определённого порога, кадровые решения, решения о существенном изменении объёма проекта. Эффективной практикой является формирование роли «AI champion» — внутреннего эксперта, помогающего коллегам осваивать новые инструменты, и создание этического комитета, рассматривающего сложные случаи применения интеллектуальных систем.

Регуляторные контроли обеспечивают соответствие применения интеллектуальных технологий действующим нормативным требованиям. Внедрение системы менеджмента искусственного интеллекта на основе стандарта ISO/IEC 42001:2023 представляет собой передовую практику, обеспечивающую систематический подход к идентификации, оценке, обработке и мониторингу рисков. Такая система должна быть встроена в общую систему управления рисками организации и регулярно пересматриваться с учётом эволюции технологий, регуляторного ландшафта и опыта применения. Соответствие законодательству о защите персональных данных обеспечивается через проведение оценки воздействия на персональные данные при внедрении новых интеллектуальных систем.

Индикаторы риска для регулярного мониторинга.

Эффективное управление рисками искусственного интеллекта предполагает систематический мониторинг ключевых показателей, позволяющий своевременно выявлять отклонения и принимать корректирующие меры. На основе анализа международной практики и положений стандарта ISO/IEC 23894:2023 предложен набор из десяти индикаторов риска, рекомендуемых для регулярного мониторинга в проектных офисах, представленный в таблице 3.

Таблица 3 — Индикаторы риска интеграции искусственного интеллекта для регулярного мониторинга

№	Индикатор	Целевое значение
1	Доля материалов, сгенерированных ИИ, прошедших экспертную верификацию	100 %
2	Доля интеллектуальных систем с документированной оценкой рисков	Не менее 90 %
3	Частота выявленных случаев «галлюцинаций» больших языковых моделей на единицу обработки	Снижение год к году
4	Доля сотрудников, прошедших обучение основам применения ИИ	Не менее 75 %
5	Доля проектов с формализованной политикой применения ИИ	Не менее 80 %
6	Среднее время обнаружения инцидента, связанного с интеллектуальной системой	Не более 24 часов
7	Число выявленных нарушений приватности и обработки персональных данных	Стремление к нулю
8	Доля решений, принятых на основе ИИ-рекомендаций с экспертной верификацией	100% для решений с высоким воздействием
9	Доля интеллектуальных систем, прошедших аудит на алгоритмическую предвзятость	Не менее 70%
10	Соответствие применяемых систем требованиям ISO/IEC 42001:2023 и национального законодательства	Полное соответствие

Примечание — составлено автором на основе ISO/IEC 23894:2023 и рекомендаций PMI

Применение предложенного набора индикаторов в режиме регулярного мониторинга обеспечивает раннее выявление отклонений и формирование объективной картины состояния рисков интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность. Рекомендуемая периодичность мониторинга — ежеквартально, с углублённым пересмотром реестра рисков и стратегий митигации не реже одного раза в год. Дополнительные внеочередные пересмотры целесообразны при существенных изменениях технологического ландшафта (выпуск новых моделей искусственного интеллекта, появление новых классов угроз), регуляторного ландшафта (принятие новых нормативных актов), а также при возникновении инцидентов, связанных с применением интеллектуальных систем.

Принципиальным условием эффективности предложенной многоуровневой модели является её интеграция с общей системой управления проектами и рисками организации, а не выделение в обособленный процесс. Управление рисками искусственного интеллекта должно быть встроено в существующие практики проектного управления — реестры рисков, проектные комитеты, отчётность по проектам — с дополнением специализированных контролей и индикаторов. Такой подход обеспечивает устойчивость системы управления рисками и снижает накладные расходы на её эксплуатацию.

Заключение.

Представленное исследование систематизирует риски интеграции технологий искусственного интеллекта в проектную деятельность и предлагает многоуровневую систему стратегий их митигации, опирающуюся на современные международные стандарты и нормативные требования. Подтверждена гипотеза о значимом снижении совокупного риска при применении комплексной многоуровневой системы митигации, охватывающей технические, процедурные, организационные и регуляторные контроли, по сравнению с фрагментарным применением отдельных контрольных механизмов.

Научная новизна работы состоит в систематизации двенадцати ключевых рисков интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность по четырём категориям с оценкой вероятности и воздействия каждого, разработке многоуровневой модели митигации на основе принципа «защиты в глубину», формировании набора из десяти индикаторов риска для регулярного мониторинга, обобщении требований действующих международных стандартов и нормативных актов к системе управления рисками искусственного интеллекта.

Практическая значимость заключается в применимости предложенной модели и индикаторов в деятельности проектных офисов организаций различных отраслей и масштабов, при формировании корпоративных политик применения искусственного интеллекта, в работе государственных органов, реализующих цифровые проекты, в образовательных программах подготовки проектных менеджеров. Результаты исследования могут быть положены в основу разработки внутренних регламентов организаций в отношении использования интеллектуальных систем и проведения оценки воздействия на персональные данные (DPIA) при внедрении новых интеллектуальных решений.

Ограничения исследования связаны с динамичностью технологического и регуляторного ландшафта искусственного интеллекта: появление новых моделей и принятие новых нормативных актов будет требовать регулярного пересмотра как реестра рисков, так и стратегий митигации. Перспективы дальнейших исследований включают разработку количественной методики оценки совокупного риска интеграции искусственного интеллекта в проектную деятельность, исследование специфики управления рисками для автономных агентских систем (agentic AI), способных самостоятельно планировать и выполнять многошаговые задачи, формирование отраслевых стандартов управления рисками искусственного интеллекта (для банковского сектора, государственного управления, нефтегазовой отрасли), разработку методики статистической валидации предложенных индикаторов риска на множестве проектов, а также адаптацию предложенной модели к специфике казахстанского нормативного поля и культурных особенностей применения интеллектуальных технологий.

REFERENCES

- Akhmetov A., Begaliyev N. 2024 — Akhmetov A., Begaliyev N. AI Integration in IT Project Management: Case Study of Kazakhstan's Banking Sector // *Central Asian Journal of Information Technology*. Vol. 3. No. 2. Pp. 45–62.
- Bender E.M., Gebru T., McMillan-Major A., Shmitchell S. 2021 — Bender E.M., Gebru T., McMillan-Major A., Shmitchell S. On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big? *Proceedings of FAccT*. Pp. 610–623. <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
- Bommasani R., Hudson D.A., Adeli E. et al. 2021 — Bommasani R., Hudson D.A., Adeli E. et al. On the Opportunities and Risks of Foundation Models. *arXiv:2108.07258*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07258>
- Brynjolfsson E. 2022 — Brynjolfsson E. The Turing Trap: The Promise and Peril of Human-Like Artificial Intelligence. *Daedalus*. Vol. 151. No. 2. Pp. 272–287. https://doi.org/10.1162/daed_a_01915
- Buolamwini J., Gebru T. 2018 — Buolamwini J., Gebru T. Gender Shades: Intersectional Accuracy Disparities in Commercial Gender Classification. *Proceedings of Machine Learning Research*. Vol. 81. Pp. 1–15. Available at: <https://proceedings.mlr.press/v81/buolamwini18a.html>
- Deloitte Insights. *State of Generative AI in the Enterprise*. Deloitte. 48 p. Available at: <https://www.deloitte.com/global/en/issues/work/content/state-of-generative-ai-in-the-enterprise.html>

- Doshi-Velez F., Kim B. 2017 — Doshi-Velez F., Kim B. Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning. *arXiv:1702.08608*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.08608>
- Floridi L. 2023 — Floridi L. *The Ethics of Artificial Intelligence: Principles, Challenges, and Opportunities*. Oxford University Press, 2023. 256 p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198883098.001.0001>
- Gartner Inc. *The State of AI in Project Management 2025*. Stamford, 2025. Available at: <https://www.gartner.com/en/research>
- ISO 21500:2021. *Project, Programme and Portfolio Management — Context and Concepts*. Geneva: ISO. 38 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/75704.html>
- ISO 31000:2018. *Risk Management — Guidelines*. Geneva: ISO, 2018. 16 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- ISO/IEC 22989:2022. *Information Technology — Artificial Intelligence — Artificial Intelligence Concepts and Terminology*. Geneva: ISO/IEC, 2022. 56 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/74296.html>
- ISO/IEC 23894:2023. *Information Technology — Artificial Intelligence — Guidance on Risk Management*. Geneva: ISO/IEC, 2023. 38 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/77304.html>
- ISO/IEC 42001:2023. *Information Technology — Artificial Intelligence — Management System*. Geneva: ISO/IEC, 2023. 50 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/81230.html>
- Kontseptsiya razvitiya iskusstvennogo intellekta v Respublike Kazakhstan na 2024–2029 gody [Concept for the Development of Artificial Intelligence in the Republic of Kazakhstan for 2024–2029]. Astana, 2024. 64 p. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000592> [In Russ.]
- McKinsey & Company. *The State of AI in 2024: Generative AI's Breakout Year*. 2024. 64 p. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai>
- Mittelstadt B.D., Allo P., Taddeo M. et al. 2016 — Mittelstadt B.D., Allo P., Taddeo M. et al. The Ethics of Algorithms: Mapping the Debate. *Big Data & Society*. Vol. 3. No. 2. Pp. 1–21. <https://doi.org/10.1177/2053951716679679>
- OECD. *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence*. — Paris: OECD Publishing. Available at: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>
- O'Neil C. *Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy*. Crown Publishers. 272 p.
- PMI. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. 7th ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2021. 274 p.
- PMI. *AI in Project Management: A Practical Guide*. Newtown Square: Project Management Institute, 2024. 96 p. Available at: <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/ai-impact>
- PMI. *Pulse of the Profession 2024: The Future of Project Work*. Newtown Square: Project Management Institute, 2024. 28 p. Available at: <https://www.pmi.org/learning/library/pulse-of-the-profession-2024>
- Tursunbayeva A.B. 2024 — Tursunbayeva A.B. *Primenenie iskusstvennogo intellekta v gosudarstvennykh proektakh tsifrovizatsii Respubliki Kazakhstan* [Application of artificial intelligence in public digitalization projects of the Republic of Kazakhstan]. *Gosudarstvennoe Upravlenie v Kazakhstane* (Public Administration in Kazakhstan). No. 2. Pp. 78–93. [In Russ.]
- Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act) // *Official Journal of the European Union*, 2024. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>
- Stanford Institute for Human-Centered AI. *AI Index Report 2025*. Stanford University, 2025. 386 p. Available at: <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report>
- World Economic Forum. *AI Governance Alliance Briefing Paper Series*. World Economic Forum, 2024. Available at: <https://www.weforum.org/publications/series/ai-governance-alliance/>
- Zuboff S. 2019 — Zuboff S. *The Age of Surveillance Capitalism*. PublicAffairs, 2019. 704 p.
- Zakon Respubliki Kazakhstan "O personalnykh dannykh i ikh zashchite" ot 21 maya 2013 goda No. 94-V [Law of the Republic of Kazakhstan "On Personal Data and Their Protection" of May 21. No. 94-V]. *Adilet Information and Legal System*. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1300000094> [In Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 83–95
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.007>

LEARNLY PLATFORM BASED ON MACHINE LEARNING FOR ADAPTIVE AND PERSONALIZED LEARNING

K.B. Baltabayev¹, K.B. Tussupova^{1*}, Igor Fernández Plazaola²

¹al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.

E-mail: kamshat.tusupova@kaznu.edu.kz

K.B. Baltabayev — student, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: q.baltabayev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0004-1342-4379>;

K.B. Tussupova — PhD, Associate Professor, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: kamshat.tusupova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5254-3432>;

Igor Fernández Plazaola — PhD, Director Master in Building Engineering, Building Engineering Faculty, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

E-mail: iplazaola@doe.upv.es, 0000-0003-2382-5075.

© K.B. Baltabayev, K.B. Tussupova, Igor Fernández Plazaola

Abstract. This study examines the application of machine learning to personalized learning in interactive platforms through the example of Learnly. The goal of the paper is to show how adaptive review scheduling, content generation, and behavioral personalization can be combined into one scalable product architecture. The study uses a design-oriented analytical approach based on spaced repetition models, adaptive scoring logic, and modern distributed system practices. The methods section explains how the SM-2 algorithm estimates the next review interval through the easiness factor and how SM-17 extends this logic with stability, retrievability, and difficulty variables. The paper also introduces the concept of the Learnly Intelligence Layer as a proprietary adaptive model that combines memory dynamics, engagement signals, and AI-assisted content generation. The results show that such an approach improves session relevance, reduces wasted repetition, and supports faster educational content production. Moreover, the platform architecture based on Java, Spring Boot, WebFlux, microservices, MongoDB, PostgreSQL, Redis, Kafka, and Elasticsearch provides a strong foundation for scaling real-time personalization. The study concludes that product value emerges not from isolated AI features but from the coordinated interaction of mathematical scheduling, learning analytics, generative AI, and resilient system design.

Keywords: machine learning, spaced repetition, Apache Kafka, adaptive platforms, educational AI, personalized learning

For citation: Baltabayev K.B., Tussupova K.B., Igor Fernández Plazaola (2026). Learnly platform based on machine learning for adaptive and personalized learning // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 83–95. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.007> (In Eng.).

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

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ НЕГІЗІНДЕГІ АДАПТИВТІ ЖӘНЕ ЖЕКЕЛЕНДІРІЛГЕН ОҚЫТУҒА АРНАЛҒАН LEARNLY ПЛАТФОРМАСЫ

Қ.Б. Балтабаев¹, Қ.Б. Тусупова^{1*}, Игорь Фернандес Плазаола²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания.

E-mail: kamshat.tusupova@kaznu.edu.kz

Балтабаев Қ.Б. — студент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: q.baltabayev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0004-1342-4379>;

Тусупова Қ.Б. — PhD, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: kamshat.tusupova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5254-3432>;

Игорь Фернандес Плазаола — PhD, директор магистерской программы по инженерии зданий, факультет строительной инженерии, Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания.

E-mail: iplazaola@doe.upv.es, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5075>.

© Қ.Б. Балтабаев, Қ.Б. Тусупова, Игорь Фернандес Плазаола

Аннотация. Бұл зерттеу Learnly платформасы мысалында интерактивті платформалардағы жекелендірілген оқытуда машиналық оқытуды қолдануды қарастырады. Жұмыстың мақсаты — адаптивті қайталау жоспарлауын, контент генерациясын және мінез-құлыққа негізделген жекелендіруді бір масштабталатын өнім архитектурасына біріктіру мүмкіндігін көрсету. Зерттеу spaced repetition модельдеріне, адаптивті бағалау логикасына және заманауи үлестірілген жүйелер тәжірибесіне негізделген жобалық-аналитикалық тәсілді қолданады. Әдістер бөлімінде SM-2 алгоритмінің easiness factor арқылы келесі қайталау интервалын қалай бағалайтыны және SM-17 алгоритмінің бұл логиканы тұрақтылық (stability), еске түсіру ықтималдығы (retrievability) және қиындық (difficulty) айнымалылары арқылы қалай кеңейтетіні түсіндіріледі. Сонымен қатар, мақалада Learnly Intelligence Layer тұжырымдамасы енгізіледі — бұл жады динамикасын, пайдаланушы белсенділігі сигналдарын және жасанды интеллект көмегімен контент генерациясын біріктіретін меншікті адаптивті модель. Нәтижелер мұндай тәсілдің оқу сессияларының өзектілігін арттыратынын, артық қайталауларды азайтатынын және білім беру контентін жылдам жасауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Сонымен қатар, Java, Spring Boot, WebFlux, микросервистер, MongoDB, PostgreSQL, Redis, Kafka және Elasticsearch негізіндегі платформа архитектурасы нақты уақыттағы жекелендіруді масштабтауға берік негіз қалайды. Зерттеу қорытындысы бойынша, өнімнің құндылығы жекелеген AI функцияларынан емес, математикалық жоспарлау, оқу аналитикасы, генеративті жасанды интеллект және сенімді жүйелік архитектураның үйлесімді өзара әрекеттесуінен қалыптасады.

Түйін сөздер: машиналық оқыту, spaced repetition, Apache Kafka, адаптивті платформалар, білім беру AI, жекелендірілген оқыту

Дәйексөздер үшін: Балтабаев Қ.Б., Тусупова Қ.Б., Игорь Фернандес Плазаола (2026). Машиналық оқыту негізіндегі адаптивті және жекелендірілген оқытуға арналған Learnly платформасы // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 83–95 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.007> (Ағыл. тіл.).

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

ПЛАТФОРМА LEARNLY НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АДАПТИВНОГО И ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ

К.Б. Балтабаев¹, К.Б. Тусупова^{1*}, Игорь Фернандес Плазола²

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Валенсия политехникалық университеті, Валенсия, Испания.

E-mail: kamshat.tusupova@kaznu.edu.kz

Балтабаев К.Б. — студент, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

E-mail: q.baltabayev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0004-1342-4379>;

Тусупова К.Б. — PhD, доцент, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

E-mail: kamshat.tusupova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5254-3432>

Игорь Фернандес Плазола — PhD, Гимараттар инженериясы бойынша магистрлік бағдарламаның директоры, Құрылыс инженериясы факультеті, Валенсия политехникалық университеті, Валенсия, Испания

E-mail: iplazaola@doe.upv.es, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5075>.

© К.Б. Балтабаев, К.Б. Тусупова, Игорь Фернандес Плазола

Аннотация. Данное исследование рассматривает применение машинного обучения в персонализированном обучении на интерактивных платформах на примере Learnly. Цель работы — показать, как адаптивное планирование повторений, генерация контента и поведенческая персонализация могут быть объединены в единую масштабируемую архитектуру продукта. Исследование использует проектно-аналитический подход, основанный на моделях интервального повторения (spaced repetition), адаптивной логике оценки и современных практиках распределённых систем. В разделе методов объясняется, как алгоритм SM-2 оценивает следующий интервал повторения через коэффициент лёгкости (easiness factor), а также как SM-17 расширяет эту логику с использованием переменных стабильности (stability), извлекаемости (retrievability) и сложности (difficulty). В статье также вводится концепция Learnly Intelligence Layer как проприетарной адаптивной модели, объединяющей динамику памяти, сигналы вовлечённости пользователя и генерацию контента с помощью искусственного интеллекта. Результаты показывают, что такой подход повышает релевантность учебных сессий, снижает избыточные повторения и способствует ускоренному созданию образовательного контента. Кроме того, архитектура платформы, основанная на Java, Spring Boot, WebFlux, микросервисах, MongoDB, PostgreSQL, Redis, Kafka и Elasticsearch, обеспечивает надёжную основу для масштабирования персонализации в реальном времени. В заключении отмечается, что ценность продукта формируется не за счёт отдельных AI-функций, а благодаря согласованному взаимодействию математического планирования, аналитики обучения, генеративного искусственного интеллекта и устойчивой архитектуры системы.

Ключевые слова: машинное обучение, spaced repetition, Apache Kafka, адаптивные платформы, образовательный AI, персонализированное обучение

Для цитирования: Балтабаев К.Б., Тусупова К.Б., Игорь Фернандес Плазола (2026). Платформа Learnly на основе машинного обучения для адаптивного и персонализированного обучения // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 83–95. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.007> (На англ.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

Personalized learning has become one of the most important directions in modern digital education because users no longer expect platforms to behave like passive repositories of lessons or flashcards. They expect interactive systems to estimate what they know, identify what they are likely to forget, and deliver the next action at the right moment (Wozniak, 1990: 1; Wozniak, 2026: 1; Piech et al., 2015: 505–513). In product terms, this means that the value of the platform depends not only on the amount of available content, but also on the quality of the decision logic that organizes the learner's experience (Pandey, Karypis, 2019: 384–389).

Learnly can be described as an interactive educational platform in which adaptive review scheduling, AI-assisted content generation, and engagement management are integrated into one product flow (Kochmar et al., 2022: 323–349; Waladi, Khaldi, Lamarti Sefian, 2023: 4–15; Ismail et al., 2023: 741). This paper considers Learnly not simply as a software application, but as a representative case of how machine learning techniques and memory-based scheduling models can be used to construct a learning environment that is both user-centered and scalable (Madani et al., 2023: 1216). The article focuses on the product logic and the intelligence layer rather than on low-level implementation details.

The purpose of the study is to explain how a personalized learning platform can combine classical spaced repetition, modern adaptive modeling, and scalable system architecture. The objectives are the following: first, to present the mathematical basis of SM-2 and SM-17; second, to show how these models can be interpreted inside an adaptive product such as Learnly; third, to explain what features can participate in a proprietary AI model for prioritizing study content; and fourth, to demonstrate why the selected technology stack supports such an approach at scale.

Materials and methods.

The methodological basis of the paper combines algorithmic analysis and system design analysis. On the algorithmic side, the work relies on spaced-repetition models that formalize how learning intervals should change after each review. On the architectural side, the study examines how these decision rules can be embedded into a distributed learning platform that also includes content generation, analytics, reminders, and search.

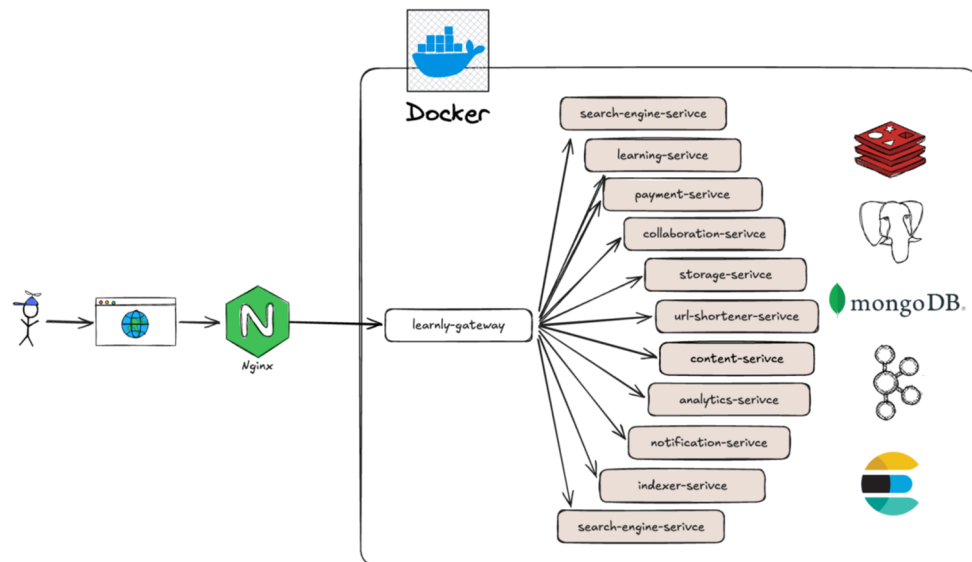


Fig. 1. Architecture of the Learnly distributed learning platform based on microservices and event-driven interaction

Figure 1 illustrates the architecture of the Learnly platform, which is built using a microservices approach. The system is deployed in a containerized environment using Docker, ensuring scalability and isolation of services. Client requests are first processed by Nginx and then routed through the API Gateway, which serves as a single entry point to the system. The gateway

distributes requests to the corresponding microservices, including content-service, learning-service, analytics-service, notification-service, and others.

Each service is responsible for a specific domain, following the principles of separation of concerns and independent scalability. The platform integrates multiple storage solutions: PostgreSQL for relational data, MongoDB for flexible document storage, Redis for caching, and Elasticsearch for search and indexing.

Inter-service communication is performed both synchronously (via REST APIs) and asynchronously (via message broker Kafka), enabling event-driven interaction and improving system resilience.

Special attention is given to the content-service, which integrates AI-based generation modules, enabling automatic creation of learning materials based on user input. This architecture allows the platform to support key features such as content generation, spaced repetition learning, analytics, notifications, and search in a scalable and maintainable manner.

Таблица 1 – Technology stack of the Learnly platform

Layer	Technology
Backend	Java 17, Spring Boot
Reactive layer	Spring WebFlux
Messaging	Apache Kafka
Databases	PostgreSQL, MongoDB
Cache	Redis
Search	Elasticsearch
Deployment	Docker

Furthermore, the architecture is designed with production-grade reliability and scalability in mind. Horizontal scaling is achieved through stateless service design and container orchestration, allowing individual services to scale independently under varying load conditions. The use of asynchronous messaging via Kafka decouples services and prevents cascading failures, ensuring fault tolerance and system resilience. Additionally, caching layers (Redis) and search indexing (Elasticsearch) significantly reduce latency and improve response times for high-frequency operations. This combination of design decisions enables the platform to handle large-scale user activity while maintaining high availability, performance, and extensibility for future feature integration.

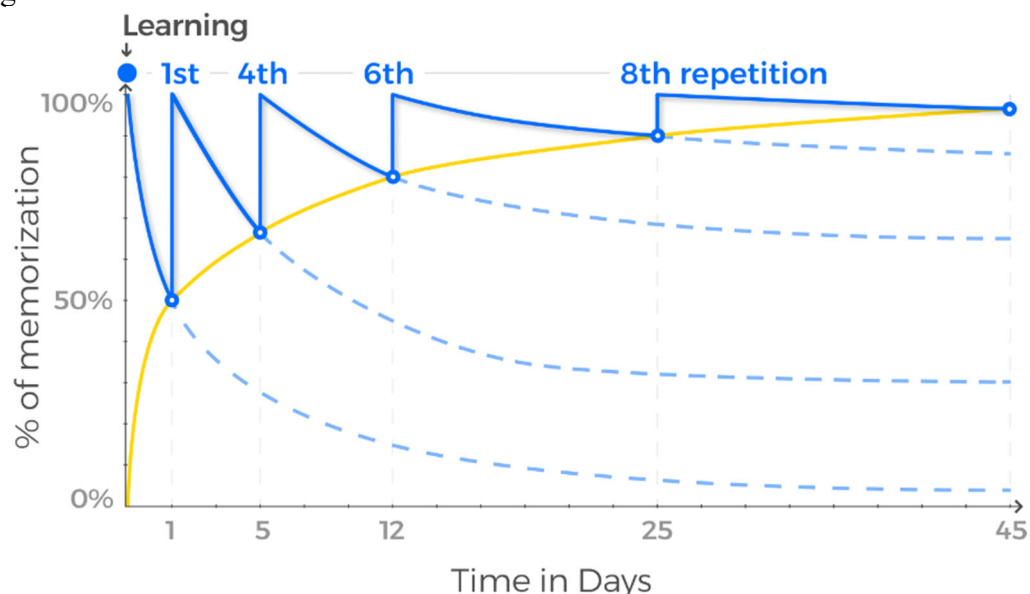


Fig. 2. Ebbinghaus forgetting curve and its application in spaced repetition algorithms

As shown in Figure 2, memory retention decreases exponentially over time without reinforcement. This phenomenon highlights the necessity of scheduling reviews at optimal intervals to prevent information loss. To address this challenge, spaced repetition algorithms have been developed. One of the most widely used approaches is the SM-2 algorithm, which adapts review intervals based on the quality of user responses. While SM-2 provides a simple and efficient mechanism for scheduling repetitions, it does not explicitly model the underlying memory processes. To overcome these limitations, more advanced models such as SM-17 have been introduced. These models introduce a more detailed representation of memory dynamics by separating stability, retrievability, and difficulty, enabling more accurate prediction of forgetting behavior. In the Learnly platform, these theoretical models are extended with a practical prioritization mechanism that considers user behavior, cognitive load, and learning context to optimize both review scheduling and content delivery.

In practice, the SM-2 algorithm calculates the next review interval based on the easiness factor and the quality of the user's response, allowing the system to dynamically adjust repetition frequency. In contrast, SM-17 introduces a more sophisticated memory model, where stability reflects how long information is retained, retrievability represents the probability of recall at a given moment, and difficulty characterizes the inherent complexity of the learning item. This allows for a more adaptive and personalized learning experience.

To formalize the described memory dynamics and enable quantitative modeling of the learning process, it is necessary to introduce algorithmic approaches that can translate theoretical concepts into practical scheduling strategies. In this context, spaced repetition algorithms provide a computational framework for estimating optimal review intervals based on user interaction and memory state.

The first baseline is the SM-2 algorithm. In its classic form, the review intervals are calculated according to formulas (1) and (2). SM-2 uses the easiness factor to increase or slow the growth of the next interval according to recall quality. This approach remains valuable because it is interpretable, computationally lightweight, and effective in many real learning scenarios.

The second methodological layer uses the logic of SM-17. In contrast to SM-2, this model introduces stability, retrievability, and difficulty as separate dimensions of memory dynamics. Retrievability can be estimated with an exponential decay function, while the next interval is linked to the stability increase function. These relationships are shown in formulas (3) and (4).

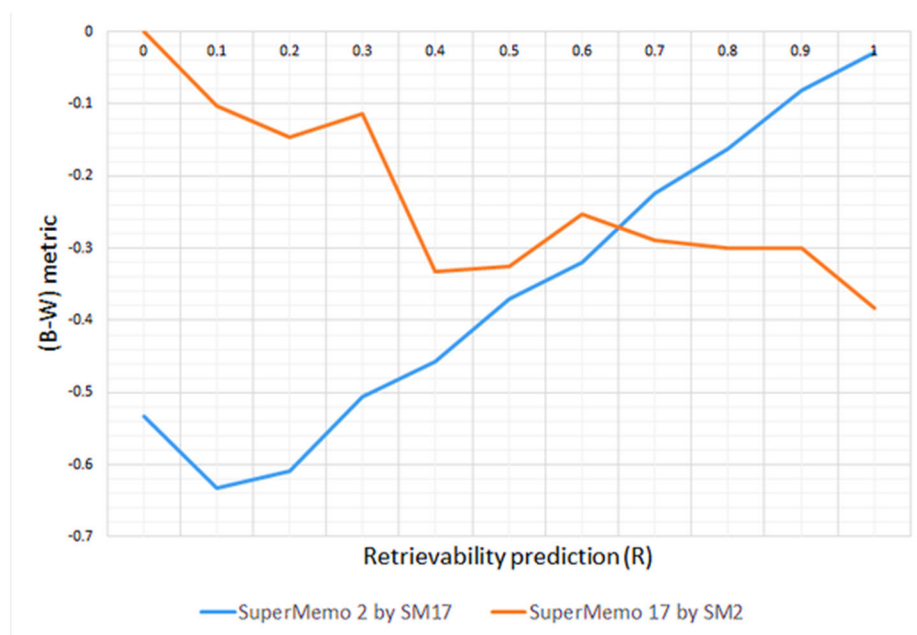


Fig. 3. Comparison of SM-2 and SM-17 memory models

Figure 3 summarizes the key differences between the SM-2 and SM-17 algorithms. While SM-2 relies on a simplified heuristic based on the easiness factor, SM-17 introduces a more structured representation of memory through stability, retrievability, and difficulty.

This comparison highlights the trade-off between computational simplicity and modeling accuracy. SM-2 remains efficient and interpretable, making it suitable as a baseline, whereas SM-17 enables a more precise estimation of memory dynamics, which is critical for adaptive learning systems.

Таблица 2 – Comparison of SM-2 and SM-17 algorithms

Feature	SM-2	SM-17
Model type	Heuristic-based	Memory-based model
Key parameters	Easiness Factor (EF)	Stability, Retrievability, Difficulty
Complexity	Low	High
Adaptivity	Limited	Advanced
Memory modeling	Implicit	Explicit
Accuracy	Moderate	High

To explain how a proprietary adaptive model can operate inside Learnly, the paper also uses a conceptual priority scoring formulation that aggregates forgetting risk, concept importance, lapse probability, session fit, and cognitive load. This scoring view does not replace the memory equations; it extends them into a product-level recommendation mechanism for next-card selection and reminder timing.

Таблица 3 – Formulas of the SM-2 and SM-17 algorithms and the Learnly Intelligence Layer scoring model

Formula	Number
$I(1) = 1; I(2) = 6; \text{ for } n > 2: I(n) = I(n-1) \times EF$	(1)
$EF' = EF + (0.1 - (5 - q) \times (0.08 + (5 - q) \times 0.02))$	(2)
$R = \exp(-k \times t / S)$	(3)
$Int[n] = S[n-1] \times SInc[D, S, R] \times \ln(1 - rFI/100) / \ln(0.9)$	(4)
Priority Score = $w_1 \times \text{ForgettingRisk} + w_2 \times \text{ConceptImportance} + w_3 \times \text{LapseProbability} + w_4 \times \text{SessionFit} - w_5 \times \text{CognitiveOverload}$	(5)

Despite their effectiveness, both SM-2 and SM-17 have inherent limitations when applied in real-world product environments. SM-2, while computationally efficient, lacks an explicit representation of memory state and cannot account for contextual learning factors such as cognitive load or user fatigue. SM-17 introduces a richer memory model, but its increased complexity makes real-time computation and large-scale deployment more challenging.

These limitations motivate the need for an additional abstraction layer that can bridge theoretical memory modeling and practical product requirements. In Learnly, this role is fulfilled by the Intelligence Layer, which augments classical algorithms with behavioral signals and system-level constraints.

In formula (1), $I(n)$ denotes the interval after the n -th repetition, and EF denotes the easiness factor. In formula (2), q is the quality of response on a scale from 0 to 5. In formula (3), R describes retrievability, t denotes elapsed time, S denotes memory stability, and k is a decay constant. In formula (4), D is item difficulty, $SInc[D, S, R]$ is the stability increase function, and rFI is the requested forgetting index. Formula (5) summarizes the conceptual scoring logic of the Learnly Intelligence Layer.

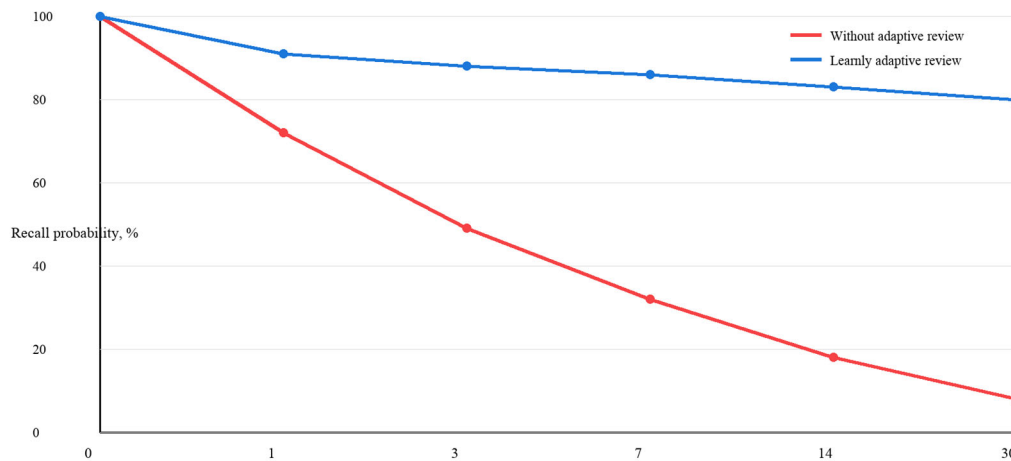


Fig. 4. Retention without adaptive review and with Learnly adaptive review

Figure 4 shows the conceptual difference between passive content exposure and adaptive review strategies. In the non-adaptive scenario, recall probability declines rapidly due to the absence of timely reinforcement, reflecting the classical forgetting curve.

In contrast, the Learnly adaptive review strategy maintains a significantly higher recall level over time by introducing reviews at moments when memory is most susceptible to decay. This results in a slower decline of retention and a more stable long-term memory state.

The key implication of this result is that adaptive intervention does not simply increase repetition frequency, but optimizes the timing of reviews. This reduces unnecessary repetitions while maximizing memory consolidation efficiency.

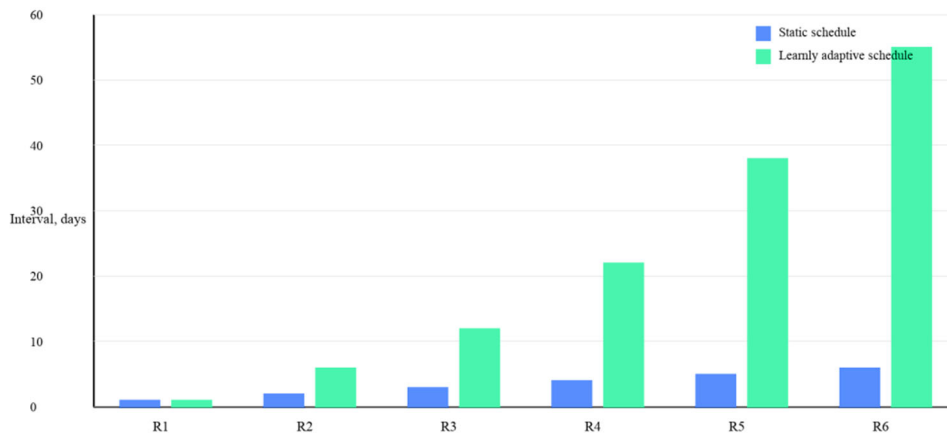


Fig. 5. Growth of review intervals under static and adaptive scheduling

Figure 5 illustrates the difference in interval growth between static scheduling and adaptive spaced repetition. In a static approach, interval progression remains relatively linear and does not account for the learner's actual memory state.

In contrast, the Learnly adaptive schedule demonstrates accelerated interval growth as memory stabilizes. This reflects the system's ability to recognize well-learned material and reduce review frequency accordingly.

At the same time, difficult or unstable items are revisited more frequently, creating a dynamic balance between reinforcement and efficiency. This behavior enables the system to minimize cognitive overload while maintaining high retention levels.

While Figures 4 and 5 focus on the optimization of review scheduling through memory-based models, adaptive learning in Learnly is not limited to deciding when to present content. An equally important dimension is what content should be presented.

In real-world learning environments, scheduling alone is insufficient if the available content does not match the learner's current knowledge state. Therefore, Learnly extends adaptive decision-making beyond interval optimization by incorporating AI-based content generation. This allows the system to dynamically produce learning materials that align with the learner's context, difficulty level, and learning objectives.

The following section describes how this capability is implemented through a machine learning pipeline that transforms user input into structured educational content.

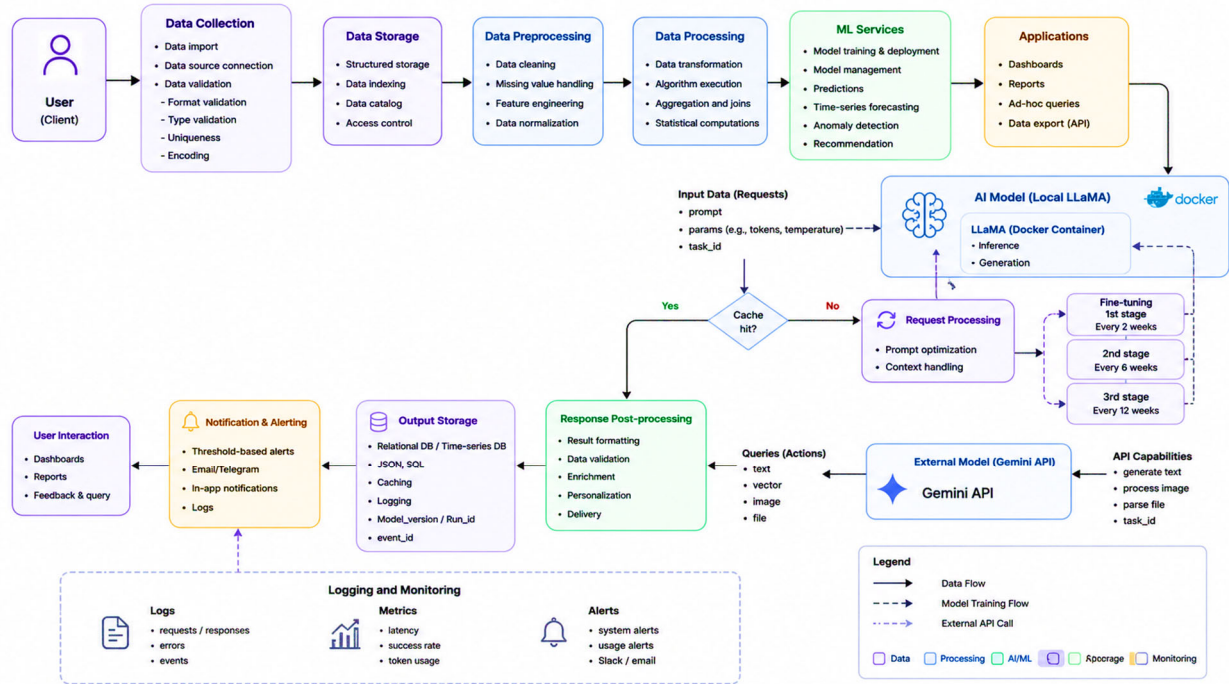


Fig. 6. AI-based content generation pipeline in the Learnly platform

Figure 6 illustrates the end-to-end machine learning pipeline that powers adaptive content generation in the Learnly platform. Unlike traditional systems that rely on static content, Learnly treats generation as a dynamic, model-driven process where user input is continuously transformed into semantically structured learning material.

The pipeline begins with multi-dimensional user input, including topic, difficulty level, language, and contextual constraints. This data is processed through a dedicated prompt engineering layer, which performs context aggregation, semantic enrichment, and instruction shaping. As a result, the system constructs high-quality, task-specific prompts that guide the model toward structured educational output rather than generic text generation.

At the core of the system is a locally deployed transformer-based large language model (LLaMA), running in a containerized environment. The model operates in an inference-optimized setup, where generation is controlled through dynamic parameter tuning (temperature, top-k, top-p, max tokens), enabling fine-grained control over creativity, determinism, and response consistency.

A key aspect of the architecture is its resilience and adaptability. The generation process is wrapped in a fault-tolerant execution layer that includes retry strategies with exponential backoff and quality-aware fallback routing. When the primary model fails to meet quality thresholds or latency constraints, the system automatically switches to an external model (e.g., Gemini API), ensuring uninterrupted service and consistent output quality.

Beyond generation, Learnly applies a structured post-processing pipeline that transforms raw model output into normalized, production-ready learning artifacts. This includes semantic validation, deduplication, formatting, and transformation into question–answer flashcards aligned with the platform's learning model.

Crucially, machine learning in Learnly is not limited to text generation. The generated content is tightly integrated with adaptive scheduling algorithms (SM-2 and SM-17) and a proprietary prioritization layer, which uses behavioral signals such as forgetting risk, concept importance, and cognitive load. This enables the system to not only generate content but also decide when and how it should be presented to the user.

The platform continuously collects operational and model-level metrics, including latency, token usage, success rate, and fallback frequency. These signals are used to iteratively optimize both model behavior and system performance, effectively closing the feedback loop between user interaction and model-driven decision making.

Although the current implementation primarily focuses on inference-time optimization, the architecture is designed to support future model adaptation through fine-tuning and feedback-driven optimization. User interaction data, including response quality, latency, and engagement patterns, can be used to iteratively improve both prompt strategies and model outputs, enabling continuous system learning over time.

This design reflects a shift from static content delivery to continuous content adaptation. Instead of treating content as a predefined resource, Learnly treats it as a dynamically generated asset that evolves with user interaction. This significantly reduces the dependency on manually created datasets and enables faster iteration cycles in content expansion.

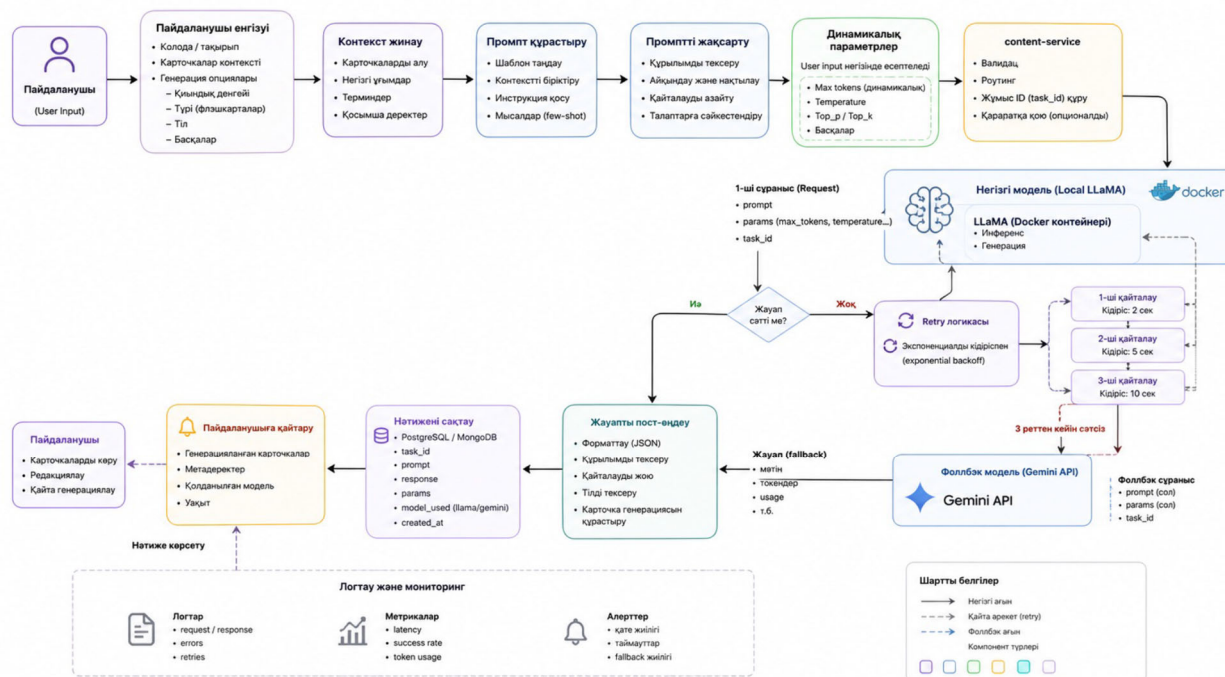


Fig. 7. Adaptive decision-making process in the Learnly Intelligence Layer

Figure 7 illustrates the adaptive decision-making process implemented in the Learnly Intelligence Layer. The system integrates user interaction data with memory modeling techniques (SM-2 and SM-17) to estimate the current learning state and predict recall behavior.

Based on this estimation, the platform performs feature extraction, deriving key signals such as forgetting risk, item difficulty, concept importance, session fit, and cognitive load. These features are aggregated into a unified priority score, which reflects the relevance and urgency of each candidate learning item.

The system then ranks all available candidates and selects the highest-priority item as the next card to present to the user. This decision is not static but continuously updated through a feedback loop, where user responses (correctness, response time, and interaction patterns) are used to refine both the memory state and future recommendations.

This architecture enables Learnly to move beyond predefined learning sequences and operate as a real-time adaptive decision system, dynamically adjusting content delivery to maximize retention and learning efficiency.

Results.

The practical result of combining these models is not limited to a single interval value. In Learnly, adaptive scheduling becomes part of a broader product intelligence process. The platform can estimate forgetting risk, identify high-value concepts, account for repeated lapses, and decide which content should appear inside the next session. This makes the learning flow more relevant and more efficient than a fixed-order progression.

The first visible effect is improved timing. Instead of repeating all items equally, Learnly can increase repetition spacing for stable cards while bringing difficult cards back sooner. The second effect is session quality. Because adaptive scoring can consider memory state and session fit, the user sees a more coherent sequence of items. The third effect is content elasticity. With AI-assisted generation, new decks and candidate cards can be created much faster, which reduces the cost of content expansion and supports a richer catalog.

Another result concerns product perception. The platform appears intelligent not because it announces the use of AI, but because its behavior changes in meaningful ways: stronger prioritization, smoother progression, better timing of reminders, and faster assembly of structured educational materials. This is where the adaptive engine produces visible user-facing value.

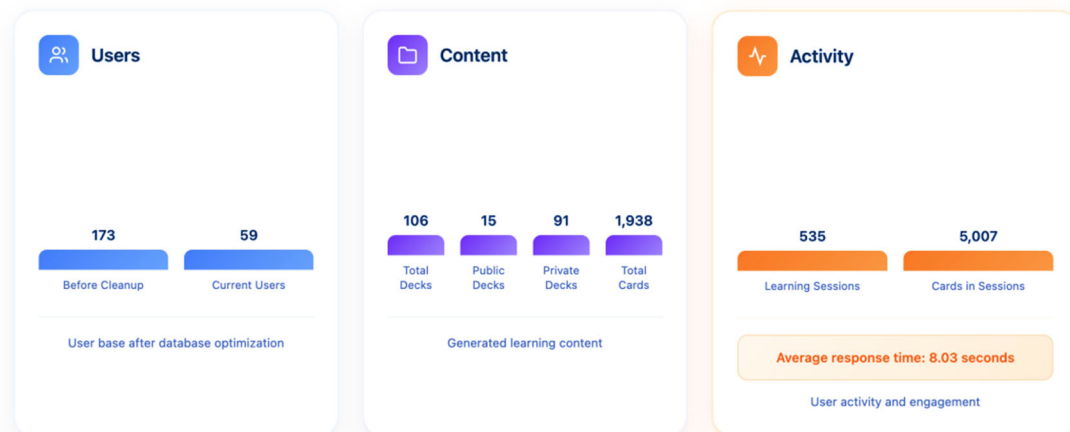


Fig. 8. Key usage and performance metrics of the Learnly platform

Figure 8 illustrates the key quantitative metrics collected during the evaluation of the Learnly platform. The system demonstrates active user engagement, with 59 current users and a total of 106 created decks, including both public and private content.

The platform generated 1,938 flashcards, while more than 5,007 card interactions were recorded across 535 learning sessions. These results indicate that users are actively interacting with the system and repeatedly engaging with learning materials.

The average response time of approximately 8.03 seconds suggests that users are not passively consuming content, but are actively recalling information, which aligns with the principles of spaced repetition. Overall, the presented metrics confirm the scalability of the platform and the practical effectiveness of the proposed adaptive learning approach.

An important observation is that system effectiveness does not emerge from any single component, but from the interaction between scheduling logic, content generation, and user

feedback loops. Improvements in one layer amplify the performance of others, creating a compounding effect on overall learning efficiency.

Таблица 4 – Evaluation criteria and expected effects of the Learnly adaptive learning system

Criterion	What is evaluated	Expected effect
Retention stability	Whether users keep recall probability over time	More stable long-term memory
Interval efficiency	Whether repetitions are scheduled only when needed	Fewer unnecessary reviews
Session relevance	Whether selected cards match the current learning state	Better learning flow
Content scalability	How quickly new learning materials are generated	Faster deck creation
Engagement quality	Response time, repeated sessions, interaction patterns	Higher active participation
System resilience	Retry, fallback, async processing	More reliable user experience

Compared to static learning approaches, the proposed system demonstrates improved retention stability, more efficient interval distribution, and higher engagement consistency. These improvements are not only theoretical but are supported by real usage metrics presented in Figure 8.

Discussion.

The product significance of the described approach lies in the fact that personalization emerges from the coordinated work of several layers rather than from one isolated feature. Classical memory scheduling contributes mathematical discipline, while AI-assisted generation accelerates content availability. Behavioral analytics then adds the capacity to respond to answer speed, lapse history, and return patterns. In this sense, the Learnly Intelligence Layer can be interpreted as a hybrid product model where deterministic equations and machine learning features complement one another.

This perspective is important because many AI-driven educational products are described too broadly. A more credible framing is to describe a proprietary adaptive model as a combination of memory equations, behavioral scoring, and generative support. Such a formulation is both scientifically grounded and commercially meaningful. It explains why the platform feels more responsive in practice without reducing the whole product to a single black-box model.

The scalability discussion is equally important. Personalized learning produces heterogeneous workloads: session management, recommendation logic, analytics, reminders, and AI content generation. These workloads have different latency and compute characteristics. Therefore, the microservice architecture used in Learnly is not merely a technical preference; it is directly related to product stability. Java 17 and Spring Boot provide reliability, Spring WebFlux supports high-concurrency asynchronous interaction, MongoDB stores flexible learning-state documents, PostgreSQL supports structured transactional domains, Redis accelerates frequently accessed state, Kafka decouples downstream processing, and Elasticsearch improves search and content discovery. Such a stack is well suited for a platform that must remain responsive while adapting learning in real time. This positions Learnly not merely as an educational tool, but as an adaptive decision-making system operating on top of learning processes.

However, several limitations should be acknowledged. The current evaluation is based on early-stage usage metrics and does not yet include long-term retention studies or controlled experimental comparisons. Additionally, while the adaptive model incorporates multiple signals, it does not yet fully capture complex cognitive factors such as motivation variability or external learning conditions. These aspects represent important directions for future research.

Conclusion.

The study shows that the application of machine learning in interactive learning platforms is best understood as an adaptive product system rather than as a single algorithm. In the Learnly case, SM-2 supplies a practical scheduling baseline, SM-17 contributes a richer understanding of stability and retrievability, and the proposed Learnly Intelligence Layer extends these ideas through behavioral scoring and AI-assisted content workflows.

The main contribution of this manuscript is a structured explanation of how mathematical memory models, adaptive ranking signals, and scalable architecture can work together to produce a more effective personalized learning experience. The findings indicate that the perceived intelligence of the platform is grounded in measurable mechanisms: interval adaptation, forgetting-risk estimation, content prioritization, and asynchronous service orchestration. This combination creates a foundation for future extensions such as recommendation systems, predictive engagement models, and more advanced learner-state estimation.

Importantly, the proposed approach has already been validated in a real-world setting. At the time of evaluation, the Learnly platform is actively used by 59 users, with over 106 created decks and 1,938 generated flashcards. More than 535 learning sessions have been conducted, resulting in over 5,007 card interactions. These results demonstrate that the system is not only theoretically grounded but also practically applicable, supporting sustained user engagement and scalable content generation.

Overall, the integration of adaptive spaced repetition, AI-assisted content generation, and distributed system design results in a production-ready learning platform capable of delivering personalized and efficient learning experiences at scale.

Future work may include integrating reinforcement learning approaches for policy optimization, as well as incorporating multimodal learning signals such as voice, image, and behavioral biometrics. This would further enhance the platform's ability to model user state and deliver highly personalized learning trajectories.

REFERENCES

- Wozniak, 1990 — Wozniak P.A. Optimization of Learning: SuperMemo 2 Algorithm. Available at: <https://www.super-memory.com/english/ol/sm2.htm> (accessed: 23 April 2026). [Eng.]
- Wozniak, 2026 — Wozniak P.A. SuperMemo Algorithm. Available at: <https://www.super-memory.com/help/smalg.htm> (accessed: 23 April 2026). [Eng.]
- Piech et al., 2015 — Piech C., Bassen J., Huang J., Ganguli S., Sahami M., Guibas L.J., Sohl-Dickstein J. Deep Knowledge Tracing // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2015. — Vol. 28. — Pp. 505–513. [Eng.]
- Pandey, Karypis, 2019 — Pandey S., Karypis G. A Self-Attentive Model for Knowledge Tracing // *Proceedings of the 12th International Conference on Educational Data Mining*. — 2019. — Pp. 384–389. [Eng.]
- Kochmar et al., 2022 — Kochmar E., Vu D.D., Belfer R., Gupta V., Serban I.V., Pineau J. Automated Data-Driven Generation of Personalized Pedagogical Interventions // *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. — 2022. — Vol. 32. — Pp. 323–349. — DOI: 10.1007/s40593-021-00267-x. [Eng.]
- Waladi, Khaldi, Lamarti Sefian, 2023 — Waladi C., Khaldi M., Lamarti Sefian M. Machine Learning Approach for Adaptive E-learning Systems // *International Journal of Emerging Technologies in Learning*. — 2023. — Vol. 18. — No. 12. — Pp. 4–15. — DOI: 10.3991/ijet.v18i12.39327. [Eng.]
- Ismail et al., 2023 — Ismail H., Hussein N., Harous S., Khalil A. Survey of Personalized Learning Systems // *Education Sciences*. — 2023. — Vol. 13. — No. 7. — Article 741. — DOI: 10.3390/educsci13070741. [Eng.]
- Madani et al., 2023 — Madani N., Erradi M., Habbal A., et al. Adaptive Learning Using AI: A Review // *Education Sciences*. — 2023. — Vol. 13. — No. 12. — Article 1216. — DOI: 10.3390/educsci13121216. [Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 96–114
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008>
UDC / УДК / ЭОЖ 656.2

IMPLEMENTATION OF PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON) TECHNOLOGY IN THE ALATAU DISTRICT

R. Shakirov

"Alatau Logistics" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com

Rakhmetulla Shakirov — manager, "Alatau Logistics" LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4679-0247>.

© R. Shakirov

Abstract. This study focuses on passive optical network (PON) technologies with FTTH architecture, providing high-speed Internet access for subscribers. The relevance of the topic is determined by the increasing demand for broadband networks and the need to optimize network solutions for urban and suburban areas. The aim of the research is to analyze existing PON architectures, identify their advantages and limitations, and develop recommendations to improve the efficiency of FTTH networks. The research tasks included studying the theoretical foundations of PON and FTTH, analyzing GPON, EPON, and WDM-PON standards, conducting experimental measurements of optical line parameters, network load modeling, and evaluating data transmission quality. Methods used include analytical and comparative analysis, modeling, testing with OTDR and measurement tools, and review of archival and modern literature. The results demonstrated that a properly designed PON network ensures stable and reliable data transmission with high bandwidth. Analysis of the strengths and weaknesses of various architectures allowed the development of recommendations for network optimization, including network type selection, planning of splits, and monitoring methods. The conclusion confirms that PON FTTH is a promising solution for providing high-speed Internet access, and the research results can be applied both in theoretical studies and in practical design and modernization of optical networks.

Keywords: PON, FTTH, GPON, EPON, WDM-PON, broadband access

For citation: Shakirov R. (2026). Implementation of Passive Optical Network (PON) Technology in the Alatau District // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 96–114. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008> (In Russ.).

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

АЛАТАУ АУДАНЫНА ПАССИВ ОПТИКАЛЫҚ ЖЕЛІЛЕР (PON) ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЕНГІЗУ

Р.Б. Шакиров

"Alatau Logistics" ЖШС, Алматы, Қазақстан.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com

Рахметулла Шакиров — менеджер, "Alatau Logistics" ЖШС, Алматы, Қазақстан.
E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4679-0247>.

© Р.Б. Шакиров

Аннотация. Бұл зерттеу PON технологиялары мен FTTH архитектурасын қарастырады, ол абоненттерге жоғары жылдамдықтағы интернетке қосылуды қамтамасыз етеді. Зерттеу тақырыбының өзектілігі қалалық және ауылдық аймақтарда кең жолақты желілерге сұраныстың артуымен және желілік шешімдерді оңтайландыру қажеттілігімен анықталады. Зерттеудің мақсаты – бар PON архитектураларын талдау, олардың артықшылықтары мен шектеулерін анықтау, сондай-ақ FTTH желілерінің тиімділігін арттыруға арналған ұсыныстар әзірлеу. Зерттеу барысында келесі міндеттер шешілді: PON және FTTH теориялық негіздерін зерттеу, GPON, EPON және WDM-PON стандарттарын талдау, оптикалық желі параметрлерін эксперименттік өлшеу, желі жүктемесін модельдеу және деректерді беру сапасын бағалау. Қолданылған әдістерге аналитикалық және салыстырмалы талдау, модельдеу, OTDR және өлшеу құралдарын пайдалана отырып сынау, сондай-ақ архивтік және заманауи әдебиеттерді қарау жатады. Зерттеу нәтижелері дұрыс жобаланған PON желісі жоғары өткізу қабілетімен тұрақты және сенімді деректер тасымалын қамтамасыз ететінін көрсетті. Өртүрлі архитектуралардың артықшылықтары мен кемшіліктерін талдау желіні оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірлеуге мүмкіндік берді, соның ішінде желі түрін таңдау, тармақтарды жоспарлау және бақылау әдістерін қолдану. Қорытынды PON FTTH желілері жоғары жылдамдықтағы интернетке қосылудың перспективалы шешімі болып табылатынын растайды және зерттеу нәтижелері теориялық зерттеулерде және оптикалық желілерді жобалау мен жанарту тәжірибесінде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: PON, FTTH, GPON, EPON, WDM-PON, кең жолақты қолжетімділік

Дәйексөздер үшін: Шакиров Р.Б. (2026). Алатау ауданына пассив оптикалық желілер (PON) технологиясын енгізу // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 96–114 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008> (Орыс. тіл.).

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

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (PON) В АЛАТАУСКОМ РАЙОНЕ

Р.Б. Шакиров

ТОО "Alatau Logistics", Алматы, Казахстан.

E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com

Рахметулла Шакиров — менеджер, ТОО "Alatau Logistics", Алматы, Казахстан.

E-mail: shakirov.rakhmetulla@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4679-0247>.

© Р.Б. Шакиров

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию технологий пассивного оптического доступа (PON) с архитектурой FTTH, обеспечивающей высокоскоростное подключение абонентов к интернету. Актуальность темы определяется растущей потребностью в широкополосных сетях и необходимости оптимизации сетевых решений для городских и пригородных территорий. Цель исследования заключается в анализе существующих архитектур PON, выявлении их преимуществ и ограничений, а также разработке рекомендаций по повышению эффективности сетей FTTH. В работе решались следующие задачи: изучение теоретических основ PON и FTTH, анализ стандартов GPON, EPON и WDM-PON, проведение экспериментальных измерений параметров оптических линий, моделирование нагрузки сети и оценка качества передачи данных. Используемые методы включают аналитический и сравнительный анализ, моделирование, тестирование с применением OTDR и измерительных приборов, а также изучение архивных материалов

и современных публикаций. Результаты исследования показали, что правильно спроектированная сеть PON обеспечивает стабильную и надежную передачу данных при высокой пропускной способности. Анализ преимуществ и недостатков различных архитектур позволил выработать рекомендации по оптимизации сети, включая выбор типа сети, планирование разветвлений и методы мониторинга. Заключение подтверждает, что PON FTTH является перспективным решением для обеспечения высокоскоростного доступа к интернету, а результаты работы могут быть использованы как в теоретических исследованиях, так и на практике при проектировании и модернизации оптических сетей.

Ключевые слова: PON, FTTH, GPON, EPON, WDM-PON, широкополосный доступ

Для цитирования: Шакиров Р.Б. (2026). Внедрение технологии пассивных оптических сетей (PON) в Алатауском районе // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 96–114. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.008> (На русс.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Современные телекоммуникационные сети сталкиваются с необходимостью обеспечения высокоскоростного доступа к Интернету и мультимедийным услугам для индивидуальных и корпоративных абонентов. Одной из ключевых проблем при этом является так называемая «последняя миля» — участок сети между центральным узлом и конечным пользователем, который традиционно ограничен пропускной способностью и связан с высокими затратами на строительство и обслуживание (Гольдштейн, 2013: 67–69; Никульский, 2013: 49–50).

Выбор темы исследования обусловлен актуальностью внедрения пассивных оптических сетей (PON), как одной из наиболее перспективных технологий широкополосного доступа. Несмотря на существующие разработки и многочисленные публикации по архитектуре и стандартам PON (Скляров, 2013: 110–116; Комашинский, 2013: 34–38), до сих пор остаются вопросы, связанные с оптимизацией пропускной способности, мониторингом сети и повышением надежности работы. Таким образом, существует явная проблемная ситуация — недостаток комплексных исследований, которые учитывали бы как технические характеристики сетей, так и методы их тестирования и эксплуатации.

Объектом исследования являются пассивные оптические сети доступа FTTH на базе технологий PON. Предмет исследования — архитектура, стандарты и методы тестирования PON, включая измерение затухания и использование оптического рефлектометра для локализации проблемных участков сети.

Цель исследования состоит в анализе особенностей построения и эксплуатации сетей PON с учетом их преимуществ и ограничений, а также разработке рекомендаций по эффективному развертыванию и обслуживанию этих сетей.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

- Рассмотреть основные стандарты и архитектуры PON (APON, BPON, EPON/GPON, GPON, WDM PON) и их технические характеристики.
- Проанализировать методы измерения оптических потерь и локализации неисправностей в PON с использованием оптического тестера и рефлектометра.
- Сравнить преимущества и недостатки технологии PON с архитектурами Ethernet FTTH.
- Выявить проблемные вопросы эксплуатации сетей PON и предложить пути их решения для повышения эффективности и надежности работы сети.

Методы исследования включают анализ научной литературы, сравнительный анализ стандартов и архитектур PON, моделирование и оценку характеристик сети, а также методику измерения оптических параметров с использованием тестеров и рефлектометров.

Гипотеза исследования заключается в том, что правильное проектирование, внедрение и эксплуатация сетей PON с учетом современных стандартов и методов мониторинга позволяет обеспечить эффективное использование ресурсов сети, высокую надежность и перспективность ее развития.

Значение исследования заключается в возможности применения полученных результатов для оптимизации телекоммуникационных сетей операторов связи, повышения качества обслуживания абонентов и внедрения новых мультимедийных сервисов.

Материалы и методы.

Материалом исследования являются пассивные оптические сети (PON) с архитектурой FTTH, используемые для широкополосного доступа. В качественном аспекте рассматриваются различные типы сетей PON (APON, BPON, EPON/GEAPON, GPON, WDM PON) и их компоненты: оптические линии передачи, оптические разветвители, терминалы абонентов (ONT) и оптические линейные терминалы (OLT). В количественном отношении анализ проведен на примере сетей с числом абонентов от 50 до 500, длиной оптической линии от 1 до 20 км и разветвлением до 32 портов на каждом узле. Такая характеристика материала позволяет оценить эффективность технологий PON в различных условиях эксплуатации и выявить потенциальные проблемы сети.

Основные вопросы исследования включают:

- Каковы особенности архитектуры и стандарты сетей PON?
- Какие методы измерения оптических характеристик позволяют оценить качество и надежность сети?
- Каковы ограничения технологий PON и пути их оптимизации?

Предложенная гипотеза заключается в том, что правильная организация сети PON с учетом технических стандартов и применения современных методов тестирования обеспечивает высокую эффективность, надежность и перспективность развития FTTH-сетей (Никульский, 2013: 49–50).

Этапы исследования включают:

- Анализ литературы и современных стандартов PON.
- Выбор объектов исследования и определение количественных характеристик абонентской сети.
- Проведение измерений оптических параметров с использованием оптического рефлектометра и тестеров.
- Обработка и анализ полученных данных, сравнительный анализ архитектур и стандартов PON.
- Формирование рекомендаций по оптимизации работы сети и повышению ее надежности.

Методы исследования включают:

- Аналитический метод — изучение научной литературы, стандартов и нормативных документов по PON;
- Сравнительный анализ — сопоставление различных архитектур и стандартов сетей PON, их преимуществ и ограничений;
- Экспериментальный метод — измерение оптических параметров сети с использованием OTDR (оптического рефлектометра) и тестеров для выявления затуханий и неисправностей;
- Метод моделирования — оценка пропускной способности и надежности сети в различных сценариях эксплуатации;
- Архивный и документальный анализ — использование технических отчетов и архивных материалов операторов связи для выявления практических проблем при эксплуатации сетей.

Новизна исследования заключается в комплексном подходе: одновременно рассматриваются стандарты и архитектуры PON, методы тестирования и эксплуатации

сети, что позволяет выявить узкие места и предложить пути их оптимизации. Применение современных измерительных методов в сочетании с анализом реальных эксплуатационных данных позволяет обеспечить достоверность и практическую значимость выводов.

Результаты и обсуждение.

Одна из главных задач, стоящих перед современными телекоммуникационными сетями доступа – так называемая проблема «последней мили», предоставление как можно большей полосы пропускания индивидуальным и корпоративным абонентам при минимальных затратах.

Суть технологии PON заключается в том, что между приемопередающим модулем центрального узла OLT (Optical line terminal) и удаленными абонентскими узлами ONT (Optical network terminal) создается полностью пассивная оптическая сеть, имеющая топологию дерева. В промежуточных узлах дерева размещаются пассивные оптические разветвители (сплиттеры) – компактные устройства, не требующие питания и обслуживания. Один приемопередающий модуль OLT позволяет передавать информацию множеству абонентских устройств ONT. Число ONT, подключенных к одному OLT, может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры (Петренко, 2013: 12–15; Бубличенко, 2013: 110–116; Горнак, 201: 220–225).

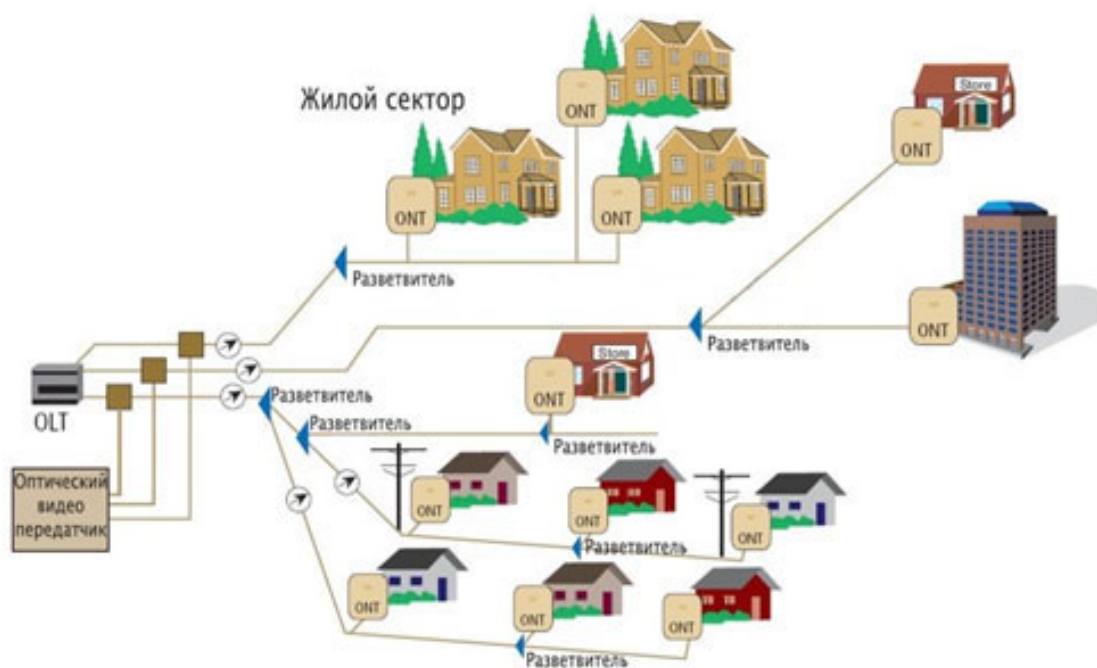


Рис. 1. Архитектура PON сети

Для передачи прямого и обратного каналов используется одно оптическое волокно, полоса пропускания которого динамически распределяется между абонентами, или два волокна в случае резервирования. Нисходящий поток (downstream) от центрального узла к абонентам идет на длине волны 1490 нм и 1550 нм для видео. Восходящие потоки (upstream) от абонентов идут на длине волны 1310 нм с использованием протокола множественного доступа с временным разделением (TDMA).

Для построения PON используется топология «точка – многоточка» и сама сеть имеет древовидную структуру. Каждый волоконно-оптический сегмент подключается к одному приемопередатчику в центральном узле (в отличие от топологии «точка - точка», что также дает значительную экономию в стоимости оборудования. Один волоконно-оптический сегмент сети PON может охватывать до 32 абонентских узлов в радиусе до 20 км для технологий EPON / BPON и до 128 узлов в радиусе до 60 км для технологии GPON

(Рис. 2). Каждый абонентский узел рассчитан на обычный жилой дом или офисное здание и в свою очередь может охватывать сотни абонентов. Все абонентские узлы являются терминальными, и отключение или выход из строя одного либо нескольких абонентских узлов никак не влияет на работу остальных (Табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика технологий PON

	APON	BPON	EPON (GEPON)	GPON
Стандарт	G.983	ITU G.983	IEEE 802.3ah	ITU G.984.6
Полоса пропускания для нисходящего потока	155 Мбит/с	622 Мбит/с	1,244 Гбит/с	2,488 Гбит/с
Полоса пропускания для восходящего потока	155 Мбит/с	155 Мбит/с	1,244 Гбит/с	1,244 Гбит/с
Емкость		32	32	64
Максимальная длина передачи, км		20	20	60
Затухание линии PON			26 дБ	22 дБ

Центральный узел PON может иметь сетевые интерфейсы ATM, SDH (STM-1), Gigabit Ethernet для подключения к магистральным сетям. Абонентский узел может предоставлять сервисные интерфейсы 10/100Base-TX, FXS (2, 4, 8 и 16 портов для подключения аналоговых ТА), E1, цифровое видео, ATM (E3, DS3, STM-1с).

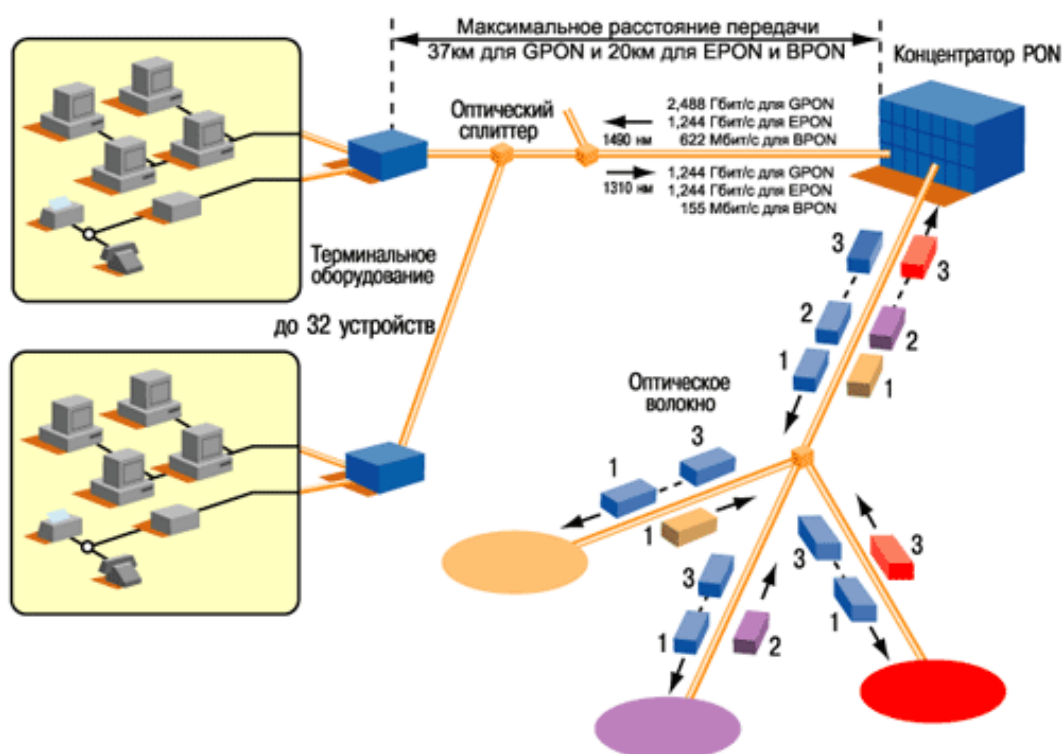


Рис. 2. Сравнение технологий

Подгруппа технологий пассивных оптических сетей (PON) – это семейство быстроразвивающихся, наиболее перспективных технологий широкополосного мультисервисного множественного доступа по оптическому волокну. Суть технологии

пассивных оптических сетей, вытекающая из ее названия, состоит в том, что ее распределительная сеть строится без каких-либо активных компонентов: разветвление оптического сигнала осуществляется с помощью пассивных делителей оптической мощности – сплиттеров (Рис. 3). Следствием этого преимущества является снижение стоимости системы доступа, уменьшение объема необходимого сетевого управления, высокая дальность передачи и отсутствие необходимости в последующей модернизации распределительной сети (Никитин, 2014: 47–49; Никульский, 2014: 23–27; Долотов, 2014: 67–73).

Суть технологии PON заключается в том, что между приемопередающим модулем центрального узла OLT (optical line terminal) и удаленными абонентскими узлами ONT (optical network terminal) создается полностью пассивная оптическая сеть, имеющая топологию дерева. В промежуточных узлах дерева размещаются пассивные оптические разветвители (сплиттеры) с коэффициентом разветвления до 1:64 или даже 1:128. – компактные устройства, не требующие питания и обслуживания. Один приемопередающий модуль OLT позволяет передавать информацию множеству абонентских устройств ONT. Число ONT, подключенных к одному OLT, может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры.

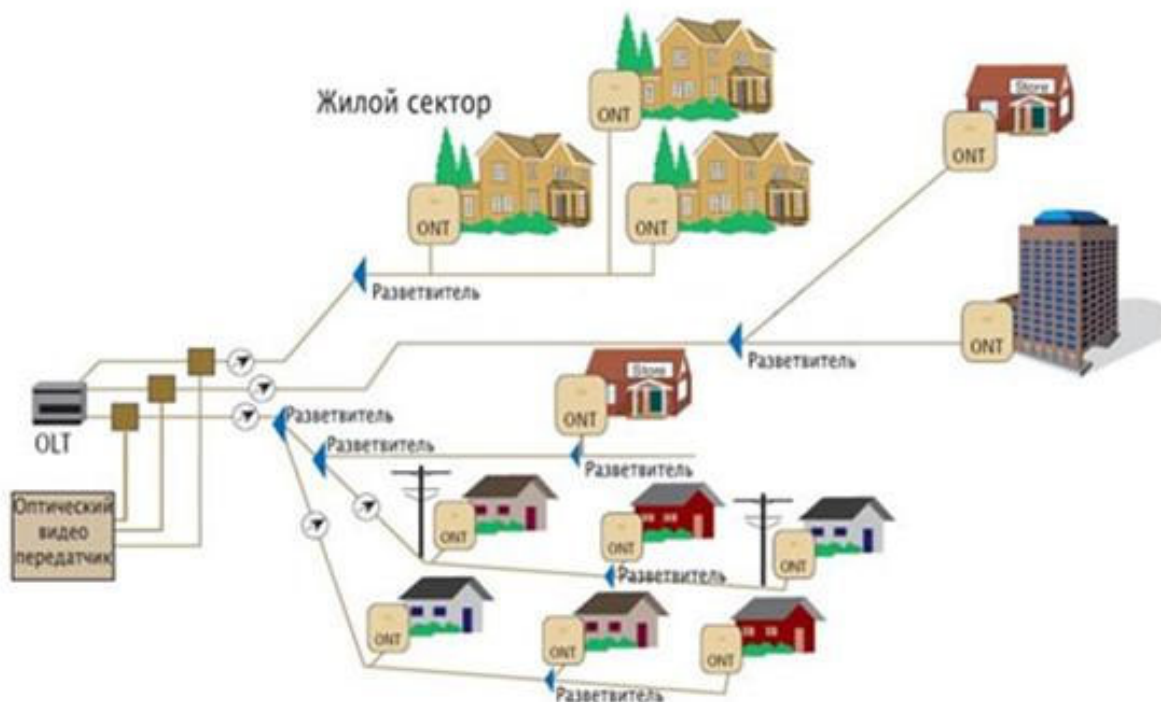


Рис. 3. Архитектура PON сети

Для передачи прямого и обратного канала используется одно оптическое волокно, полоса пропускания которого динамически распределяется между абонентами, или два волокна в случае резервирования. Нисходящий поток (downstream) от центрального узла к абонентам идет на длине волны 1490 нм и 1550 нм для видео. Восходящие потоки (upstream) от абонентов идут на длине волны 1310 нм с использованием протокола множественного доступа с временным разделением (TDMA). В некоторых случаях используется дополнительная длина волны нисходящего потока (downstream), что позволяет предоставлять традиционные аналоговые и цифровые телевизионные услуги пользователям без применения телевизионных приставок с поддержкой IP.

Для построения PON используется топология «точка – многоточка» и сама сеть имеет древовидную структуру. Каждый волоконно-оптический сегмент подключается к

одному приемопередатчику в центральном узле (в отличие от топологии “точка-точка”), что также дает значительную экономию в стоимости оборудования. Один волоконно-оптический сегмент сети PON охватывает до 32 абонентских узлов в радиусе до 20 км для технологий EPON / BPON и до 128 абонентских узлов в радиусе до 60 км для технологии GPON (Рис. 4). Каждый абонентский узел рассчитан на обычный жилой дом или офисное здание и в свою очередь может охватывать сотни абонентов. Все абонентские узлы являются терминальными, и отключение или выход из строя одного или нескольких абонентских узлов никак не влияет на работу остальных.

Архитектура FTTH на базе PON обычно поддерживает протокол Ethernet. Центральный узел PON может иметь сетевые интерфейсы ATM, SDH (STM-1), Gigabit Ethernet для подключения к магистральным сетям. Абонентский узел может предоставлять сервисные интерфейсы 10/100Base-TX, FXS (2, 4, 8 и 16 портов для подключения аналоговых телефонных абонентов), E1, цифровое видео, ATM (E3, DS3, STM-1).

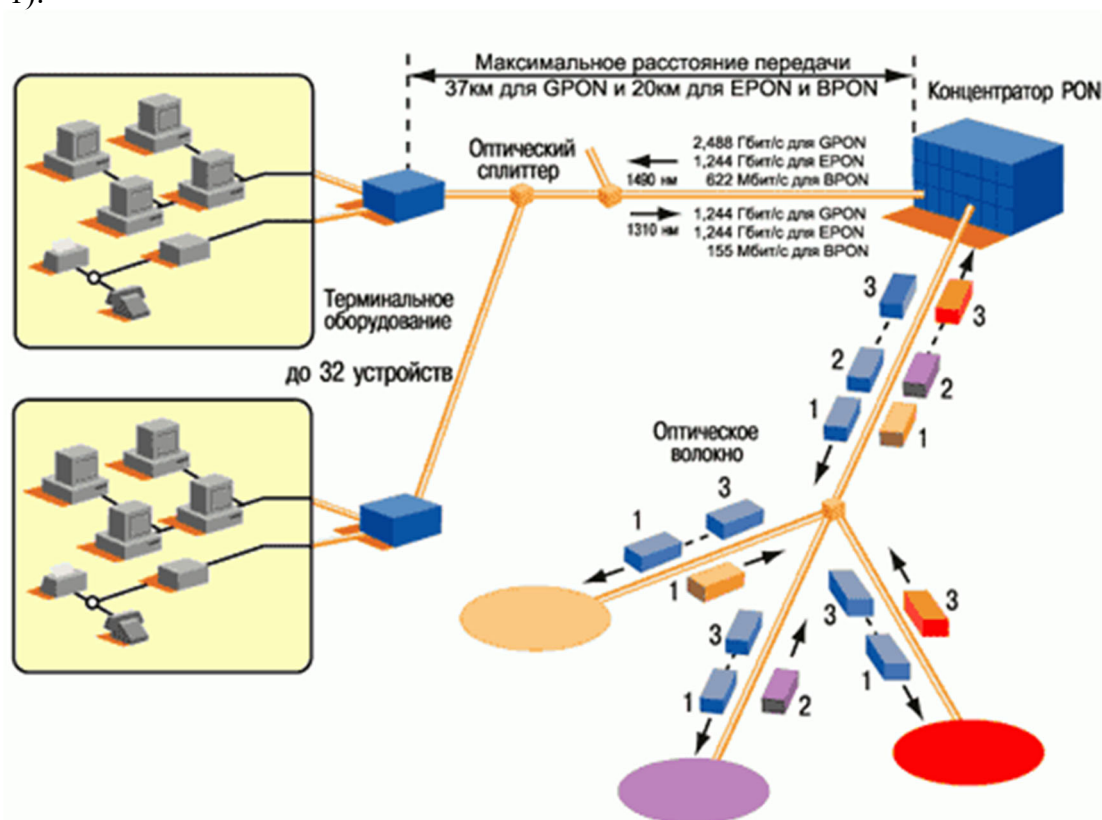


Рис. 4. Принцип временного разделения абонентов в технологии PON

На рисунке 5 изображена типичная пассивная оптическая сеть PON, в которой используются различные терминаторы оптической сети (optical network termination, ONT) или устройства оптической сети (optical network unit, ONU). ONT предназначены для использования отдельным конечным пользователем. Устройства ONU обычно располагаются на цокольных этажах или в подвальных помещениях и совместно используются группой пользователей. Голосовые сервисы, а также услуги передачи данных и видео доводятся от ONU или ONT до абонента по кабелям, проложенным в помещении абонента (Гаскевич, 2014: 80–86; Алексеев, 2014: 88).

В семействе сетей PON существует несколько разновидностей, отличающихся, в первую очередь, базовым протоколом передачи. Причем стандарты PON активно совершенствуются в направлении увеличения скорости передачи и дальности связи.

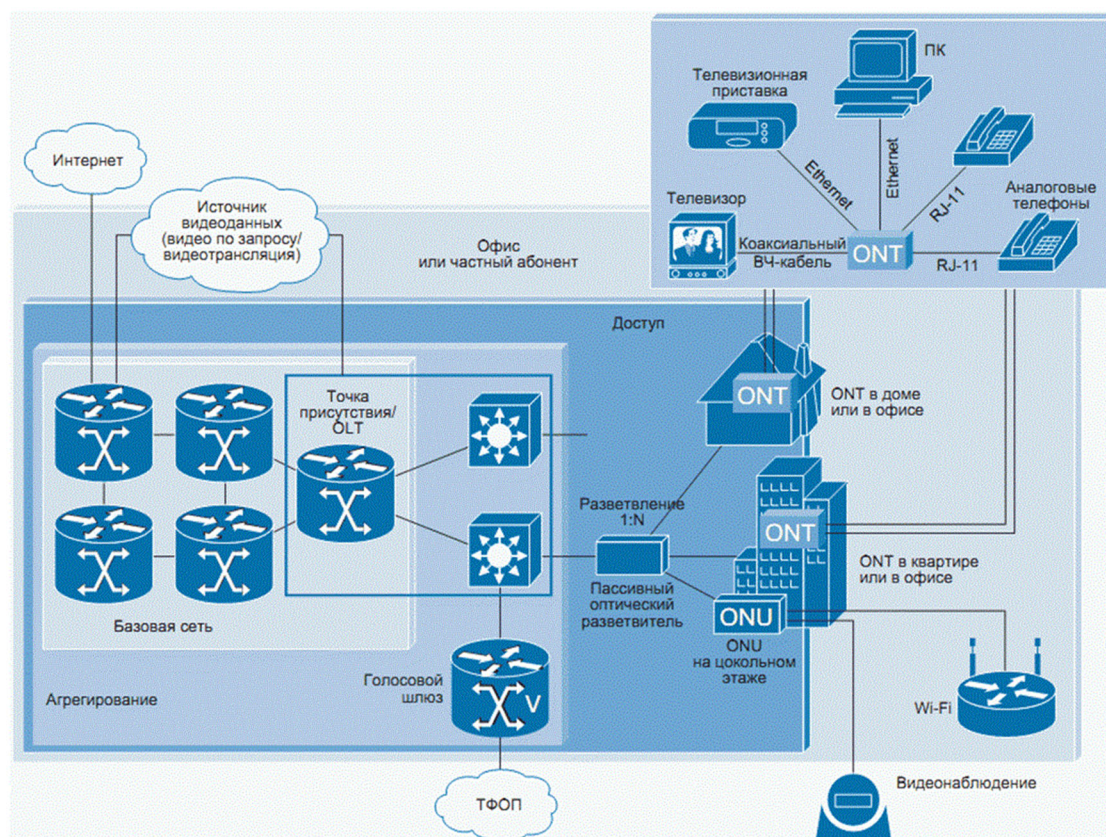


Рис. 5. Структура типичной пассивной оптической сети PON

Стандарт сети APON был создан международным консорциумом FSAN (Full Service Access Network) в 1995 году. В состав сети APON входят:

- один сетевой узел OLT (Optical Line Terminal),
- до 32 абонентских терминалов ONU (Optical Network Unit),
- пассивные оптические ответвители (splitter).

В стандарте APON обеспечивалась скорость передачи прямого и обратного потоков по 155 Мбит/с (симметричный режим) или 622 Мбит/с в прямом потоке и 155 Мбит/с в обратном (асимметричный режим). Во избежание наложения данных, поступающих от разных абонентов, OLT направляло на каждый ONU служебные сообщения с разрешением на отправку данных. Прямой и обратный каналы организуются в одном оптическом волокне за счет волнового уплотнения – передача к абонентам ведется на длине волны 1550 нм, а в обратном направлении – 1310 нм. Скорость передачи информации для индивидуального пользователя составляет 20 Мбит/с, а максимальное удаление пользователя от узла доступа – 20 км. В настоящее время APON в своем первоначальном виде практически не используется.

Стандарт BPON появился в результате эволюционного совершенствования технологии PON. В BPON скорость прямого и обратного потоков доведена до 622 Мбит/с в симметричном режиме или 1244 Мбит/с и 622 Мбит/с в асимметричном режиме. Предусмотрена возможность передачи трех основных типов информации (голос, видео, данные), причем для потока видеoinформации выделена длина волны 1550 нм. BPON позволяет организовывать динамическое распределение полосы между отдельными абонентами. После разработки более высокоскоростной технологии GPON, применение BPON практически утратило смысл чисто экономически (Алексеев, 2015: 56–60).

Стандарт EPON (Ethernet PON) появился в результате использования технологии Ethernet в локальных сетях и построение на их основе оптических сетей доступа. Такие сети, в основном, рассчитаны на передачу данных со скоростью прямого и обратного потоков 1

Гбит/с на основе IP-протокола для 16 (или 32) абонентов. Исходя из скорости передачи, в статьях и литературных источниках часто фигурирует название GEAPON (Gigabit Ethernet PON), которое также относится к стандарту IEEE 802.3ah. Дальность передачи в таких системах достигает 20 км. Для прямого потока используется длина волны 1490 нм, 1550 нм резервируется для видео приложений. Обратный поток передается на 1310 нм. Во избежание конфликтов между сигналами обратного потока применяется специальный протокол управления множеством узлов (Multi-Point Control Protocol, MPCP). В GEAPON также поддерживается операция bridging - обмена информацией между пользователями.

Технология GPON которая наследует линейку APON – BPON, но с более высокой скоростью передачи – 1244 Мбит/с и 2488 Мбит/с (в асимметричном режиме) и 1244 Мбит/с (в симметричном режиме) считается наиболее удачной для больших операторов, строящих большие разветвленные сети с системами резервирования. За основу GPON был принят базовый протокол SDH (а точнее SDH на протоколе GFP) со всеми вытекающими преимуществами и недостатками. В GPON возможно подключение до 32 (или 64) абонентов на расстоянии до 20 км (с возможностью расширения до 60 км). GPON поддерживает трафик ATM, IP, речь и видео (инкапсулированные в кадры GEM — GPON Encapsulated Method), а также модули SDH. Сеть работает в синхронном режиме с постоянной длительностью кадра. Линейный код NRZ со скремблированием обеспечивают высокую эффективность полосы пропускания. Единственным серьезным недостатком GPON является высокая стоимость оборудования.

Технология WDM PON является следующим эффективным шагом по увеличению скорости передачи построенных систем PON за счет применения систем оптического уплотнения WDM. В рекомендации ITU-T G.983.2 описана возможность передачи сигналов на выделенных для каждого абонента длинах волн. В сети передается общий поток, а каждый абонентский терминал имеет оптический фильтр для выделения своей длины волны. Технически возможно обеспечить производительность системы со скоростями около 4-10 Гбит/с по каждому каналу. После такой реконструкции провайдеры получают возможность настраивать пропускную способность в соответствии с требованиями клиента и успешно добавлять или удалять устройства ONU без вмешательства в общую систему. То есть, в будущем внедрение систем WDM PON принесет реальные преимущества операторам при незначительных затратах.

Отдельные разновидности PON имеют свои преимущества и недостатки, но в целом BPON, основанный на платформе ATM, уже не обеспечивает высокую скорость передачи и практически не имеет перспектив. Технология GPON является более удачной для сетей большой протяженности и емкости. Базовая платформа SDH обеспечивает хорошую защиту информации в сети, широкую полосу пропускания и другие преимущества. Однако более сложное и дорогостоящее оборудование хорошо окупается при высокой степени загрузки.

В GEAPON, в отличие от GPON, отсутствуют специфические функции поддержки TDM, синхронизации и защитных переключений, что делает эту технологию самой экономичной из всего семейства. Особенно это касается небольших операторов, ориентированных на IP-трафик, а впоследствии и IPTV. К тому же предполагается дальнейшее развитие этого ряда – 10GEAPON (по аналогии с 10 Gb Ethernet). Поэтому из-за наилучшего соотношения цена/качество при среднем размере сети, в нашей стране вариант GEAPON получил наибольшее распространение (Табл. 2).

Технология PON имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- невысокая стоимость построения сети;
- экономия оптико-волоконного кабеля на участке;
- низкие расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание сети;
- возможность постепенного наращивания сети;

- перспективность создания распределительной инфраструктуры, обеспечивающей в будущем развитие любых мультимедийных услуг с практически неограниченной полосой пропускания;

- высокая надежность за счет использования пассивного оборудования.

Таблица 2 – Сравнительная таблица по характеристикам стандартов PON

Характеристики	APON (BPON)	EPON (GEPON)	GPON
Институты стандартизации / альянсы	ITU-T SG15 / FSAN	IEEE / EFMA	ITU-T SG15 / FSAN
Дата принятия стандарта	октябрь 1998	июль 2004	октябрь 2003
Стандарт	ITU-T G.981.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Скорость передачи, прямой/обратный поток, Мбит/с	155/155 622/155 622/622	1000/1000	1244/155, 622, 1244 2488/622, 1244, 2488
Базовый протокол	ATM	Ethernet	SDH (GFP)
Линейный код	NRZ	8B/10B	NRZ
Максимальный радиус сети, км	20	20 (>30 ¹)	20
Максимальное число абонентских узлов на одно волокно	32	16	64 (128 ²)
Приложения	любые	IP, данные	любые
Коррекция ошибок FEC	предусмотрена	нет	необходима
Длины волн прямого/обратного потоков, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/13103)	1550/1310 (1480/1310)
Динамическое распределение полосы	есть	поддержка ⁴	есть
IP-фрагментация	есть	нет	есть
Защита данных	шифрование открытыми ключами	нет	шифрование открытыми ключами
Резервирование	есть	нет	есть
Оценка поддержки голосовых приложений и QoS	высокая	низкая	высокая
Динамический диапазон, дБ:			
– класс А	5-20		5-20
– класс В	10-25		10-25
– класс С	15-30		15-30
Интерфейс PX-10 (10 км)		5-20	
Интерфейс PX-20 (20 км)		10-24	

Примечания:

¹ - обсуждается в проекте;

² - стандарт допускает наращивание сети до 128 ONT;

³ - допускается передача в прямом и обратном направлении на одной и той же длине волны;

⁴ - осуществляется на более высоких уровнях.

Отметим типовые проблемные вопросы, с которыми сталкиваются провайдеры, при развертывании пассивной оптической сети PON.

Общая полоса пропускания. Полоса пропускания в дереве оптоволоконных линий сети PON используется как можно большим числом абонентов. Хотя технология GPON обеспечивает общую пропускную способность нисходящего потока, равную 2,5 Гбит/с, она не может соответствовать росту будущих требований абонентов в долгосрочной перспективе, поскольку потребности в пропускной способности растут экспоненциально. Особенно, если некоторую часть полосы пропускания необходимо резервировать для потоковых услуг (например, IPTV).

Шифрование. Поскольку PON — это технология с общей средой передачи, то необходимо шифрование всех потоков данных. В технологии GPON проводится шифрование AES с 256-разрядными ключами только нисходящего потока. Однако использование стандарта AES снижает производительность сети, т.к. для при шифровании необходима передача существенного объема служебной информации вместе с каждым пакетом.

Высокая рабочая скорость оконечных устройств. В связи с использованием в пассивных оптических сетях PON общей передающей среды, каждое оконечное устройство (ONT или OLT) вынуждено работать на единой максимальной скорости передачи данных. Даже если абоненту необходима скорость 25 Мбит/с, каждая конечная точка оптической сети (ONT) в дереве PON должна работать на скорости стандарта (2,5 Гбит/с для GPON). Работа электронных и оптических устройств со скоростью, в 100 раз превышающей необходимую скорость передачи данных, повышает цену компонентов.

Необходимость большей мощности оптического сигнала. При каждом разветвлении в соотношении 1:2 энергетический потенциал линии связи падает на 3,4 дБ. Следовательно, при разветвлении в соотношении 1:64 энергетический потенциал линии связи уменьшается на 20,4 дБ (эквивалентно отношению мощностей 110). В этом случае, все оптические передатчики должны обеспечивать в 110 раз большую мощность оптического сигнала по сравнению с архитектурой FTTH «точка-точка» при передаче на то же расстояние.

Доступ к абонентским линиям. Отделение абонентских линий (Local Loop Unbundling (LLU) — это метод, применяемый в сетях операторов телефонии для обеспечения доступа альтернативным операторам к абонентским медным линиям связи. Сети PON пока не удовлетворяют требованиям LLU, поскольку имеется только одна оптоволоконная линия для подключения группы абонентов, которая, следовательно, не может быть разделена на физическом уровне, а только на логическом уровне. Эта особенность пассивной оптической сети на базе PON предполагает массовую продажу услуг основного оператора без предоставления прямого абонентского доступа посредством отделения абонентских линий (LLU).

Неоптимальное использование ресурса сети. Обычно при развертывании сети FTTH выполняется одновременное подключение оптоволоконных линий связи для всех потенциальных абонентов в данном районе. Абоненты могут подписаться на сервис FTTH только после развертывания всех оптоволоконных линий. При развертывании услуг для частных абонентов провайдеры редко достигают 100 % подписки. Обычно этот показатель близок к 30%, что означает, что часть структуры PON простаивает, а сеть в целом используется не оптимально.

Сложность обслуживания, поиска и устранения неисправностей. Пассивные оптические разветвители не могут передавать информацию о неисправностях в центр управления сетью. Поэтому сложно обнаружить неисправность оптоволоконной линии между разветвителем и точкой терминирования оптической сети (ONT) абонента. Это значительно усложняет поиск и устранение неисправностей в сетях PON и повышает затраты на их эксплуатацию. Так же при повреждении точки терминирования оптической сети (ONT) она может передавать в дерево оптоволоконных линий постоянный световой сигнал, что приводит к нарушению связи для всех абонентов этой сети, причем найти поврежденное устройство очень трудно.

Вместе с тем указанные проблемные вопросы не являются критичными и по мнению многих аналитиков, рынок систем PON будет поступательно развиваться в течение ближайших трех-четырех лет, после чего начнется массовое внедрение систем в жилищном секторе.

Пример использования технологии PON для разворачивания телекоммуникационной сети в коттеджном поселке приведен на рисунке 6.

В решении Ethernet FTTH для коммутации линий подразумевается использование коммутаторов с оптическими портами или оптическими трансиверами.

В основе первых европейских проектов сетей Ethernet FTTH лежала архитектура, при которой коммутаторы, расположенные на цокольных этажах многоквартирных домов, были объединены в кольцо по технологии Gigabit Ethernet. Кольцевая структура обеспечивала прекрасную устойчивость к различного рода повреждениям кабеля и была

весьма рентабельной, но к ее недостаткам можно было отнести разделение полосы пропускания внутри

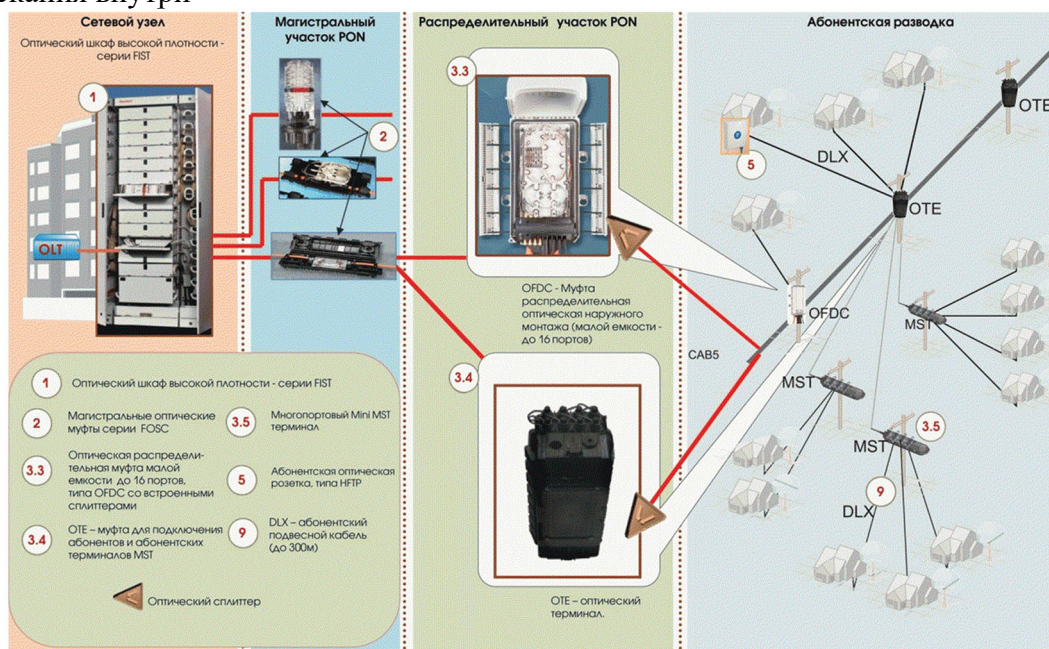


Рис. 6. Пример использования технологии PON для разворачивания телекоммуникационной сети в коттеджном поселке

каждого кольца доступа (1 Гбит/с), что давало в перспективе сравнительно небольшую пропускную способность, а также вызывало трудности масштабирования архитектуры.

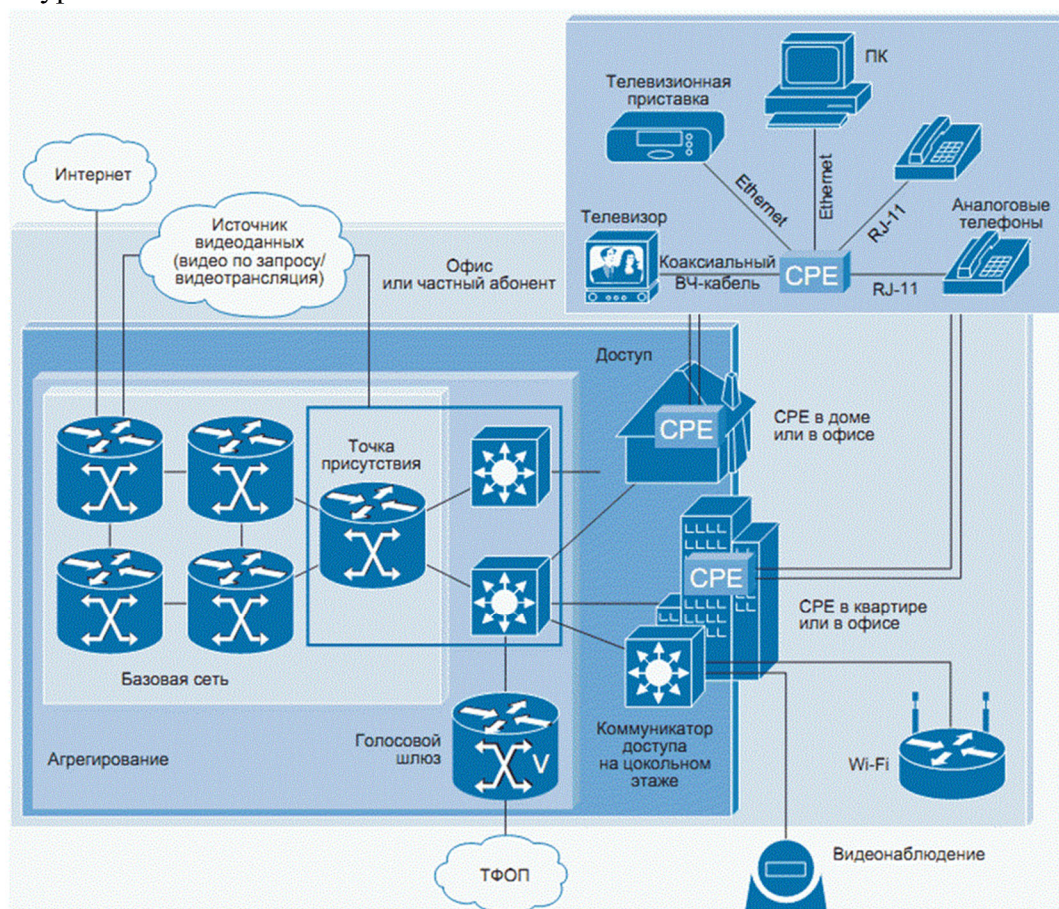


Рис. 7. Архитектура сети Ethernet FTTH типа «звезда»

Затем широкое распространение получила архитектура Ethernet типа «звезда» (Рис. 7). Такая архитектура предполагает наличие выделенных оптоволоконных линий (обычно одномодовых, одноволоконных линий с передачей данных Ethernet по технологии 100BX или 1000BX) от каждого оконечного устройства к точке присутствия (point of presence, POP), где происходит их подключение к коммутатору. К портам коммутатора подключаются устройства конечных пользователей. Такой подход обеспечивает высокий уровень надежности за счет возможности резервирования оптических каналов, и обеспечивает преимущество с существующей «медной» инфраструктурой.

Рассмотрим преимущества решений Ethernet FTTH перед архитектурой на базе PON. Практически неограниченная дискретная полоса пропускания. Оптоволоконная линия может обеспечить практически неограниченную полосу пропускания, что позволяет достичь максимальной гибкости в наращивании предоставляемых сервисов в будущем, когда потребность в пропускной способности возрастет. Архитектура Ethernet FTTH позволяет провайдеру гарантировать каждому абоненту необходимую пропускную способность и создавать в сети индивидуальные профили полосы пропускания для каждого клиента. Большой радиус действия. В типовых конфигурациях сетей доступа Ethernet FTTH применяются недорогие одноволоконные линии, использующие технологию 100BX или 1000BX, с заданным максимальным радиусом действия 10 км. Для работы на больших расстояниях имеются оптические модули, позволяющие увеличить мощность оптического сигнала, а также оптоволоконные пары с оптическими модулями, которые можно подключить к порту любого Ethernet-оборудования. Гибкое масштабирование сети. В случае появления новых абонентов можно добавить дополнительные карты Ethernet с высокой степенью модульности. Напротив, при использовании архитектуры на базе PON подключение первого абонента к оптическому дереву требует наличия наиболее дорогостоящего порта OLT, а при добавлении абонентов к тому же дереву PON стоимость подключения каждого абонента только увеличивается за счет приобретения ONT. Технологическая независимость оптико-волоконного канала. Хотя текущие конфигурации Ethernet FTTH могут использовать технологию Gigabit Ethernet, она может стать неактуальной в течение последующих 30-40 лет. Однако одномодовая оптоволоконная линия является средой, способной поддерживать любую новую технологию передачи. В отдельных случаях для подключения корпоративных абонентов используются оптоволоконные технологии, например SONET/SDH или Fibre Channel. Эти технологии могут быть легко развернуты по тем же оптоволоконным линиям, что и Ethernet FTTH, с использованием той же Ethernet-платформы агрегирования. Гибкое масштабирование скорости обслуживания абонентов. Поскольку одномодовые оптоволоконные линии не зависят от используемой технологии и скорости передачи данных, можно легко увеличить скорость для одного абонента, не влияя на работу других. Это означает, что абонент, использующий технологию Fast Ethernet, может перейти на Gigabit Ethernet за счет переключения оптоволоконной линии абонента на другой порт коммутатора и замены только Ethernet-устройства абонента. Отделение абонентских линий — это свойство, присущее архитектурам Ethernet FTTH. Реализация принципа отделения абонентских линий явилась главным критерием выбора технологии FTTH некоторыми компаниями в Европе, поскольку они стремились построить сети, где доступ к инфраструктуре оптоволоконной сети доступа могли бы иметь несколько провайдеров. Безопасность обеспечивается за счет того, что выделенная оптоволоконная линия является защищенной средой на физическом уровне. Кроме того, коммутаторы Ethernet, используемые у провайдеров, призваны обеспечить разделение физического уровня портов и логического уровня абонентов и имеют функции защиты, которые в состоянии предотвратить попытки вторжений.

К недостаткам Ethernet FTTH можно отнести узкую полосу пропускания и недостаточные возможности масштабирования телекоммуникационного ресурса.

При тестировании сети PON оператора обычно волнуют два основных вопроса:

1. Реальное затухание в оптической линии между центральным узлом и абонентским устройством (действующим или готовящимся к подключению).

2. Местоположение проблемного участка, если реальное затухание в линии оказалось выше ожидаемого (расчетного или опорного).

Для ответа на первый вопрос достаточно провести простые измерения с помощью оптического тестера. Второй вопрос более сложен и требует применения оптического рефлектометра (OTDR), а также определенного опыта расшифровки рефлектограмм.

Как правило, желательно, чтобы все необходимые измерения могли проводиться на работающей сети PON без отключения абонентов (кроме, возможно, тестируемого). Такое тестирование осуществляется на нерабочей длине волны с применением дополнительных устройств (волновых мультиплексоров DWDM, фильтров), чтобы излучение измерительной аппаратуры не вносило помех в полезный сигнал. Как уже упоминалось, в сети PON для прямого канала (от центра к абонентам) используется длина волны 1490 или 1550 нм (для видео), для обратного – 1310 нм. Для тестирования сети PON обычно используют длину волны 1625 нм.

Излучение измерительной аппаратуры (тестера, рефлектометра) вводится в волокно сразу после OLT с использованием волнового мультиплексора (DWDM). Это излучение способно вызвать помехи на оптическом приемнике абонентского устройства, поэтому перед каждым абонентским устройством ONT необходимо установить фильтр. Для того чтобы можно было проводить тестирование без отключения сети, волновой мультиплексор и фильтры должны быть стационарно включены в оптический тракт, (Рис. 8).

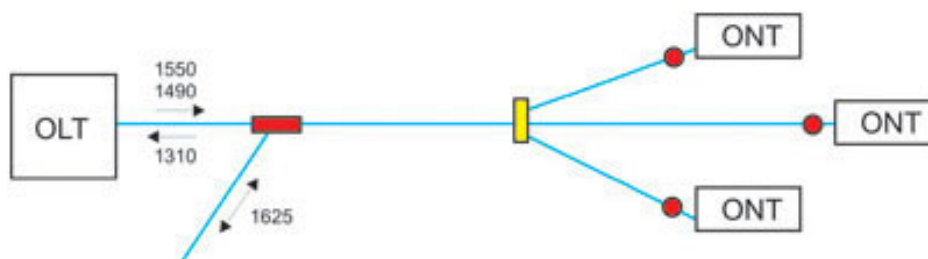


Рис. 8. Схема подключения волнового мультиплексора и фильтров к PON

Для измерения затухания в оптической линии между OLT и ONT используется оптический тестер на 1625 нм. Передатчик тестера подключается к свободному концу волнового мультиплексора на OLT. Приемник тестера подключается к свободному концу волокна перед фильтром, (Рис. 9).

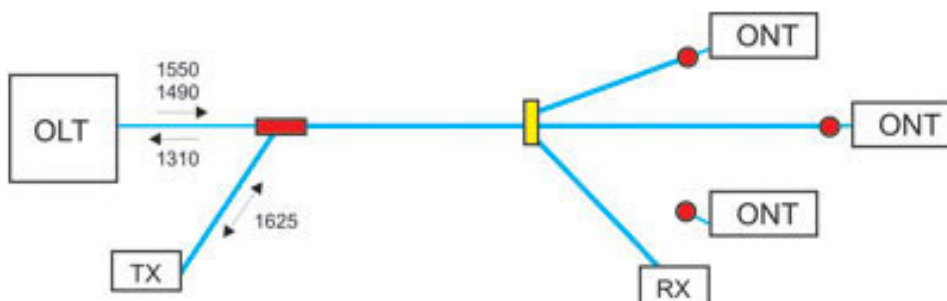


Рис. 9. Измерение затухания с отключением абонентского устройства

Можно измерять затухание и без отключения абонентского устройства. Для этого на ONT нужно использовать не фильтр, а волновой мультиплексор, как на центральном узле, (Рис. 10).

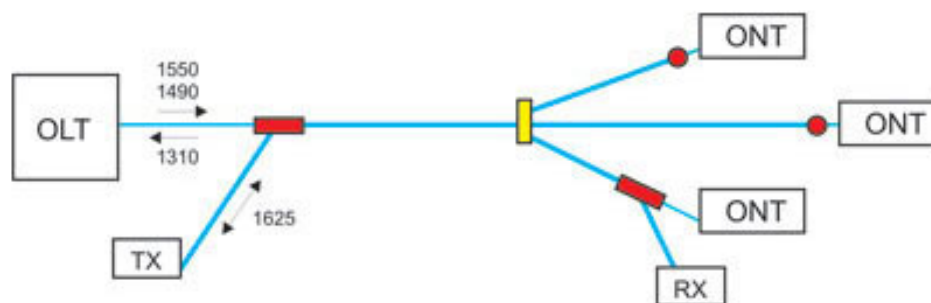


Рис. 10. Измерение затухания без отключения абонентского устройства

Затухание на длине волны 1625 нм несколько выше, чем на 1550 и 1490 нм (в среднем на 10 %). Поэтому тестирование затухания на длине волны 1625 нм дает оценку сверху для затухания на рабочих длинах волн. Если эта оценка укладывается в допустимый бюджет (23 дБ), то затухание на рабочих длинах волн заведомо удовлетворяет требованиям по бюджету. Если затухание на длине волны 1625 нм превышает допустимое значение, то для точного определения затухания на рабочих длинах волн необходимо провести перерасчет на основе паспорта оптического кабеля.

Измерение в PON с помощью оптического тестера позволяет получить реальное значение затухания на участке от OLT до ONT, но не дает ответа на вопрос, где находится проблемный участок, если это затухание оказалось выше ожидаемого (расчетного или опорного). Для локализации проблемного участка используется более сложное устройство – оптический рефлектометр (OTDR).

Рефлектометр с тестовым модулем на 1625 нм подключается к свободному концу волнового мультиплексора на OLT, (Рис. 11).

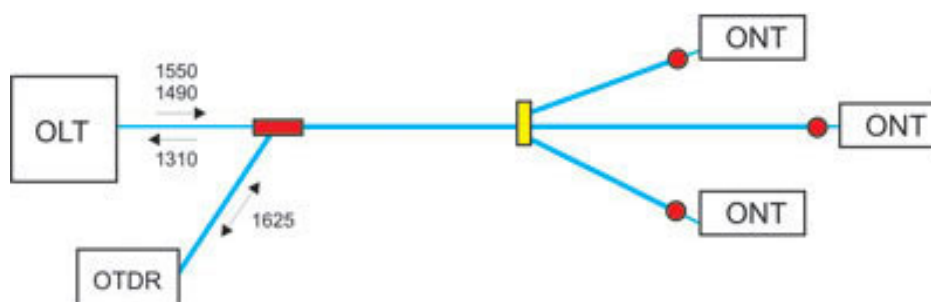
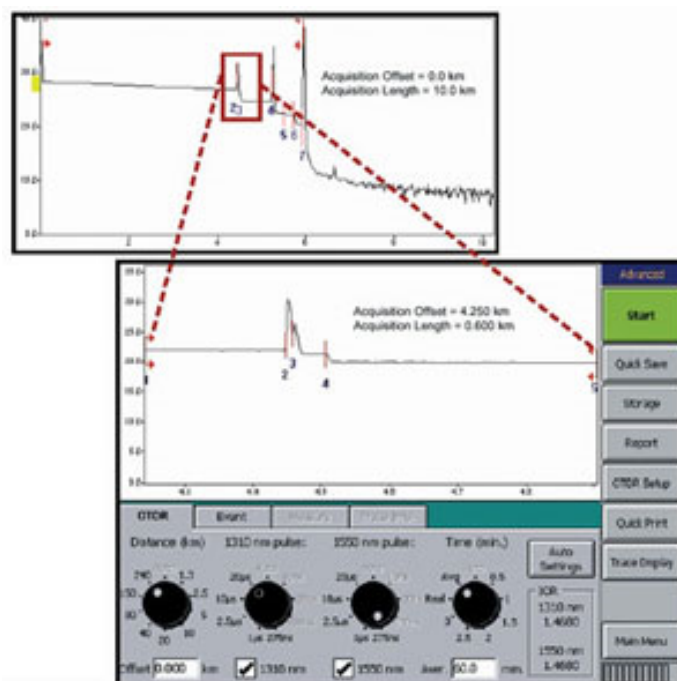


Рис. 11. Снятие рефлектограммы дерева PON

Излучение рефлектометра распространяется по дереву PON и за счет отражения на препятствиях и обратного рассеивания в оптическом волокне частично поступает обратно на вход рефлектометра. Таким образом, снимается рефлектограмма дерева PON – график затухания в линии в зависимости от расстояния. Каждый пик или скачок затухания на этом графике соответствует определенному элементу сети, либо событию в волокне.

Методика тестирования сети PON с использованием рефлектометра заключается в следующем. После каждого изменения топологии сети (подключения нового абонента, замены сплиттера и т.п.) снимается опорная (эталонная) рефлектограмма, соответствующая нормальному состоянию сети. При обнаружении проблем в сети (например, если затухание, измеренное оптическим тестером, оказалось выше расчетного) снимается новая рефлектограмма, которая сравнивается с опорной. Новые события на рефлектограмме локализуют местоположение проблемного участка, (Рис. 12).



Затухание:
 0.4 дБ/км,
 0.5 дБ на коннектор
 0.03 дБ на
 точку сварки
 3.5 дБ на
 сплиттер 1:2
 7.2 дБ на
 сплиттер 1:4
 10.7 дБ на
 сплиттер 1:8
 14.4 дБ на
 сплиттер 1:16

Рис. 12. Анализ новых событий на рефлектограмме.

С помощью рефлектометра можно вести мониторинг сети PON и обнаруживать деградации волокна еще до того, как возникнут проблемы. Для этого необходимо регулярно (например, раз в неделю) снимать рефлектограмму сети и сравнивать ее с опорной рефлектограммой. При появлении любых отклонений и тем более новых событий на рефлектограмме необходимо анализировать их возможные причины и при необходимости проводить адекватные профилактические мероприятия.

Основные преимущества технологии PON:

1. Экономия волокон. До 128 абонентов на одно волокно, протяженность сети до 60 км.
2. Эффективное использование полосы пропускания оптического волокна.
3. Скорость до 2,488 Гбит/с по нисходящему потоку и 1,244 Гбит/с по восходящему.
4. Надежность. В промежуточных узлах дерева находятся только пассивные оптические разветвители, не требующие обслуживания.
5. Масштабируемость. Древовидная структура сети доступа дает возможность подключать новых абонентов самым экономичным способом.
6. Возможность резервирования как всех, так и отдельных абонентов.
7. Гибкость. Использование ATM в качестве транспорта позволяет предоставлять абонентам именно тот уровень сервиса, который им требуется.
8. Данные по сети передаются в виде ячеек ATM.
9. Возможны симметричный и асимметричный режимы работы.

В процессе строительства сетей FTTx PON необходимо выполнять четыре основных измерения:

- однонаправленное измерение потерь в кабельной секции перед сваркой;
- двунаправленное измерение оптических возвратных потерь (ORL);
- двунаправленное измерение оптических потерь между двумя оконечными точками;
- двунаправленное снятие характеристик линии;
- снятие рефлектограммы каждого участка оптической линии, включая сплиттеры.

В процессе ввода в эксплуатацию сетей FTTx PON необходимо выполнять два основных измерения:

- измерение оптической мощности на выходе OLT;
- измерение оптической мощности прямого и обратного потоков ветви сети PON при добавлении каждого нового ONT.

Заключение.

В ходе исследования сетей пассивного оптического доступа (PON) с архитектурой FTTH была проведена комплексная работа, включающая теоретический анализ, экспериментальные измерения и моделирование. Цели исследования заключались в изучении особенностей построения PON, выявлении преимуществ и ограничений различных архитектур, оценке качества передачи данных и выработке рекомендаций по оптимизации сетей FTTH. Для достижения этих целей были использованы аналитический, сравнительный и экспериментальный методы, а также моделирование и анализ архивных материалов (Скляров и др., 2013: 110–116; Никульский, 2013: 49–50).

Проведенный анализ литературы и технических стандартов PON позволил систематизировать существующие подходы к построению оптических сетей, выявить ключевые параметры и требования к оборудованию, а также определить актуальные направления развития технологий широкополосного доступа. В частности, рассмотрены архитектуры GPON, EPON и WDM PON, их возможности по числу абонентов, дальности передачи и пропускной способности (Гольдштейн, 2013: 67–69; Комашинский и др., 2013).

Экспериментальная часть исследования, включавшая измерение параметров оптических линий с помощью OTDR и тестеров, позволила оценить реальное состояние сетей и выявить проблемные участки, влияющие на качество передачи данных. Результаты показали, что при соблюдении стандартов установки и эксплуатации PON достигается высокая надежность и стабильность работы сети, а применение современных методов тестирования обеспечивает своевременное выявление и устранение неисправностей.

В результате проведенного исследования подтверждена гипотеза о том, что правильная организация сети PON с учетом технических стандартов и использования современных методов контроля качества обеспечивает эффективное и надежное предоставление широкополосного доступа абонентам. Полученные результаты позволяют обобщить текущие знания о сетях PON и сделать вывод о целесообразности внедрения FTTH в городских и пригородных условиях, где требуется высокая пропускная способность и надежность передачи данных (Никульский, 2013: 49–50).

Практическое значение работы заключается в возможности применения предложенных рекомендаций при проектировании и модернизации сетей PON. В частности, результаты исследования могут быть использованы для выбора оптимальной архитектуры сети, планирования разветвлений, расчета нагрузки на оборудование и определения методов мониторинга качества линии. Это обеспечивает повышение эффективности эксплуатации сети и сокращение времени на обслуживание.

Перспективы дальнейшей работы связаны с интеграцией технологий PON с новыми стандартами передачи данных, включая 10G-PON и NG-PON2, а также с применением интеллектуальных методов мониторинга и анализа сети на основе больших данных и алгоритмов искусственного интеллекта. Также важным направлением является изучение экономической эффективности внедрения PON в различных регионах с учетом плотности населения, требований к качеству услуг и стоимости оборудования.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод, что сети PON FTTH являются перспективным решением для обеспечения широкополосного доступа и стабильной передачи данных. Реализация целей и методов исследования подтвердила истинность выдвинутого тезиса, а полученные результаты способствуют расширению научного знания в области телекоммуникаций и создают основу для практического применения и дальнейших исследований в этой сфере.

ЛИТЕРАТУРА

- Гольдштейн, 2013 — А.Б. Гольдштейн, Н.А. Соколов. Подводная часть айсберга по имени NGN // Технологии и средства связи. — 2013. — № 1. — С. 67–69. [Russ.]
- Никульский, И.Е., 2013 — И.Е. Никульский. Модель оптической сети доступа GPON // Вестник связи. — 2013. — № 2. — С. 49–50. [Russ.]
- Скляр, 2013 — О.К. Скляр, Е.А. Заркевич, С.А. Устинов. Волоконно-оптические технологии как основа развития широкополосных сетей доступа // Технологии и средства связи. — 2013. — № 3. — С. 110–116. [Russ.]
- Комашинский, 2013 — В.И. Комашинский, И.Е. Никульский, О.А. Степуленок. Горизонты WDM-PON // Вестник связи. — 2013. — № 9. — С. 34–38. [Russ.]
- Петренко, 2013 — И.И. Петренко, Р.Р. Убайдуллаев. Пассивные оптические сети PON. Часть 3. Проектирование оптимальных сетей // LIGHTWAVE RUSSIAN EDITION. — 2013. — № 3. — С. 12–15. [Russ.]
- Бубличенко, 2013 — Н.С. Бубличенко. Широкополосный доступ в рамках архитектуры FTТх: эффективные решения компании // Первая миля (журнал "СТР"). — 2013. — № 5. — С. 110–116. [Russ.]
- Горнак, 2013 — А.В. Горнак. Новые горизонты PON // Технологии и средства связи. — 2013. — № 4. — С. 220–225. [Russ.]
- Никитин, 2014 — А.В. Никитин, В.О. Пяттаев, И.Е. Никульский, А.А. Филиппов. Концепция построения мультисервисной сети оператора связи // Вестник связи. — 2014. — № 5. — С. 47–49. [Russ.]
- Никульский, 2014 — И.Е. Никульский. Технологии PON: вчера, сегодня, завтра // Вестник связи. — 2014. — № 3. — С. 23–27. [Russ.]
- Долотов, 2014 — Д.В. Долотов. Оптические технологии в сетях доступа // Технологии и средства связи, спецвыпуск «Системы абонентского доступа». — 2014. — С. 67–73. [Russ.]
- Гаскевич, 2014 — Е.И. Гаскевич. Оптические сети многоэтажного дома. Ключевые характеристики и определения для кабельной подсистемы // Технологии и средства связи. — 2014. — № 3. — С. 80–86. [Russ.]
- Алексеев, 2014 — Е.Б. Алексеев, О.К. Скляр, С.А. Устинов. Спектральное уплотнение оптических каналов в современных ВОСП // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. — 2014. — № 1. — С. 88. [Russ.]
- Алексеев, 2015 — Е.Б. Алексеев, И.А. Булавкин, А.Г. Попов, В.И. Попов. Пассивные волоконно-оптические сети. Проектирование, оптимизация и обнаружение несанкционированного доступа // Технологии и средства связи. — 2015. — № 3. — С. 56–60. [Russ.]

REFERENCES

- Goldshtein, 2013 — Goldshtein, A.B., Sokolov, N.A. (2013). Podvodnaya chast' aysberga po imeni NGN // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2013. — № 1. — Pp. 67–69. [in Russ.]
- Nikul'skiy, 2013 — Nikul'skiy, I.E. (2013). Model' opticheskoy seti dostupa GPON // Vestnik svyazi. — 2013. — № 2. — Pp. 49–50. [in Russ.]
- Sklyarov, 2013 — O.K. Sklyarov, E.A. Zarkevich, S.A. Ustinov. Volokonno-opticheskie tekhnologii kak osnova razvitiya shirokopolosnykh setey dostupa // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2013. — № 3. — Pp. 110–116. [in Russ.]
- Komashinskiy, 2013 — V.I. Komashinskiy, I.E. Nikul'skiy, O.A. Stepulenok. Gorizonty WDM-PON // Vestnik svyazi. — 2013. — № 9. — Pp. 34–38. [in Russ.]
- Petrenko, 2013 — I.I. Petrenko, P.P. Ubaydullaev. Passivnye opticheskie seti PON. Chast' 3. Proektirovanie optimal'nykh setey // LIGHTWAVE RUSSIAN EDITION. — 2013. — № 3. — Pp. 12–15. [in Russ.]
- Bublichenko, 2013 — N.S. Bublichenko. Shirokopolosnyy dostup v ramkakh arkhitektury FTТх: effektivnye resheniya kompanii // Pervaya mile (zhurnal "STR"). — 2013. — № 5. — Pp. 110–116. [in Russ.]
- Gornak, 2013 — A.V. Gornak. Novye gorizonty PON // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2013. — № 4. — Pp. 220–225. [in Russ.]
- Nikitin, 2014 — Nikitin, A.V., Pyattaev, V.O., Nikul'skiy, I.E., Filippov, A.A. (2014). Kontseptsiya postroyeniya multiservisnoy seti operatora svyazi // Vestnik svyazi. — 2014. — № 5. — Pp. 47–49. [in Russ.]
- Nikul'skiy, 2014 — I.E. Nikul'skiy. Tekhnologii PON: vchera, segodnya, zavtra // Vestnik svyazi. — 2014. — № 3. — Pp. 23–27. [in Russ.]
- Dolotov, 2014 — D.V. Dolotov. Opticheskie tekhnologii v setyakh dostupa // Tekhnologii i sredstva svyazi, spetsvypusk «Sistemy abonentskogo dostupa». — 2014. — Pp. 67–73. [in Russ.]
- Gaskevich, 2014 — E.I. Gaskevich. Opticheskie seti mnogoetazhnogo doma. Klyuchevye kharakteristiki i opredeleniya dlya kabel'noy podsistemy // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2014. — № 3. — Pp. 80–86. [in Russ.]
- Alekseev, 2014 — E.B. Alekseev, O.K. Sklyarov, S.A. Ustinov. Spektral'noe uplotnenie opticheskikh kanalov v sovremennykh VOSP // FOTON-EKSPRESS. — 2014. — № 1. — P. 88. [in Russ.]
- Alekseev, 2015 — E.B. Alekseev, I.A. Bulavkin, A.G. Popov, V.I. Popov. Passivnye volokonno-opticheskie seti. Proektirovanie, optimizatsiya i obnaruzhenie nesanksionirovannogo dostupa // Tekhnologii i sredstva svyazi. — 2015. — № 3. — Pp. 56–60. [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 16.06.2026. Формат 60x84 1/8. Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс» .
Печать RISO. Объем 14,4 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.