

**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 №3(91)

июль - сентябрь

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

B. Antonov INTERNATIONAL PRACTICES IN THE DIGITAL AUTOMATION OF RAILWAY TRACTION POWER SYSTEMS	7
A.A. Askarov VOLTAGE REGULATION AND REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRIFIED RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEMS: ANALYSIS, MODERN SOLUTIONS, AND AUTOMATION PROSPECTS	19
N.N. Alimbaev, A.O. Oralbekova AUTOMATIC STRAY CURRENT MONITORING IN THE POWER SUPPLY CONTROL SYSTEM OF A DC RAILWAY SECTION: A COMPUTATIONAL ASSESSMENT	31
D.A. Yessenaliyeva AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR TRACTION POWER SUPPLY NETWORKS ON RAILWAY LINES: STRAY CURRENT MANAGEMENT, ELECTROCORROSION MITIGATION, AND INDUSTRY 4.0 INTEGRATION	42

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Y. Bagdollauly OBSTACLE DETECTION ON RAILWAY TRACKS FROM UAV IMAGERY: A LEAKAGE-AWARE EVALUATION	54
A. Omirgazyrov CYBER-RESILIENCE MODEL FOR DISTRIBUTED INDUSTRIAL TRANSPORT INFORMATION SYSTEMS	65
S. Sailaubaiuly IIoT-BASED FAULT DETECTION IN A RAIL VEHICLE AIR COMPRESSOR	78
Fernández I. Plazaola A BIM-DIGITAL TWIN ARCHITECTURE FOR CONSTRUCTION AND INDUSTRIAL TRANSPORT LOGISTICS: TRANSFERABILITY FROM SPAIN TO KAZAKHSTAN	90

МАЗМҰНЫ

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ

Б.А. Антонов ТЕМІРЖОЛДЫҢ ТАРТЫМДЫҚ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІН ЦИФРЛЫҚ АВТОМАТТАНДЫРУДЫҢ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТӘЖІРИБЕСІ	7
А.А. Асқаров ЭЛЕКТРЛЕНДІРІЛГЕН ТЕМІРЖОЛ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ КЕРНЕУДІ РЕТТЕУ ЖӘНЕ РЕАКТИВТІ ҚУАТТЫ ӨТЕУ: ТАЛДАУ, ЗАМАНАУИ ШЕШІМДЕР ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ	19
Н.Н. Әлімбаев, А.О. Оралбекова ТҮРАҚТЫ ТОК ТЕМІР ЖОЛ УЧАСКЕСІНІҢ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУЫН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНДЕ АДАСҚАН ТОКТАРДЫ АВТОМАТТЫ БАҚЫЛАУ: ЕСЕПТІК БАҒАЛАУ	31
Д.А. Есеналиева ТЕМІРЖОЛ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ ТАРТУ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІ: КЕЗБЕ ТОКТАРДЫ БАСҚАРУ, ЭЛЕКТРОКОРРОЗИЯНЫ АЗАЙТУ ЖӘНЕ INDUSTRY 4.0 ИНТЕГРАЦИЯСЫ	42

ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

Е. Бағдоллаұлы ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТЫ ТҮСІРГЕН КЕСКІНДЕР БОЙЫНША ТЕМІРЖОЛ ЖОЛЫНДАҒЫ КЕДЕРГІЛЕРДІ АНЫҚТАУ: ДЕРЕКТЕРДІҢ АҒЫП КЕТУІН ЕСКЕРЕТІН БАҒАЛАУ	54
А.А. Өмірғазынов ӨНЕРКӘСІПТІК КӨЛІКТІҢ ҮЛЕСТІРІЛГЕН АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕСІНІҢ КИБЕРТҮРАҚТЫЛЫҚ МОДЕЛІ	65
С. Сайлаубайұлы IIoT ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША РЕЛЬСТІК КӨЛІК КОМПРЕССОРЫНЫҢ АҚАУЛАРЫН АНЫҚТАУ	78
И. Фернандес Плазаола ҚҰРЫЛЫС ЖӘНЕ ӨНЕРКӘСІПТІК КӨЛІК ЛОГИСТИКАСЫНА АРНАЛҒАН BIM МЕН ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ АРХИТЕКТУРАСЫ: ИСПАНИЯ ТӘЖІРИБЕСІН ҚАЗАҚСТАНҒА КӨШІРУ	90

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА

Б.А. Антонов МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	7
А.А. Аскаров РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: АНАЛИЗ, СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ	19
Н.Н. Әлімбаев, А.О. Оралбекова АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА: РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА	31
Д.А. Есеналиева АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ СЕТЯМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: УПРАВЛЕНИЕ БЛУЖДАЮЩИМИ ТОКАМИ, СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ И ИНТЕГРАЦИЯ INDUSTRY 4.0	42

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Е. Бағдоллаұлы ОБНАРУЖЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПУТИ ПО СНИМКАМ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА: ОЦЕНКА С УЧЁТОМ УТЕЧКИ ДАННЫХ	54
А.А. Өмірғазынов МОДЕЛЬ КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА	65
С. Сайлаубайұлы ОБНАРУЖЕНИЕ ОТКАЗОВ КОМПРЕССОРА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПО ДАННЫМ IoT	78
И. Фернандес Плазола АРХИТЕКТУРА BIM И ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ И ПРОМЫШЛЕННО-ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ: ПЕРЕНОС ОПЫТА ИСПАНИИ В КАЗАХСТАН	90

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. 3. Number 91 (2026). Pp. 07–18
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.001>
UDC / УДК / ЭОЖ: 621.331:681.5

INTERNATIONAL PRACTICES IN THE DIGITAL AUTOMATION OF RAILWAY TRACTION POWER SYSTEMS

*B. Antonov**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: antonovbaurzhan@gmail.com.

Bauyrzhan Antonov — PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: antonovbaurzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3933-4801>.

© B. Antonov

Abstract. Digital automation of railway traction power supply is promoted as a way to reduce energy use and improve supply quality, but the evidence behind reported benefits is heterogeneous: measured results, pilot data, simulations, manufacturer claims and policy targets are often cited together. The aim was to compare international practices in the digital automation of traction power systems critically and to assess the conditions for their transfer to Kazakhstan. A structured scoping review reported according to PRISMA-ScR was combined with a comparative multiple-case analysis. OpenAlex was searched on 10 October 2026 (2016–2026) with five strings, supplemented by operator and agency sources. 292 unique records were screened in two independent passes (Cohen’s kappa 0.70); 56 studies were included, together with 7 documents from other sources. Only 10 studies reported field implementation or field experiments, 46 relied on models or hardware-in-the-loop tests driven by measured data, and 41 used data from China; no field evidence on the cybersecurity of traction power control was found. Of six national cases, four (Spain, Japan, Russia, South Africa) report measured effects for reversible substations, wayside storage and protection data analytics; the Chinese field experiments are not quantified, the Swiss case reports no outcome, and evidence on flexible traction substations and digital twins is mainly model-based. The novelty is an explicit evidence hierarchy combined with a criteria-based transferability assessment for Kazakhstan; a proposed six-stage framework can guide pilot selection on KTZ lines. The main limitation is the use of one open index, with most studies assessed at abstract level.

Keywords: railway traction power supply; digital automation; regenerative braking; energy storage; SCADA; scoping review; Kazakhstan

For citation: Antonov B. (2026). International Practices in the Digital Automation of Railway Traction Power Systems // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 07–18. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.001> (In Eng.).

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



ТЕМІРЖОЛДЫҢ ТАРТЫМДЫҚ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІН ЦИФРЛЫҚ АВТОМАТТАНДЫРУДЫҢ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТӘЖІРИБЕСІ

*Б.А. Антонов**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: antonovbaurzhan@gmail.com

Антонов Бауыржан Антонұлы — PhD докторанты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: antonovbaurzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3933-4801>.

© Б.А. Антонов

Аннотация. Теміржолдың тартымдық электрмен жабдықтауын цифрлық автоматтандыру энергия тұтынуды азайту және электрмен жабдықтау сапасын арттыру құралы ретінде ұсынылады, алайда жарияланған нәтижелердің дәлелдік негізі біркелкі емес: өлшемдер, пилоттық деректер, модельдеу, өндірушілердің мәлімдемелері және мақсатты көрсеткіштер жиі қатар келтіріледі. Зерттеудің мақсаты – тартымдық энергетикалық жүйелерді цифрлық автоматтандырудың халықаралық тәжірибесін анықтау, оны сыни тұрғыдан салыстыру және Қазақстанға көшіру шарттарын бағалау. PRISMA-ScR талаптарына сәйкес баяндалған құрылымдалған ауқымдық шолу (scoping review) бірнеше кейсті салыстырмалы талдаумен біріктірілді. 2026 жылғы 10 қазанда OpenAlex индексында (2016–2026) бес сұраныспен іздеу жүргізіліп, операторлар мен органдардың дереккөздерімен толықтырылды. 292 бірегей жазба екі тәуелсіз кезеңде іріктелді (Коэн каппасы 0,70); 56 зерттеу енгізілді, оларға басқа көздерден алынған 7 құжат қосылды. Тек 10 зерттеу далалық енгізу немесе далалық эксперимент нәтижелерін ұсынды, 46 зерттеу өлшенген деректерге негізделген модельдерге немесе HIL-сынақтарға сүйенді, 41 зерттеу Қытай деректерін пайдаланды; тартымдық электрмен жабдықтауды басқарудың киберқауіпсіздігі бойынша далалық деректер табылмады. Алты ұлттық кейстің төртеуі (Испания, Жапония, Ресей, Оңтүстік Африка) реверсивті қосалқы станциялар, стационарлық энергия жинақтау жүйелері және релелік қорғаныс деректерін талдау бойынша өлшенген әсерлерді көрсетеді; Қытайдағы далалық эксперименттердің әсері сандық түрде берілмеген, Швейцария кейсінде нәтиже жарияланбаған, ал икемді тартымдық қосалқы станциялар мен цифрлық егіздер бойынша дәлелдер негізінен модельдеуге сүйенеді. Жаңалығы – дәлелдердің айқын иерархиясы мен Қазақстан үшін критерийлерге негізделген көшіру мүмкіндігін бағалау; ұсынылған алты кезеңді шеңбер ҚТЖ желілерінде пилоттық учаскені таңдауға бағдар бола алады. Негізгі шектеу – бір ашық индекс пайдаланылды, зерттеулердің көпшілігі аннотация деңгейінде бағаланды.

Түйін сөздер: теміржолдың тартымдық электрмен жабдықтауы; цифрлық автоматтандыру; рекуперативтік тежеу; энергия жинақтау жүйесі; SCADA; ауқымдық шолу; Қазақстан

Дәйексөз үшін: Антонов Б.А. (2026). Теміржолдың тартымдық энергетикалық жүйелерін цифрлық автоматтандырудың халықаралық тәжірибесі // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 07–18 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.001> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Б.А. Антонов

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: antonovbaurzhan@gmail.com.

Антонов Бауыржан Антонович — докторант PhD, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

E-mail: antonovbaurzhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3933-4801>.

© Б.А. Антонов

Аннотация. Цифровая автоматизация тягового электроснабжения железных дорог рассматривается как способ снизить энергопотребление и повысить качество электроснабжения, однако доказательная база заявленных эффектов неоднородна: измерения, пилотные данные, моделирование, заявления производителей и целевые показатели нередко приводятся вместе. Цель исследования – выявить и критически сопоставить международную практику цифровой автоматизации тяговых энергетических систем и оценить условия её переноса в Казахстан. Структурированный скоупинг-обзор, оформленный по PRISMA-ScR, объединён со сравнительным анализом нескольких кейсов. Поиск в OpenAlex выполнен 10 октября 2026 г. (2016–2026 гг.) по пяти запросам и дополнен источниками операторов и ведомств. 292 уникальные записи отобраны в два независимых прохода (каппа Коэна 0,70); включены 56 исследований, к ним добавлены 7 документов из других источников. Лишь 10 исследований сообщают о полевом внедрении или полевых экспериментах, 46 основаны на моделях или НЛ-испытаниях с использованием измеренных данных, 41 использует данные Китая; полевых данных о кибербезопасности управления тяговым электроснабжением не обнаружено. Из шести национальных кейсов четыре (Испания, Япония, Россия, ЮАР) показывают измеренные эффекты для реверсивных подстанций, стационарных накопителей энергии и анализа данных релейной защиты; эффекты полевых экспериментов в Китае количественно не приведены, по Швейцарии результаты не опубликованы, а доказательства по гибким тяговым подстанциям и цифровым двойникам в основном модельные. Новизна состоит в явной иерархии доказательств и критериальной оценке переносимости для Казахстана; предложенная шестиэтапная схема может использоваться при выборе пилотного участка на линиях КТЖ. Основное ограничение – использован один открытый индекс, большинство исследований оценено на уровне аннотаций.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение железных дорог; цифровая автоматизация; рекуперативное торможение; накопители энергии; SCADA; скоупинг-обзор; Казахстан

Для цитирования: Антонов Б.А. (2026). Международный опыт цифровой автоматизации тяговых энергетических систем железнодорожного транспорта // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 07–18. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.001> (На англ.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

Railway traction power supply is changing from a passive, grid-fed infrastructure into an actively controlled energy system with storage, power-electronic converters and local generation (Li, 2026). The main technical driver is regenerative braking. Energy that cannot be absorbed by other trains or returned to the grid is dissipated in braking resistors (Khodaparastan et al., 2019:

2831–2847). Timetable coordination, on-board and wayside storage and reversible substations have been proposed to recover it (González-Gil et al., 2013: 374–388), and the choice of storage technology depends on whether it is installed on board or at the wayside (Domínguez et al., 2025).

Published claims about these options mix measured operational results, pilot data, simulations, manufacturers' statements, policy targets and projections, and a percentage reported for one line cannot be converted into an expected effect for another network. Comparisons that keep the type of evidence visible are therefore needed, including in Kazakhstan. The operational length of the national network was 16,005 route-km at the end of 2023, and more than a fifth of the approximately 21,000 track-km is electrified (AIIB, 2026). Kazakhstan Temir Zholy (KTZ) reports 4,237 km of electrified sections; after the replacement of the Lisna telemetry system by the AMT system, telemetry control of dispatch circles will cover 2,448 km of them, and similar work is planned on further power supply sections by 2029 (KTZ, 2025). The split of the network between direct-current (DC) and alternating-current (AC) traction could not be confirmed from an official source during this study, so transferability is assessed conditionally for both systems.

The aim of this study was to identify, compare and critically assess international practices in the digital automation of railway traction power systems and to determine which technical and institutional elements may be transferable to Kazakhstan. The research question was: which digital automation technologies have been implemented in international railway traction power systems, what verifiable outcomes have been reported, and under what conditions could these practices be transferred to Kazakhstan? The object is foreign digital control of traction power; the subject is its technologies, outcomes and conditions of transfer. The analytical proposition was that the strength of evidence differs more between technologies than between countries, and that transferability depends mainly on the electrification system and on the digital readiness of substations.

Reviews of regenerative braking energy group recovery methods into operational measures (timetable and driving), storage on board or at the wayside, and reversible substations that return energy to the public grid (González-Gil et al., 2013: 374–388; Khodaparastan et al., 2019: 2831–2847). A recent review of railway storage finds supercapacitors and lithium-ion batteries viable on board and recommends supercapacitors and flywheels for wayside use (Domínguez et al., 2025). A 2026 review of distributed photovoltaic and storage integration distinguishes substation-side, wayside-distributed and hybrid multi-port schemes and argues that single-phase, highly dynamic traction loads and strict voltage and protection constraints make energy management of traction systems distinct from that of conventional microgrids (Li, 2026).

Monitoring and digital-twin research forms a second stream. A systematic review of railway digital twins covering 91 papers addresses four primary subsystems of the railway (Thompson et al., 2025: 238–250). These reviews are organised by technology rather than by the strength of field evidence.

The third stream concerns communication and security. Communication for power utility automation is standardised in the IEC 61850 series (IEC, 2026). Railway-specific cybersecurity requirements are set out in CLC/TS 50701:2023 (CENELEC, 2023). A 2026 systematic review of cybersecurity in intelligent railway systems maps research trends and challenges at system level (Abukeshek et al., 2026). Russian-language work on the digital traction substation describes digital substations based on IEC 61850 and a pilot project for a digital traction substation at Inskaya station commissioned in 2020 (Ryzhova, 2023: 15–31).

None of the reviews identified here compares national cases with an explicit grading of evidence types or assesses transferability to a 1,520 mm network such as that of Kazakhstan.

Materials and Methods.

The study combined a structured scoping review with a comparative multiple-case analysis. The review followed the methodological framework for scoping studies (Arksey, O'Malley, 2005: 19–32) and was reported according to the PRISMA extension for scoping reviews, PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018: 467–473). The term systematic review is not used, because no protocol was registered and most studies were charted from abstracts.

The database search was run in the open bibliographic index OpenAlex on 10 October 2026. OpenAlex allows the query, filters and results to be reproduced without subscription access. The search covered titles and abstracts, publication dates from 1 January 2016 to 10 October 2026, and the document types article and review; no language filter was applied. Five strings combined traction-power terms with terms for storage and regenerative energy (S1), substation automation and SCADA (S2), monitoring and digital twins (S3), energy management, metering and microgrids (S4) and cybersecurity (S5); the full Boolean strings are given in Supplementary file S1.

Other sources were identified by targeted searches of operator and agency websites (RFI, JR East, the Swiss Federal Office of Energy, CORDIS) and by citation tracking.

Eligibility was defined by population, concept and evidence. The population was the fixed installations of electrified heavy rail, metro and light rail. The concept was one of the technologies of digital automation at the level of the traction power system: energy storage, reversible substations and control or energy management of storage and converters; railway microgrids and renewable integration; protection, SCADA and condition monitoring; smart metering; digital twins and state estimation; load forecasting; or cybersecurity of power-supply control. The evidence criterion required an outcome from an identified real system, either from field implementation or a field experiment, or from a model or hardware-in-the-loop (HIL) test driven by or validated against measured data from that system.

Records were excluded for five reasons: E1, not a railway traction fixed installation or transport mode unclear; E2, no data from an identifiable real system (synthetic simulation or concept only); E3, outside the concept (power-electronic topology without an automation function, train-operation optimisation, signalling, rolling stock, or mechanical inspection of the catenary); E4, incomplete bibliographic record without DOI or identifiable venue; E5, retracted publication. Mechanical and image-based catenary inspection was excluded because it addresses geometry rather than control of the electrical system. Reviews were retained as background only.

Titles and abstracts were screened in two independent, AI-assisted passes, with final decisions verified by the authors. The first pass used an automated flag for evidence terms (for example, measured, field, in service); the second, blind to the first, read every full abstract. Disagreements were arbitrated against the protocol. Full texts were sought for field-implementation studies and for all sources used to define national cases. Charted fields included country, system, electrification, technology, scale, evidence type, reported outcomes with units and their location in the source, validation and reading level.

Six evidence types were distinguished and not combined: measured operational results; pilot or field-experiment results; simulation or HIL results driven by measured data; manufacturer claims; policy targets; and projected benefits. Case-defining sources were appraised against five criteria: the system is identified; data provenance is stated; a baseline is reported; validation is described; and the authors are independent of the operator and the supplier. Evidence quality was rated high (at least four criteria met), moderate (three) or low (two or fewer). The full screening log, extraction sheet and appraisal are provided as Supplementary file S1.

A country was treated as a national case if at least one included source identified a real system and reported quantified measured operational or field-experiment results, or if an official operator or agency document described an operational system. Countries represented only by model-based or projected evidence were used as supporting evidence.

Transferability was assessed against fourteen criteria for Kazakhstan, grouped into four domains: technical compatibility (electrification system and voltage, condition of substations, compatibility with existing SCADA, interoperability, communication coverage); geography and environment (gauge, climate, distance between facilities); institutions (regulation including grid-code rules for reverse power flow and tariffs, cybersecurity readiness, technical workforce,

maintenance capacity, capital costs); and data availability (including traffic and substation load data). The resulting matrix is given in Supplementary file S1. Each criterion was recorded as supported by official Kazakhstani evidence, contradicted or unknown; no numerical weights were assigned, because no expert survey was conducted. Synthesis was narrative with frequency counts; effect sizes were not pooled because the metrics are not commensurable.

Results.

The five strings returned 310 records (S1, 45; S2, 13; S3, 127; S4, 118; S5, 7). After removal of 18 duplicates, 292 records were screened. The two passes agreed on 267 of them (91.4%; Cohen's $\kappa = 0.70$); 25 disagreements were arbitrated, of which 15 led to inclusion and 2 to exclusion of records first retained. In total, 235 records were excluded (E1, 32; E2, 103; E3, 81; E5, 1; reviews, 18). Of the 57 records assessed for eligibility, full texts were retrieved for 5; the remaining 52 were assessed on abstract and bibliographic metadata. One study was excluded because it described an implemented monitoring system without outcome data. In total, 56 database studies and 7 documents from other sources were included (Figure 1); all 63 are listed in Supplementary file S1.

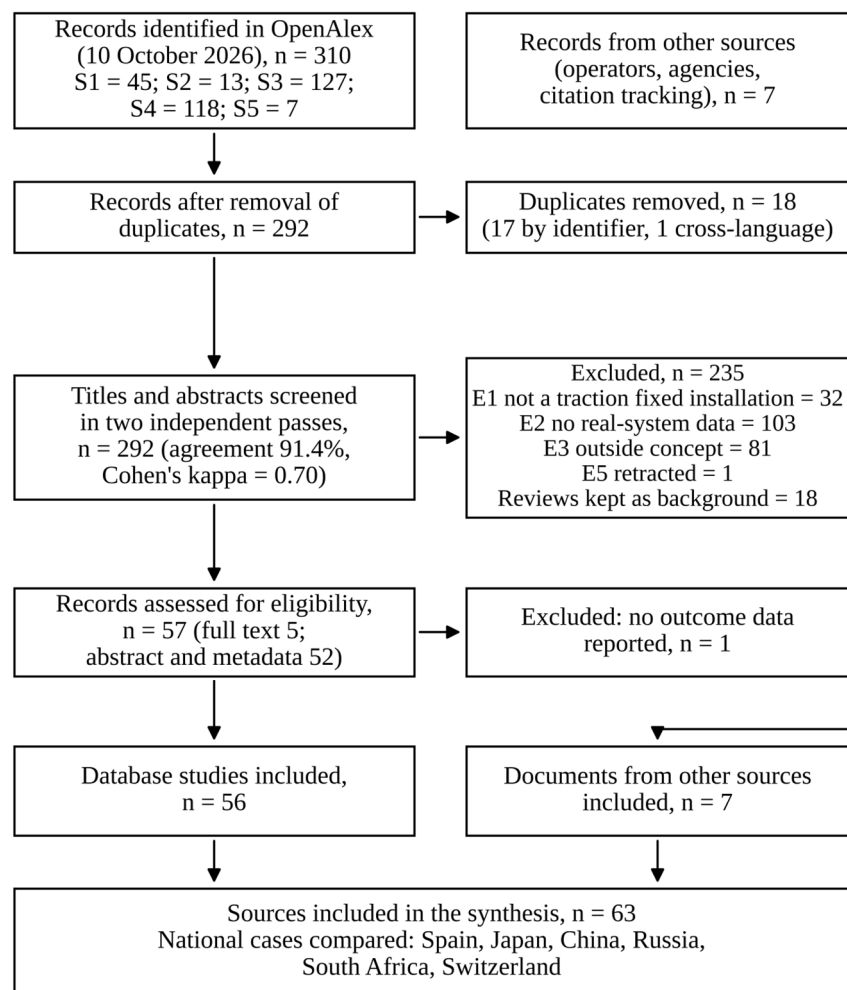


Fig. 1. PRISMA-ScR flow of source selection

Of the 56 database studies, 48 were published from 2021 onwards (by OpenAlex publication year). By country of data, or of author affiliation where the system was not named, 41 studies came from China, three from Poland and two from Russia; Croatia, France, Italy, Morocco, Romania, South Africa, Ukraine, the United Kingdom and Viet Nam contributed one each, and one study could not be assigned. AC systems were studied in 33 studies (including one dual AC/DC system) and DC systems in 18; in five the electrification was not stated or not applicable.

Only 10 studies reported field implementation or field experiments; 46 relied on models or HIL tests driven by measured data. Storage, energy management and converter control dominated (45 studies), while protection, monitoring and SCADA (4), digital twins and state estimation (4), load forecasting (2) and smart metering (1) were rare. The cybersecurity string returned 7 records, none of which was included; one dataset from a traction substation was excluded because the installation was not identified as an operating system. No included study reported field evidence on the cybersecurity of traction power control.

Six national cases met the selection rule: Spain, Japan, China, Russia, South Africa and Switzerland. Their evidence is summarised in Table 1 and described below.

Table 1 – Evidence for the six national cases

Country	System	Technology	Scale	Reported outcome	Evidence quality	Transferability to Kazakhstan	Limitations
Spain (Cascetta et al., 2021)	Metro de Madrid line 10B, 1500 V DC	Reversible substation: 2 MVA DC/AC converter in anti-parallel with 3 MVA rectifier	1 substation; 1 train; 18 days; about 6,951 braking events	On-board dissipated energy 202 → 159 kWh (−21.4%)	Measured operational; peer-reviewed; high (4/5)	Conditional: DC sections; requires permission for reverse power flow	One line; short campaign; converter below rated use
Japan (Sekijima et al., 2019)	JR East DC sections; Joban Line (Ushiku)	Wayside battery storage; power interchange device; station demand response	2 storage sites; 1 sectioning post	About 400 MWh/yr (4%) and 750 MWh/yr (8%) discharged; about 2,500 MWh/yr regenerative energy used; peak −3–12% in verification tests	Measured operational; operator report; low (2/5)	Conditional: storage on DC, interchange device on AC sections	Not peer-reviewed; baseline method not stated
China (Li et al., 2021; Liu et al., 2021; Wu, Wu, 2024)	Ningbo Metro Line 4; Beijing Batong line; AC sections	Converter energy management over 4G; fuzzy-logic storage control; power conditioner between sections	6.4 MW field test; 6 field studies; 35 model studies	Field effects not quantified in abstracts; more than half of regenerative energy can be used in adjacent sections (authors)	Field experiment; model with measured data; abstract level; low	Conditional to low: needs converter-based substations and data links	Abstract-level data; Ningbo study authored mainly by a supplier
Russia (Shevlyugin et al., 2017)	Moscow metro Filevskaya line, substations T-23 and T-24 (DC)	Uncontrolled supercapacitor storage on substation buses	In service since 2014; several months of measurement	Peak power −13.4%; peak current 7 → 5.5 kA; energy saving 0.5–2.5% (winter), 5.6% (spring)	Measured operational; peer-reviewed; high (4/5)	Conditional: DC sections; no control software required	Small, seasonal savings; one line
South Africa (Moyo et al., 2021)	Gautrain, 2 × 25 kV autotransformer system	Protection IEDs with disturbance recorders; SCADA links	5 substations	Test trip times 42.4–62.0 ms above settings; recorded trip times up to 100 ms above test times	Measured operational and on-site tests; high (4/5)	Conditional: AC sections; consistent with KTZ telemetry renewal	No energy outcomes; one system
Switzerland (SFOE, 2021)	SBB, 16.7 Hz network	Digital load management by short shedding of heating loads	About half of rolling stock; target ≥ 70 MW	No measured outcome published	Operational deployment and target; low (1/5)	Insufficient data: tariff structure in Kazakhstan unknown	No outcome data

Spain. On line 10B of the Madrid metro (1500 V DC, about 15 km, 11 stations), a 2 MVA DC/AC converter was installed in anti-parallel with the 3 MVA rectifier of the La Moraleja

substation. On-board measurements on one train during 18 days of commercial service from October 2019, covering about 6,951 braking events, showed that energy dissipated in on-board resistors fell from 202 kWh in conventional mode to 159 kWh in reversible mode, a reduction of 21.4 % (Cascetta et al., 2021). The converter operated below capacity because grid injection was not yet permitted (Cascetta et al., 2021).

Japan. The East Japan Railway Company reports annual discharged energy of about 400 MWh, about 4% of feeding energy, for the battery storage at Haijima substation, and about 750 MWh, about 8%, at Okegawa substation (Sekijima et al., 2019: 18). A power interchange device at the Ushiku sectioning post on the Joban Line, in full operation since April 2015, made about 2,500 MWh of regenerative energy usable per year (Sekijima et al., 2019: 19). In verification tests, demand response reduced peak power by 3–12% at single stations (Sekijima et al., 2019: 22). The storage and interchange-device figures are measured operational results, but they are published by the operator itself and not peer-reviewed.

China. Six studies reported field-level evidence. A converter-based energy management system linked trains, ground bidirectional converters and a supervisory level over 4G communication and was tested at full power scale (6.4 MW) on Ningbo Metro Line 4 (Li et al., 2021: 798–807). A fuzzy-logic energy management strategy that adapts the charge and discharge thresholds of a ground storage system was tested in the field on the Beijing Batong line (Liu et al., 2021: 9945–9956). For a regenerative braking power conditioner between adjacent AC power sections, the authors report a case study and an engineering application and state that more than half of the regenerative energy can be utilised in adjacent sections (Wu, Wu, 2024: 174–184). Three further field studies cover storage control on a metro main track, short-circuit capacity identification and a maintenance platform on the Wuhan–Guangzhou line (Supplementary file S1). The other 35 Chinese studies used measured load data in models or HIL tests, for example on the Beijing–Shanghai high-speed line (Ying et al., 2021: 64127–64141) and the Lanzhou–Xinjiang line (Wang et al., 2023). The abstracts of the field studies do not quantify energy savings.

Russia. On the Filevskaya line of the Moscow metro, an uncontrolled supercapacitor storage system connected directly to the buses of traction substations has been in regular operation since January 2014 (Shevlyugin et al., 2017: 81). Measurements showed a reduction in peak substation power of about 13.4%, a fall in peak current from 7 kA to 5.5 kA, and traction energy savings of 0.5–2.5% in winter and 5.6% in spring (Shevlyugin et al., 2017: 81–82). Russian research also reports a digital-twin method for identifying load-capacity violations on DC lines, using operational indicators recorded during transport operations and test runs (Garanin et al., 2026: 100–109).

South Africa. On the Gautrain 2×25 kV autotransformer system, disturbance records from protection intelligent electronic devices (IEDs), linked to SCADA, were analysed together with on-site primary-injection tests (Moyo et al., 2021: 5704–5713). In the tests, relay trip times exceeded the settings by 42.4–62.0 ms, and the disturbance records showed trip times up to 100 ms longer than in the tests; a fibre break was located 6,100 m from a substation.

Switzerland. On the 16.7 Hz traction network of Swiss Federal Railways (SBB), digital load management switches off train and points heating for seconds to about a minute at peaks. About half of the rolling stock is available for this purpose, and the stated target was at least 70 MW of flexible load by 2023; demand can swing by up to 300 MW within 15 minutes (SFOE, 2021). No measured outcome has been published.

Other countries provided unquantified field implementations (smart metering in Ukraine, remote SCADA access in Romania; Supplementary file S1) or model-based, pilot or projected evidence. A Polish study sized hybrid storage for a 3 kV DC substation with a model checked against one year of 15-minute data (average daily energy 31.00 MWh simulated against 34.46 MWh measured) (Szeląg et al., 2025). In Viet Nam, a hybrid digital twin reconstructed second-level substation power from SCADA readings logged every 3–5 minutes on the 750 V DC Cat

Linh–Ha Dong line, in a simulation validated against SCADA data (Tran, An, 2026: 983–993). Rete Ferroviaria Italiana projected savings of 100 MWh per year, or 10–15% of a substation's consumption, from a 3 kV DC braking-energy recovery prototype at Forlì (RFI, 2021). In the European IN2STEMPO project, tests at a 16.7 Hz 110 kV switchgear station of DB Energie showed that 50 Hz merging units can be adapted to a 16.7 Hz environment, but no quantified operational results were reported, so Germany was not treated as a national case (CORDIS, 2024).

Measured effects exist for reversible substations, wayside storage and protection data analytics; evidence for flexible traction substations, reinforcement-learning energy management and digital twins remains largely model-based; and reported magnitudes use incompatible metrics, so the figures in Table 1 cannot be ranked or transferred.

Discussion.

The data are consistent with the analytical proposition: evidence strength followed the technology more than the country, since China contributed both field experiments and model-based studies, while reversible substations and wayside storage had measured results in three countries. The Chinese evidence (41 of 56 studies) was assessed at abstract level and has not been independently replicated, and the Japanese case rests on one operator report that is not peer-reviewed.

Table 2 applies the transferability criteria to five technology groups. The criteria supported by official Kazakhstani evidence are few: the construction of new lines to the 1,520 mm broad gauge standard (AIIB, 2026), the length of the electrified network and the planned extension of telemetry (KTZ, 2025). Other critical criteria could not be confirmed from official sources, so all five groups are at most conditionally transferable.

Table 2 – Transferability of technology groups to Kazakhstan.

Technology group	Strongest evidence (type, case)	Kazakhstani criteria supported by official evidence	Critical criteria unknown	Assessment
A. Monitoring and telecontrol from IED and SCADA data	Measured operational (South Africa); field implementation (China, Wuhan–Guangzhou line); demonstration (Germany, IN2STEMPO)	Telemetry renewal planned to cover 2,448 of 4,237 km of electrified sections (KTZ, 2025)	Condition of substations; SCADA protocols; communication coverage; cybersecurity readiness	Conditional; candidate for early pilot
B. Wayside storage with rule-based or fuzzy control	Measured operational (Japan, Russia); field experiment (China, Batong)	Length of electrified network (KTZ, 2025)	Electrification system by section; data availability (traffic, substation load)	Conditional; candidate for a DC pilot
C. Reversible substations and energy feedback	Measured operational (Spain); projection (Italy)	None identified	Regulation (grid code for reverse power flow; tariffs)	Conditional on regulation
D. Converter-based energy management, flexible and co-phase substations	Field experiment (China, Ningbo); otherwise models with measured data	None identified	Condition of substations; data availability; technical workforce; capital costs	Low at present
E. Load management and demand response	Operational deployment without outcomes (Switzerland); measured at stations (Japan)	None identified	Regulation (tariff structure); data availability (controllable loads)	Insufficient data

Note: climate and distances between facilities were not assessed with official data for any group.

Two groups appear most suitable for early piloting: monitoring and telecontrol based on IED and SCADA data, because KTZ is already modernising telemetry and no reverse power flow is required; and wayside storage with rule-based or fuzzy control on a DC section, because

Moscow, Japan and Beijing provide measured or field-tested results. Reversible substations depend on permission to inject energy into the public grid, which limited the Madrid converter (Cascetta et al., 2021). Flexible substations and learning-based energy management need converter-based substations and data infrastructure not yet documented in Kazakhstan, and their evidence is mostly model-based.

Based on these findings, a six-stage framework is proposed (Figure 2) as a basis for discussion, not as an implemented or approved programme. It moves from a digital audit and a measured baseline of at least one year on one pilot section, so that seasonal variation of the kind reported in Moscow is captured, through SCADA and monitoring integration under IEC 61850 and CLC/TS 50701, to energy management, forecasting and a calibrated digital twin, and ends with an independent evaluation before any scaling. Each decision gate uses measured results from the pilot section rather than results reported for other networks.

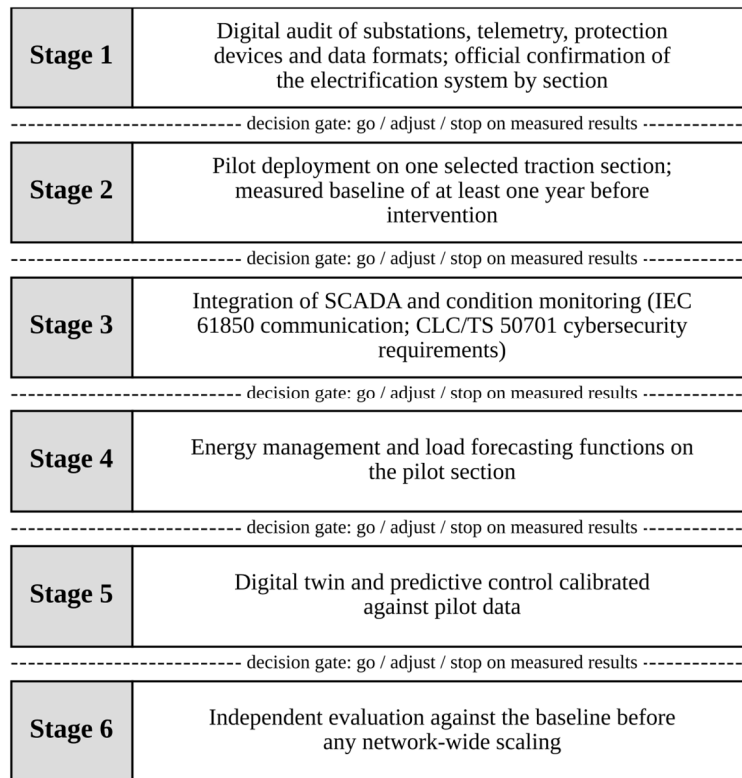


Fig. 2. Proposed phased framework for digital automation of traction power supply in Kazakhstan

The search used one open index; Scopus, Web of Science and IEEE Xplore were not searched directly, so relevant records may have been missed. Screening used two passes, but charting and appraisal one. Full texts were retrieved for only 5 of the 57 records assessed for eligibility, so quantitative outcomes of the Chinese field studies could not be extracted. Official Kazakhstani data on electrification systems, substation condition and SCADA were not available, and no cost data were analysed.

Conclusion.

Measured operational evidence exists for reversible substations (Spain), wayside storage (Japan and Russia) and protection-device data (South Africa); China provides field experiments on converter-based energy management and adaptive storage control. Flexible substations, learning-based energy management and digital twins rest mainly on models, and no field evidence on the cybersecurity of traction power control was found.

For Kazakhstan, the available evidence is consistent with a staged approach that starts with a digital audit and a measured baseline, then pilots monitoring and telecontrol functions and, on a suitable DC section, wayside storage with transparent control rules. Transferability depends on

information that is not yet publicly available, above all the electrification system by section, the condition and communication capability of substations, and the grid-code rules for reverse power flow. Further work should obtain these data from KTZ, repeat the search in subscription databases and evaluate a pilot against a measured baseline.

REFERENCES

- Abukeshek, M., Al-Mhiqani, M., Parkinson, S., Khan, S., & Bearfield, G. (2026). Cybersecurity in intelligent railway systems: Taxonomy, research trends, challenges, and future directions. *Computers & Electrical Engineering*. 132. 110994. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.110994>
- AIIB – Asian Infrastructure Investment Bank. (2026). Transforming Rail Connectivity in Kazakhstan (Middle Corridor Development) Phase I: Project document P001038. https://www.aiib.org/en/projects/details/2026/_download/Kazakhstan/Combined-Version-APD_P001038-Transforming-Rail-Connectivity-in-Kazakhstan-Middle-Corridor-Development-Phase-I-RMF-updated.pdf (accessed: 10.10.2026)
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*. 8(1). 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Cascetta, F., Cipolletta, G., Delle Femine, A., Quintana Fernández, J., Gallo, D., Giordano, D., & Signorino, D. (2021). Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train. *Measurement*. 183. 109793. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109793>
- CENELEC. (2023). CLC/TS 50701:2023. Railway applications – Cybersecurity. <https://evs.eu/en/clc-ts-50701-2023> (accessed: 10.10.2026)
- CORDIS – European Commission. (2024). IN2STEMPO – Innovative Solutions in Future Stations, Energy Metering and Power Supply (grant agreement 777515): Reporting. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/project/id/777515/reporting> (accessed: 10.10.2026)
- Domínguez, M., Fernández-Cardador, A., Fernández-Rodríguez, A., Cucala, A.P., Pecharromán, R.R., Urosa Sánchez, P., & Vadillo Cortázar, I. (2025). Review on the use of energy storage systems in railway applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 207. 114904. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114904>
- Garanin, M. A., Poteiko, A. N., & Mitrofanov, A. N. (2026). Metodika postroeniya tsifrovyykh dvoynikov narushenii nagruzochnoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s ispol'zovaniem fakticheskikh ekspluatatsionnykh pokazatelei [Method for constructing digital twins of load-capacity violations of the traction power supply system using actual operational indicators]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*. 2(89). 100–109. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2026-2-100-109> [In Russ.]
- González-Gil, A., Palacín, R., & Batty, P. (2013). Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy // *Energy Conversion and Management*. 75. 374–388. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.039>
- IEC – International Electrotechnical Commission. (2026). IEC 61850:2026 SER. Communication networks and systems for power utility automation – All parts. <https://webstore.iec.ch/en/publication/6028> (accessed: 10.10.2026)
- Khodaparastan, M., Mohamed, A.A. & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 20(8). 2831–2847. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
- KTZ – Kazakhstan Temir Zholy. (2025, October 17). KTZ modernizes its electricity supply telemetry system. <https://railways.kz/en/news2025/ktz-modernizes-its-electricity-supply-telemetry-system/> (accessed: 10.10.2026)
- Li, H. (2026). A review of energy management for distributed PV-storage-integrated railway traction power supply systems: Architectures, interfaces, and control strategies. *Electronics*. 15(11). 2244. <https://doi.org/10.3390/electronics15112244>
- Li, H., Mei, W., Zhao, H., Huang, Z., Zhang, C. & Zhang, Z. (2021). Energy conscious management for smart metro traction power supply system with 4G communication loop. *Energy Reports*. 7. 798–807. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.084>
- Liu, Y., Yang, Z., Wu, X., Lan, L., Lin, F., Su, H., & Huang, J. (2021). Adaptive threshold adjustment strategy based on fuzzy logic control for ground energy storage system in urban rail transit // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 70(10). 9945–9956. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3109747>
- Moyo N.M., Bansal, R.C. & Naidoo, R.M. (2021). Fault analysis of the Gautrain 2 × 25 kV AC traction power supply system using disturbance fault records and on-site testing // *IEEE Systems Journal*. 15(4). 5704–5713. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3033885>
- RFI – Rete Ferroviaria Italiana. (2021, April 22). DA FS NEWS – È di FS il primo prototipo europeo di recupero di energia elettrica dalla frenata dei treni [FS has the first European prototype for recovering electrical energy from train braking]. <https://www.rfi.it/it/news-e-media/comunicati-stampa-e-news/2021/4/22/da-fs-news---e-di-fs-il-primo-prototipo-europeo-di-recupero-di-e.html> (accessed: 10.10.2026) [In Italian]
- Ryzhova, E.L. (2023). Primenenie intellektual'nykh tekhnologii dlya realizatsii proekta tsifrovoy tyagovoy podstantsii [Application of intelligent technologies for the implementation of the digital traction substation project] // *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii [Modern Transportation Systems and Technologies]*. 9(3). 15–31. <https://doi.org/10.17816/transsyst20239315-31> [In Russian]
- Sekijima, S., Sato, H., & Hayashiya, H. (2019). Tetsudo denryoku shisutemu e no 'sumato guriddo gijutsu' no tekiyo ni tsuite [Application of smart grid technology for railway power supply] // *JR EAST Technical Review*. 63. 17–22. https://www.jreast.co.jp/development/tech/pdf_63/tech-63-17-22.pdf (accessed: 10.10.2026) [In Japanese]
- SFOE – Swiss Federal Office of Energy. (2021). SBB: On track for flexible power consumption [Watt d'Or award profile]. <https://pubdb.bfe.admin.ch/en/publication/download/10756> (accessed: 10.10.2026)

- Shevlyugin, M. V., Stadnikov, A. N., & Golitsyna, A. E. (2017). The use of energy storage devices of uncontrolled type on the Moscow metro (theory and practice). *JITA // Journal of Information Technology and Applications*. 7(2). 78–83. <https://doi.org/10.7251/JIT1702078V>
- Szeląg, A., Jefimowski, W., Maciołek, T., Nikitenko, A., Wieczorek, M., & Lewandowski, M. (2025). Hybrid energy storage system for regenerative braking utilization and peak power decrease in 3 kV DC railway electrification system. *Electronics*, 14(9), 1752. <https://doi.org/10.3390/electronics14091752>
- Thompson, E.A., Lu, P., Alimo, P.K., Atuobi, H.B., Akoto, E.T. & Abbew C.K. (2025). Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. *High-speed Railway*. 3(3). 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.05.005>
- Tran Van Khoi, & An Thi Hoai Thu Anh. (2026). Hybrid physics-machine learning digital twin for high-resolution traction substation power estimation // *Transport and Communications Science Journal*. 77(7). 983–1000. <https://doi.org/10.47869/tcsj.77.7.8>
- Tricco, A.C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K.K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M.D.J., Horsley, T., Weeks, L., et al. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation // *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Wang, Y., Guo, Y., Chen, X., Zhang, Y., Jin, D., & Xie, J. (2023). Research on the energy management strategy of a hybrid energy storage type railway power conditioner system. *Energies*. 16(15). 5759. <https://doi.org/10.3390/en16155759>
- Wu, L., & Wu, M. (2024). Utilisation of regenerative braking energy in adjacent power sections of railway systems // *IET Electric Power Applications*. 18(2). 174–184. <https://doi.org/10.1049/elp2.12378>
- Ying, Y., Liu, Q., Wu, M., & Zhai, Y. (2021). The flexible smart traction power supply system and its hierarchical energy management strategy. *IEEE Access*. 9. 64127–64141. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075768>

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 19–30
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002>
UDC / УДК / ООЖ: 621.311.4:625.1

VOLTAGE REGULATION AND REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRIFIED RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEMS: ANALYSIS, MODERN SOLUTIONS, AND AUTOMATION PROSPECTS

*A.A. Askarov**

Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan.
E-mail: askarov.d@gmail.com

Azimzhan Askarovich Askarov — doctoral student, Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan
E-mail: askarov.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-563X>.

© A.A. Askarov

Abstract. The present study investigates the complex problem of voltage regulation and reactive power compensation in the traction power supply systems of electrified railways operating at 27.5 kV and 2×25 kV. The research is motivated by the growing operational challenges at Kazakhstan Temir Zholy (KTZ) network, where extended 220 kV transmission lines up to 400 km in length generate significant capacitive reactive power under light-load conditions, causing voltage deviation beyond permissible limits and complicating automatic voltage regulation. The research object is the external and internal power supply system of electrified railway sections in Kazakhstan; the research subject is the regime characteristics, voltage deviation patterns, and reactive power balance under variable traction load conditions. The paper systematically analyses the influence of traction load harmonics, current asymmetry, and capacitive charging power of long overhead transmission lines on power quality indices. Calculation models based on Π -equivalent circuit representation are developed for five operational sections of KTZ, enabling quantitative assessment of voltage losses (2–7 kV range depending on traffic intensity) and charging reactive power magnitudes. Technical solutions are proposed and evaluated: capacitor banks with harmonic filters, on-load tap-changing (OLTC) transformers, off-circuit tap-changing (OCTC) devices, shunt reactors (3.3 MVAR units), and ferroresonance-controlled saturable reactors (SR) for continuous reactive power regulation. The findings demonstrate that ferroresonance-type controlled reactors represent the most technically feasible and cost-effective solution for automated reactive power management under variable load schedules. Intelligent monitoring and SCADA-integrated control algorithms are proposed as a direction for further development toward Industry 4.0-compliant railway power infrastructure.

Keywords: electrified railway, traction power supply, contact network, reactive power, voltage regulation, traction substation, capacitor bank, shunt reactor

For citation: Askarov A.A. (2026). Voltage regulation and reactive power compensation in electrified railway power supply systems: analysis, modern solutions, and automation prospects // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 19–30. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002> (In Russ.).

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

**ЭЛЕКТРЛЕНДІРІЛГЕН ТЕМІРЖОЛ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ
ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ КЕРНЕУДІ РЕТТЕУ ЖӘНЕ РЕАКТИВТІ ҚУАТТЫ ӨТЕУ:
ТАЛДАУ, ЗАМАНАУИ ШЕШІМДЕР ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ
ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ**

*А.А. Аскаров**

Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан.

E-mail: askarov.d@gmail.com

Азимжан Аскарлович Аскаров — докторант, Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан
E-mail: askarov.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-563X>.

© А.А. Аскаров

Аннотация. Зерттеуде 27,5 кВ және 2×25 кВ жүйелері бойынша жұмыс істейтін электрлендірілген теміржолдардың тарту электрмен жабдықтау жүйелеріндегі кернеуді реттеу және реактивті қуатты өтеу мәселелері кешенді түрде қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі «Қазақстан темір жолы» (ҚТЖ) желісіндегі пайдалану қиындықтарының артуымен байланысты, мұнда ұзындығы 400 км-ге дейін жететін 220 кВ электр беру желілері аз жүктеме режимінде айтарлықтай сыйымдылықты реактивті қуат өндіреді, бұл рұқсат етілген шектерден тыс кернеу ауытқуларына және автоматты кернеу реттеу жүйесінің күрделенуіне алып келеді. Зерттеу объектісі ретінде Қазақстанның электрлендірілген теміржол учаскелерінің сыртқы және ішкі электрмен жабдықтау жүйелері қарастырылды, ал зерттеу пәні — айнымалы тарту жүктемесі жағдайындағы режимдік сипаттамалар, кернеу ауытқулары және реактивті қуат балансы. Мақалада тарту жүктемесінің гармоникаларының, ток асимметриясының және ұзын әуе электр беру желілерінің сыйымдылықты зарядтық қуатының электр энергиясы сапасына әсері жүйелі түрде талданған. ҚТЖ-ның бес нақты пайдалану учаскесі үшін П-тәрізді эквиваленттік сұлба негізінде есептеу модельдері әзірленіп, олардың көмегімен қозғалыс қарқындылығына байланысты 2–7 кВ аралығындағы кернеу шығындары мен реактивті қуат шамалары сандық бағаланды. Техникалық шешімдер ретінде гармоникалық сүзгілері бар конденсаторлық батареялар, жүктеме астында реттелетін трансформаторлар (OLTC), жүктемесіз ауыстырып қосылатын құрылғылар (OCTC), шунттық реакторлар (3,3 МВАр модульдері) және реактивті қуатты үздіксіз реттеуге арналған феррорезонанстық басқарылатын қанығатын реакторлар ұсынылып, салыстырмалы түрде бағаланған. Зерттеу нәтижелері феррорезонанстық басқарылатын реакторлардың айнымалы жүктеме кестелері жағдайында реактивті қуатты автоматты басқарудың техникалық және экономикалық тұрғыдан ең тиімді шешімі екенін көрсетті. Сонымен қатар Industry 4.0 талаптарына сәйкес интеллектуалды электрмен жабдықтау инфрақұрылымын қалыптастыру бағытында SCADA-жүйелерімен интеграцияланған интеллектуалды мониторинг және басқару алгоритмдері ұсынылған.

Түйін сөздер: электрлендірілген теміржол, тарту электрмен жабдықтау, түйіспе желісі, реактивті қуат, кернеуді реттеу, тарту қосалқы станциясы

Дәйексөз үшін: Аскаров А.А. (2026). Электрлендірілген теміржол электрмен жабдықтау жүйелерінде кернеуді реттеу және реактивті қуатты өтеу: талдау, заманауи шешімдер және автоматтандыру перспективалары // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 19–30 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: АНАЛИЗ, СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

*А.А. Аскарлов**

Кыргызский Государственный Технический Университет, Бишкек, Кыргызстан.

E-mail: askarov.d@gmail.com

Азимжан Аскарлович Аскарлов — докторант, Кыргызский Государственный Технический Университет, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: askarov.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-563X>.

© А.А. Аскарлов

Аннотация. В настоящей работе исследуется комплексная проблема регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог, работающих на напряжении 27,5 кВ и 2×25 кВ. Актуальность исследования обусловлена растущими эксплуатационными трудностями в сети АО «Национальная компания «Қазақстан темір жолы» (КТЖ), где протяжённые линии электропередачи 220 кВ длиной до 400 км генерируют значительную ёмкостную реактивную мощность в режиме малых нагрузок, вызывая отклонения напряжения за допустимые пределы и затрудняя автоматическое регулирование напряжения. Объектом исследования является внешняя и внутренняя система электроснабжения электрифицированных железнодорожных участков Казахстана; предметом — режимные характеристики, закономерности отклонений напряжения и баланс реактивной мощности в условиях переменной тяговой нагрузки. На основе представления ЛЭП П-эквивалентной схемой разработаны расчётные модели для пяти эксплуатационных участков КТЖ, обеспечивающие количественную оценку потерь напряжения (в диапазоне 2–7 кВ) и величин зарядной реактивной мощности (21,7–55,7 МВАр). Предложены и оценены технические решения: батареи конденсаторов с фильтрами гармоник, трансформаторы с регулированием под нагрузкой (РПН), устройства без возбуждения (ПБВ), шунтирующие реакторы и феррорезонансные управляемые реакторы насыщения (РН) для плавного регулирования реактивной мощности. Показано, что управляемые реакторы феррорезонансного типа являются наиболее технически обоснованным и экономически эффективным решением для автоматизированного управления реактивной мощностью. В качестве направления дальнейшего развития в сторону инфраструктуры железнодорожного электроснабжения, соответствующей стандартам «Индустрии 4.0», предложены интеллектуальные алгоритмы управления с интеграцией в SCADA-системы.

Ключевые слова: электрифицированная железная дорога, тяговое электроснабжение, реактивная мощность

Для цитирования: Аскарлов А.А. (2026). Регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности в системах тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог: анализ, современные решения и перспективы автоматизации // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 19–30. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Электрификация железнодорожного транспорта является краеугольным камнем устойчивого развития транспортной системы Республики Казахстан. По состоянию на 2024 год около 4 000 км национальной железнодорожной сети, эксплуатируемой АО «НК «Қазақстан темір жолы» (КТЖ), электрифицировано: на главных ходах применяются системы переменного тока 27,5 кВ и высокопроизводительные автотрансформаторные системы 2×25 кВ (Марквардт, 1989: 5–18). Непрерывный рост грузовых и пассажирских перевозок в сочетании с внедрением мощных многосекционных электропоездов и высокоскоростного тягового подвижного состава предъявляет всё более жёсткие требования к качеству и надёжности тягового электроснабжения.

Три фундаментальных электромагнитных явления составляют основную проблему для инженеров СТЭ. Во-первых, реактивная мощность, потребляемая электропоездами, вызывает существенное падение напряжения вдоль питающих линий контактной сети, способное снизить напряжение ниже минимально допустимого значения 19,5 кВ в системе 27,5 кВ (Мамошин, Зимакова 1991: 45–67). Во-вторых, однофазный характер тяговых нагрузок создаёт токовую и напряжённую несимметрию в питающих трёхфазных сетях 110–220 кВ. В-третьих, силовые электронные преобразователи современного подвижного состава генерируют в сеть богатый спектр нечётных гармонических составляющих — преимущественно 3-й, 5-й, 7-й, 11-й и 13-й порядков, ухудшая качество электроэнергии (Varetsky, Ostroverkhov, Mazur, 2020: 1–12).

Географическая рассредоточенность железнодорожной инфраструктуры Казахстана обуславливает необходимость питания тяговых подстанций от протяжённых воздушных линий электропередачи 110–220 кВ длиной 150–400 км. Такие линии обладают существенной распределённой ёмкостью, генерирующей значительную зарядную реактивную мощность в режиме малых нагрузок, что может привести к росту напряжения на шинах высокого напряжения тяговых подстанций выше допустимого уровня (Ilyushin, Suslov, 2019: 1–6).

Складывающаяся парадигма «Индустрии 4.0», сети датчиков с поддержкой IoT, SCADA-системы и интеллектуальные алгоритмы прогностического управления открывают новое измерение в решении данной проблемы посредством непрерывного мониторинга в режиме реального времени и автоматизированной адаптивной компенсации (Suslov, Solonina, Smirnov, 2022: 49612–49621).

Цель исследования — провести комплексный технический анализ характеристик режима напряжения и баланса реактивной мощности в СТЭ электрифицированных железных дорог Казахстана, а также обосновать оптимальные технические решения по регулированию напряжения и компенсации реактивной мощности, включая современные подходы к автоматизированному управлению.

Задачи исследования: (1) проанализировать электромагнитное воздействие тяговых нагрузок на показатели качества электроэнергии; (2) рассчитать потери напряжения и величины зарядной реактивной мощности для представительных участков КТЖ; (3) провести сравнительную оценку имеющихся технологий компенсации и регулирования; (4) разработать инженерные рекомендации по оптимальному выбору и размещению оборудования; (5) наметить перспективы интеллектуального управления с интеграцией в SCADA.

Научная новизна работы состоит в: систематической количественной характеристике влияния зарядной реактивной мощности на регулирование напряжения для пяти эксплуатационных участков КТЖ; сравнительной технико-экономической оценке компенсирующих технологий в специфических эксплуатационных условиях электрифицированной железнодорожной инфраструктуры Казахстана; формулировке дорожной карты автоматизации управления реактивной мощностью в соответствии с международными стандартами интеллектуальных сетей и «Индустрии 4.0».

Проблема регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения железных дорог обстоятельно изучена в классической технической литературе. Основополагающие труды Марквардта (Марквардт, 1989) и Мамошина с Зимаковой (Мамошин, Зимакова 1991) заложили аналитическую базу для систем тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ и сформировали методологическую основу расчётов потерь напряжения в питающих линиях контактной сети. Гринберг-Басин (Гринберг-Басин, 1988) дал проектную базу для тяговых подстанций, включая выбор ступеней регулирования трансформаторов и расчёт ёмкостной компенсации.

В области качества электроэнергии генерация гармоник высших порядков тиристорными и IGBT-преобразователями современных электровозов исследована многочисленными авторами. Варецкий и др. показали, что вводимый подвижным составом гармонический ток существенно превышает уровни, принятые в ранее действовавших стандартах проектирования (Varetsky, Ostroverkhov, Mazur, 2020: 1–12). Розен и др. провели натурные измерения в сети КТЖ, зафиксировав коэффициент несинусоидальности тока (THD) до 18–22 % на подстанциях, обслуживающих грузонапряжённые участки (Rosen, Sokhina, Zubkova, 2022: 1–5).

Проблема зарядной мощности протяжённых линий в слабонагруженных системах электроснабжения получила сравнительно меньше внимания в железнодорожном контексте. Илюшин и Суслов проанализировали явление повышения напряжения на линиях 220 кВ, питающих удалённые тяговые подстанции, и предложили алгоритмы размещения шунтирующих реакторов (Ilyushin, Suslov, 2019: 1–6). Чжан и др. исследовали аналогичные явления применительно к электроснабжению китайских высокоскоростных железных дорог, зафиксировав генерацию ёмкостной реактивной мощности 8–15 МВАр на участках длиной 300 км (Zhang et al., 2019: 1044–1058).

В части компенсирующих технологий эволюция от фиксированных батарей конденсаторов к тиристорным устройствам компенсации реактивной мощности (СТК, СТАТКОМ) для железнодорожных применений задокументирована Лю и др. (Lü et al., 2023: 1193) и Фаизом и др. (Faiz, Ghazizadeh, Nekmat, 2021: 1597–1617). Степанов и др. представили экспериментальные результаты установки насыщающегося реактора феррорезонансного типа на тяговой подстанции РЖД, продемонстрировав точность регулирования реактивной мощности в пределах $\pm 0,5$ МВАр (Степанов Егоров, Соколова, 2021: 34–41).

Интеграции управления компенсацией реактивной мощности с SCADA-системами управления тяговым электроснабжением посвящены последние публикации. Налляперума и др. описали архитектуру мониторинга напряжения на базе IoT для подстанций переменного тока с прогностическим алгоритмом компенсации (Nallaperuma et al., 2020: 2024). Е и др. предложили концепцию цифрового двойника для моделирования и оптимизации уставок устройств компенсации реактивной мощности в режиме реального времени (Ye et al., 2022: 1–12). Суслов и др. рассмотрели применение «Индустрии 4.0» в энергетической инфраструктуре железных дорог, определив автоматизированное управление реактивной мощностью как приоритетную инвестиционную область (Suslov, Solonina, Smirnov, 2022: 49612–49621).

Критический анализ рассмотренной литературы позволяет выявить следующие пробелы: (а) ограниченность количественных данных о взаимодействии зарядной реактивной мощности протяжённых линий и переменной тяговой нагрузки в сети КТЖ; (б) отсутствие систематической сравнительной оценки компенсирующих технологий применительно к специфическим эксплуатационным условиям Казахстана; (в) отсутствие опубликованных дорожных карт автоматизации и интеграции SCADA для управления реактивной мощностью на тяговых подстанциях КТЖ. Настоящая статья посвящена устранению указанных пробелов.

Материалы и методы.

В исследовании применяется аналитико-расчётная методология, основанная на представлении воздушных линий электропередачи П-эквивалентной схемой и упрощёнными радиальными моделями для питающих линий контактной сети, дополненная сравнительным инженерным анализом технологий компенсации реактивной мощности.

Объектами исследования являются пять представительных электрифицированных участков АО «НК «Қазақстан темір жолы», питаемых от сети 220 кВ: (1) Астана–Атбасар–Есиль; (2) Сары-Оба–Уленты; (3) Шу–Алматы; (4) Шу–Чиганак; (5) Мын-Арал–Моинты. Данные участки охватывают диапазон длин линий (157,8–405 км) и конфигураций тяговых систем (27,5 кВ и 2×25 кВ), представленных в сети КТЖ.

Методы исследования включают: (1) аналитический расчёт потерь напряжения в питающих линиях контактной сети методом эквивалентных схем; (2) расчёт зарядной реактивной мощности линий методом П-эквивалентной схемы; (3) анализ гармонического спектра тяговых нагрузок на основе параметров качества электроэнергии по стандарту EN 50160:2010 и ГОСТ 32144-2013 (ГОСТ 32144-2013); (4) сравнительный технический анализ технологий компенсации реактивной мощности по количественным критериям эффективности; (5) инженерную экспертизу реализуемости на основе опубликованного эксплуатационного опыта и технических характеристик.

Типовая схема электроснабжения электрифицированной железной дороги предполагает двустороннее питание межподстанционной зоны через пост секционирования (ПС), расположенный приблизительно посередине. Эквивалентная схема сводится к радиальной питающей линии длиной, равной половине длины межподстанционной зоны, т.е. около 20 км при типичном расстоянии между подстанциями 40 км, характерном для главных ходов Казахстана.

Потери напряжения в питающей линии определяются из обобщённого уравнения потокораспределения. Для питающей линии с равномерно распределённой тяговой нагрузкой, представленной n сосредоточенными нагрузками:

$$\Delta U = \frac{\sum_i (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i)}{U_n} \quad (1)$$

где P_i и Q_i — активная и реактивная мощность i -го электровоза [кВт, кВАр]; R_i и X_i — активное и индуктивное сопротивление секции питающей линии от точки питания до i -й нагрузки [Ом]; U_n — номинальное напряжение контактной сети [кВ].

В режиме нормального графика движения (минимальный межпоездной интервал 6 км, длина питающей линии 20 км) расчётные потери напряжения составляют 2–3 кВ, при этом минимальное напряжение на конце питающей линии равно 26,5–27,5 кВ — в пределах допустимого диапазона 19,5–29,5 кВ. В режиме сгущения после «окна» при сокращении межпоездного интервала примерно до 3 км потери напряжения возрастают до 4–7 кВ, снижая минимальное напряжение до 22,5–25,5 кВ; это значение остаётся допустимым при условии поддержания напряжения на вторичных шинах подстанции на уровне 29,5 кВ.

Для протяжённых воздушных линий электропередачи 110–220 кВ удельная реактивная проводимость b_0 [См/км] определяется из рабочей ёмкости C_0 линии:

$$b_0 = \omega \cdot C_0 = 2\pi f \cdot C_0 \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg\left(\frac{D_{CP}}{r}\right)} \cdot 10^{-6} \quad [\Phi/\text{км}] \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg\left(\frac{D_{CP}}{r}\right)} \cdot 10^{-6} \quad [\text{См}/\text{км}] \quad (4)$$

где $D_{CP} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$ — среднегеометрическое расстояние между фазными проводами [м]; r — радиус провода [м].

Суммарная зарядная реактивная мощность линии на основе Π -эквивалентной схемы:

$$Q_C = U_N^2 \cdot b_0 \cdot l \quad [\text{MVar}] \quad (5)$$

где U_N — номинальное напряжение линии [кВ]; b_0 — удельная проводимость [См/км]; l — длина линии [км].

Для провода АС-300 ($r = 0,01235$ м, типовое $D_{CP} = 5,5$ м для линий 220 кВ со стандартным расположением фаз) $b_0 \approx 2,86 \times 10^{-6}$ См/км. Для линии 220 кВ длиной 300 км суммарная зарядная реактивная мощность составляет:

$$Q_C = (220)^2 \times 2.86 \times 10^{-6} \times 300 \approx 41.5 \text{ MVar} \quad (6)$$

Столь значительная генерация реактивной мощности в условиях малых или нулевых нагрузок представляет серьёзную проблему для регулирования напряжения, поскольку приводит к повышению напряжения на промежуточных шинах на 5–10 % сверх номинала, приближаясь к максимально допустимому уровню 115 % (критерий изоляции для оборудования класса 220 кВ).

Таблица 1 – Расчётная зарядная реактивная мощность для питающих участков КТЖ 220 кВ

Участок	Длина линии, км	Провод	$b_0, \times 10^{-6}$ См/км	Q_C при мин. нагрузке, МВАр
Астана–Атбасар–Есиль	239 / 157,8	АС-300	2,86	32,8 / 21,7
Сары-Оба–Уленты	260	АС-300	2,86	35,7
Шу–Алматы	290	АС-300	2,86	39,9
Шу–Чиганак	187	АС-300	2,86	25,7
Мын–Арал–Моинты	405	АС-300	2,86	55,7

Примечание. Данные подтверждают, что на всех пяти анализируемых участках КТЖ зарядная реактивная мощность в режиме минимальных нагрузок составляет 21,7–55,7 МВАр. Участок Мын–Арал–Моинты (405 км) является наиболее критичным: зарядная реактивная мощность может вызвать повышение напряжения на конце линии до 235–238 кВ (на 7–8% выше номинала). На всех участках пассивного управления реактивной мощностью посредством трансформаторов с РПН недостаточно — необходимы активные компенсирующие устройства.

Результаты.

Анализ электромагнитного воздействия тяговых нагрузок выявляет три основных механизма ухудшения качества электроэнергии в СТЭ. Во-первых, поток реактивной мощности от индуктивных тяговых двигателей вызывает падение напряжения вдоль питающих линий контактной сети (см. раздел 3.1). Коэффициент мощности современных грузовых электровозов обычно составляет 0,80–0,87, что соответствует потреблению реактивной мощности 1,2–2,4 МВАр на локомотив; при одновременном нахождении 6–7 электровозов на 20-километровой питающей линии суммарная реактивная нагрузка может достигать 8–17 МВАр.

Во-вторых, однофазное подключение тяговых трансформаторов к двум фазам питающей трёхфазной сети 110–220 кВ создаёт несимметрию токов, характеризующую

составляющей обратной последовательности. При максимальной нагрузке коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности может достигать 1,5–2 %, приближаясь к ограничению ГОСТ 32144-2013 в 2 % для сетей общего назначения (ГОСТ 32144-2013). Схемы симметрирования (трансформатор Скотта, трансформатор Вудбриджа, схема «открытый треугольник» с дополнительной мощностью) частично смягчают данный эффект.

В-третьих, силовые электронные преобразователи генерируют гармонические токи с доминирующими составляющими 5-го, 7-го, 11-го, 13-го, 17-го и 19-го порядков для шестипульсных выпрямителей. Натурные измерения на участке Шу–Алматы зафиксировали коэффициенты гармонических составляющих напряжения 3,1 % (5-я), 2,8 % (7-я) и 1,9 % (11-я) на вторичных шинах тяговых подстанций при суммарном коэффициенте несинусоидальности (THDU) 4,8 % — близком к ограничению ГОСТ 32144-2013 в 5 %.

Эксплуатационный опыт тяговых подстанций КТЖ выявляет примечательный факт: на большинстве подстанций, оснащённых устройствами РПН (диапазон регулирования ± 16 ступеней — от 81,5 % до 121,0 % номинального напряжения), функция автоматического регулирования напряжения (АРН) отключена, а переключения ответвлений выполняются вручную не чаще одного-двух раз в сезон. Подстанции, питаемые от сети 110 кВ, оснащены более простыми устройствами ПБВ с диапазоном $\pm 2 \times 2,5 \% = \pm 5 \%$, которые оказываются вполне достаточными для большинства режимов работы.

Данное наблюдение отражает фундаментальную инженерную реальность: широкий допустимый диапазон напряжений контактной сети (19,5–29,5 кВ, т.е. $\pm 18 \%$ от номинала 25 кВ) означает, что вторичное напряжение тяговой подстанции достаточно поддерживать лишь в сравнительно узком диапазоне 27,5–29,5 кВ. Учитывая, что потери напряжения в питающей линии контактной сети редко превышают 7 кВ даже при максимальной нагрузке, данное требование выполняется без непрерывного динамического регулирования в большинстве случаев.

Отсюда следует, что капиталовложения в сложные трансформаторы с РПН с полной функцией автоматического регулирования напряжения не оправданы для большинства тяговых подстанций КТЖ с точки зрения качества электроэнергии. Замена РПН устройствами ПБВ позволит снизить стоимость приобретения трансформатора на 15–20 %, сократить потребность в техническом обслуживании и повысить надёжность трансформатора за счёт исключения наиболее ненадёжного механического узла. Исключение составляют подстанции, питающие особо протяжённые зоны (> 25 км) или тяжёлые профильные участки ($> 6\%$).

Батареи конденсаторов, устанавливаемые на постах секционирования и шинах 27,5 кВ тяговых подстанций, выполняют двойную функцию: компенсацию реактивной мощности (улучшение профиля напряжения) и фильтрацию гармоник. В типовой схеме батарея конденсаторов включается последовательно с фильтровым реактором, образуя фильтр последовательного резонанса, настроенный на доминирующий порядок гармоники. Для фильтра, настроенного на 3-ю гармонику, условие последовательного резонанса:

$$n_{res} = \sqrt{\frac{Q_C}{Q_L}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (7)$$

Для фильтра 3-й гармоники $n_{res} = 2,8\text{--}2,9$ (расстройка для избежания точного резонанса), что требует $Q_P / Q_K \approx 0,12\text{--}0,13$. Мощность компенсации рассчитывается как 1 МВАр на 1 кВ требуемого повышения напряжения на конце питающей линии. При типичном дефиците напряжения 2–4 кВ на каждом посту секционирования необходима батарея конденсаторов мощностью 2–4 МВАр.

Результаты натурных испытаний на участке Астана–Атбасар подтверждают, что батарея конденсаторов 2 МВАр на посту секционирования повышает напряжение на конце

питающей линии на 1,8–2,2 кВ в нормальном режиме движения и снижает THD_U на 1,2–1,8 процентных пункта за счёт фильтрации 3-й гармоники. Ключевое эксплуатационное преимущество — простота: батарея может оставаться подключённой даже при отсутствии поездов, поскольку результирующее повышение напряжения не превышает 29,5 кВ.

Таблица 2 – Сравнительная оценка технологий компенсации реактивной мощности для СТЭ КТЖ

Технология	Тип регулирования	Время отклика	Фильтрация гармоник	Относит. стоимость	Интеграция SCADA
Фиксированная конд. батарея	Нет (фиксир.)	N/A	Пассивная (настр.)	1,0×	Базовая
Коммутируемая конд. батарея	Ступенчатое	Циклы–секунды	Пассивная (настр.)	1,8×	Умеренная
SVC-TSC	Ступенчатое (быстрое)	<50 мс	Пасс. + актив.	3,5×	Полная
SVC-TCR	Непрерывное	<50 мс	Активная	4,0×	Полная
Насыщ. реактор (ФР-тип)	Непрерывное	<200 мс	Пассивная (настр.)	1,5×	Полная
STATCOM (VSC)	Непрерывное	<10 мс	Активная (полная)	6,0×	Полная
Трансф. с РПН (OLTC)	Ступенчатое (медленное)	10–60 с	Нет	2,0×	Умеренная

Фиксированные и коммутируемые батареи конденсаторов с фильтрами гармоник представляют наиболее экономически эффективное решение на уровне 27,5 кВ. Насыщающиеся реакторы феррорезонансного типа обеспечивают оптимальное сочетание возможности плавного регулирования, приемлемой стоимости, совместимости с SCADA и помехоустойчивости при компенсации зарядной реактивной мощности на уровне 220 кВ. Решения СТАТКОМ или СТК-ТРН технически превосходят другие варианты, однако экономически оправданы лишь на участках с экстремальной изменчивостью реактивной мощности, например на выделенных скоростных пассажирских линиях.

Шунтирующие реакторы, устанавливаемые на шинах высокого напряжения (220 кВ) тяговых подстанций, являются традиционным средством компенсации избыточной зарядной реактивной мощности в режиме малых нагрузок. Суммарная требуемая мощность шунтирующих реакторов:

$$Q_{ШР} = Q_{3,\Sigma} - Q_{тяг, \min} \quad (8)$$

Для участка Шу–Алматы (290 км, $Q_3 \approx 39,9$ МВАр) при минимальном тяговом потреблении реактивной мощности 5–8 МВАр (ночной режим лёгкого движения) требуемая мощность шунтирующих реакторов составляет около 30–35 МВАр. С использованием стандартных агрегатов по 3,3 МВАр необходимо 9–11 единиц, распределённых на 2–3 промежуточных подстанциях. Расчёты подтверждают, что при равномерном распределении 9–10 агрегатов по линии отклонение напряжения на шинах всех подстанций остаётся в пределах $\pm 5\%$ от номинала как при минимальной, так и при максимальной нагрузке.

Среди всех непрерывно управляемых устройств регулирования реактивной мощности феррорезонансные реакторы насыщения (РН) с обмоткой подмагничивания постоянным током наиболее целесообразны для СТЭ КТЖ по следующим техническим причинам: (1) плавное непрерывное регулирование от нуля до номинального потребления реактивной мощности; (2) собственная помехоустойчивость к железнодорожным электромагнитным помехам; (3) возможность изготовления с использованием существующей промышленной базы, что обеспечивает отечественное производство; (4) совместимость с автоматическим ПЛК-управлением через стандартные интерфейсы

SCADA; (5) возможность двухрежимной работы — как автономного шунтирующего реактора, так и плавного регулятора при параллельном включении с батареями конденсаторов (Степанов Егоров, Соколова, 2021: 34–41).

Алгоритм управления регулированием реактивной мощности на базе РН:

$$I_{\text{ПМ}} = f(U_{\text{ВН}} - U_{\text{уст}}, \Delta Q_{\text{ош}}) \quad (9)$$

где $I_{\text{ПМ}}$ — ток подмагничивания [А]; $U_{\text{ВН}}$ — измеренное напряжение на шинах ВН [кВ]; $U_{\text{уст}}$ — уставка напряжения [кВ]; $\Delta Q_{\text{ош}}$ — отклонение реактивной мощности от целевого баланса [МВАр]. Функция f представляет собой пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования с защитой от насыщения, реализуемый в любом стандартном ПЛК, совместимом с МЭК 61131-3.

Обсуждение.

Результаты настоящего исследования ведут к ряду ключевых инженерных выводов, заслуживающих обсуждения в более широком контексте современного развития систем электроснабжения железных дорог.

Выявленный факт эксплуатации трансформаторов с РПН на большинстве тяговых подстанций КТЖ в режиме фиксированного ответвления или сезонного переключения ставит под сомнение сложившуюся практику проектирования, предусматривающую полную функцию РПН для всех тяговых подстанций как стандартное требование. Экономический аргумент в пользу упрощения весом: если устройства ПБВ с ручной сезонной подстройкой оказываются достаточными для 80–85% подстанций, полученная экономия может быть направлена на более приоритетную задачу — установку компенсирующих устройств на постах секционирования и компенсацию зарядной мощности на внешних линиях электроснабжения.

Аргументы в пользу интеграции управления компенсацией реактивной мощности в SCADA заслуживают особого внимания в контексте программы модернизации железных дорог Казахстана. Современные архитектуры SCADA для железнодорожного электроснабжения обеспечивают прямое прогностическое управление компенсирующими устройствами на основе данных о местоположении поездов от централизованной системы управления движением, а не чисто реактивное управление по обратной связи от измерения напряжения. По данным расчётного моделирования, такой подход снижает амплитуду отклонений напряжения на 30–50 % по сравнению с чисто реактивным управлением (Ye et al., 2022: 1–12).

Применение технологии цифрового двойника открывает особенно перспективный путь к оптимизации реактивной мощности (Nallaperuma et al., 2020: 2024). Цифровой двойник СТЭ, непрерывно обновляемый результатами измерений интеллектуальных датчиков на подстанциях и постах секционирования, может служить вычислительным ядром алгоритма оптимального потокораспределения, определяющего оптимальные уставки тока подмагничивания РН и программу включения батарей конденсаторов на прогнозируемый горизонт 1–2 часа. Этот подход соответствует стандарту МЭК 61968/61970 «Общая информационная модель» и стандарту МЭК 62439-3 для высоконадёжных коммуникаций в промышленной автоматизации.

Экологическое и энергосберегающее измерение управления реактивной мощностью также существенно. При повышении коэффициента мощности с 0,82 до 0,95 за счёт реактивной компенсации активные потери мощности снижаются приблизительно на 25 %, что в масштабах электрифицированной сети КТЖ выражается в экономии нескольких десятков ГВт·ч в год — весомый вклад в достижение целей Казахстана по энергоэффективности в рамках национальной программы перехода к «зелёной» экономике.

Заключение.

В настоящей статье представлен комплексный анализ регулирования напряжения и управления реактивной мощностью в СТЭ электрифицированных железных дорог Казахстана с акцентом на пять участков КТЖ, питаемых от сети 220 кВ. Основные выводы и рекомендации состоят в следующем. Зарядная реактивная мощность протяжённых линий 220 кВ (157,8–405 км) составляет 21,7–55,7 МВАр, что подтверждает необходимость специализированных мер компенсации зарядной мощности для всех участков КТЖ с длиной линии более 150 км. Потери напряжения в питающих линиях контактной сети в нормальном и напряжённом режимах движения (2–7 кВ) остаются в допустимом диапазоне 19,5–29,5 кВ для всех проанализированных конфигураций при условии поддержания вторичного напряжения тяговой подстанции на уровне 27,5–29,5 кВ. Фиксированные батареи конденсаторов 2–4 МВАр на постах секционирования обеспечивают достаточную поддержку напряжения с дополнительным эффектом фильтрации гармоник. Эксплуатационный факт отключения автоматики РПН на большинстве подстанций КТЖ даёт весомые основания для замены РПН более простыми и надёжными трансформаторами с ПБВ при новых установках и плановых капитальных ремонтах, что позволит снизить стоимость трансформатора на 15–20% и повысить надёжность. Феррорезонансные реакторы насыщения с обмоткой подмагничивания постоянным током представляют собой оптимальную непрерывно регулирующую компенсирующую технологию для условий КТЖ, сочетающую плавное регулирование реактивной мощности, высокую электромагнитную помехоустойчивость, возможность отечественного производства и полную совместимость с ПЛК-управлением на базе SCADA. Интеграция управления компенсацией реактивной мощности с прогностическим управлением SCADA на основе графика движения поездов — с использованием цифровых двойников, IoT-сетей датчиков и ПЛК, совместимых с МЭК 61131-3, — определена как стратегическое направление дальнейшего развития инфраструктуры тягового электроснабжения железных дорог Казахстана в соответствии со стандартами «Индустрии 4.0». Расчётная экономия энергии от полного внедрения оптимизации реактивной мощности составляет 20–30 ГВт·ч в год по электрифицированной сети КТЖ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку и испытание предложенного алгоритма регулирования реактивной мощности на базе РН в реальных условиях эксплуатации КТЖ, верификацию цифрового двойника СТЭ по данным натурных измерений, а также технико-экономическую оптимизацию размещения компенсирующих устройств с учётом прогнозируемого роста объёмов перевозок.

REFERENCES

- Dvorovchikova T.V., Zimakova A.N. (1990). *Elektrosnabzhenie i kontaktная set elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Posobie po proektirovaniyu* [Power Supply and Contact Network of Electrified Railways. Design Guide]. — М.: Transport. — 336 p. [In Russ.]
- Faiz J., Ghazizadeh M., Hekmat M. (2021). Reactive power compensation strategies in railway traction systems: A comprehensive review // *IET Power Electronics*. — Vol. 14. — No. 10. — Pp. 1597–1617. DOI: 10.1049/pel2.12106 [In Eng.]
- Grinberg-Basin M.M. (1988). *Tyagovye podstantsii. Posobie po proektirovaniyu* [Traction Substations. Design Guide]. — М.: Transport. — 312 p. [In Russ.]
- Ilyushin P.V., Suslov K.V. (2019). Smart power supply systems for remote consumers // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — Vladivostok, — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934009 [In Eng.]
- Lü M., Liu W., Wang C., Chen J. Reactive power compensation in high-speed railway traction power supply system: A review // *Energies*. — Vol. 16. — No. 3. — P. 1193. DOI: 10.3390/en16031193 [In Eng.]
- Mamoshin R.R., Zimakova A.N. (1991). *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power Supply of Electrified Railways]. — М.: Transport. — 368 p. [In Russ.]
- Markvardt K.G. (ed.). (1982–1983). *Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog* [Handbook of Railway Power Supply]. Vol. 1–2. — М.: Transport. [In Russ.]
- Markvardt K.G. (1989). *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power Supply of Electrified Railways]. — М.: Transport. — 456 p. [In Russ.]
- Nallaperuma S., De Silva C., Abeysinghe S., Bhatt M., Perera S. (2020). Artificial intelligence based techniques for railway systems — A review // *Electronics*. — Vol. 9. — No. 12. — P. 2024. DOI: 10.3390/electronics9122024 [In Eng.]

Rosen V.P., Sokhina Y.V., Zubkova M.V. (2022). Harmonic distortion analysis in AC railway traction systems // 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies — Asia (ISGT Asia). — Singapore. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ISGTAsia54193.2022 [In Eng.]

Stepanov A.S., Egorov A.V., Sokolova O.I. (2021). Experimental performance of a ferroresonance-controlled shunt reactor at a traction substation // Elektrotehnika [Electrical Engineering]. — No. 4. — Pp. 34–41. [In Russ.]

Suslov K.V., Solonina N.N., Smirnov A.S. (2022). Distributed power quality monitoring in railway traction grids using IoT technologies // IEEE Access. — Vol. 10. — Pp. 49612–49621. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3173018 [In Eng.]

Varetsky Yu., Ostroverkhov M., Mazur D. (2020). Harmonic pollution of railway traction systems and its impact on power supply quality // Energetika. — Vol. 66. — No. 1. — Pp. 1–12. DOI: 10.6001/energetika.v66i1.4232 [In Eng.]

Ye X., Kennedy J., McGordon A., Barreras J.V. (2022). Digital twin framework for rail traction power supply simulation and optimisation // IET Electrical Systems in Transportation. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 1–12. DOI: 10.1049/els2.12039 [In Eng.]

Zhang Z., Pang H., Georgiadis A., Cecati C. (2019). Wireless power transfer — an overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — Vol. 66. — No. 2. — Pp. 1044–1058. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378 [In Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 31–41
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003>
UDC / УДК / ЭОЖ:
УДК 621.331:681.5

AUTOMATIC STRAY CURRENT MONITORING IN THE POWER SUPPLY CONTROL SYSTEM OF A DC RAILWAY SECTION: A COMPUTATIONAL ASSESSMENT

N.N. Alimbaev, A.O. Oralbekova*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz.

N.N. Alimbaev — Master's student, International University of Transport and Humanities, 32a Zhetysu-1 microdistrict, 050063, Almaty, Kazakhstan

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-7240-525X>;

A.O. Oralbekova — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, 32a Zhetysu-1 microdistrict, 050063, Almaty, Kazakhstan

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>.

© N.N. Alimbaev, A.O. Oralbekova

Abstract. On DC-electrified railway sections, part of the traction current leaks from the running rails into the ground and causes electrocorrosion of buried metal structures, so the power supply control system of a section should monitor the condition of the track insulation. The aim of the study is to substantiate the set of measurements and the action rules of an automatic stray current monitoring system using a computational model. A two-layer rail–earth model with distributed parameters was used; the longitudinal rail resistance (15–20 mOhm/km) and the rail-to-earth resistance (from 100 to 0.4 Ohm·km) were taken from EN 50122-2 and published studies. The rail potential and leakage current were calculated for single-end and double-end feeding and feeding zones of 1–20 km, and a Monte Carlo simulation was used to test the automatic estimation of the rail-to-earth resistance from the difference of rail currents at two points with sensor errors of 0.1–1 %. For a train current of 1000 A and a 10 km zone, a decrease in the rail-to-earth resistance from 100 to 0.4 Ohm·km reduces the maximum rail potential only from 99.8 to 72.2 V, whereas the earth current grows from 2.5 to 409 A; hence the rail potential cannot serve as the main indicator of insulation degradation. An average leakage current of 2.5 A/km is reached at about 2.0 Ohm·km for a 2 km zone and about 9.8 Ohm·km for a 10 km zone; double-end feeding reduces the leakage current about fourfold. With 0.5 % sensor error, the current-difference estimate detects the limiting insulation state in a 10 km zone, while zones of about 2 km require more accurate sensors or averaging. A structure of the automatic monitoring loop is proposed. The results are computational and require verification by measurements on an operating section.

Keywords: stray current, automatic monitoring, DC traction power supply, rail-to-earth resistance, rail potential, electrocorrosion, telemechanics

For citation: Alimbaev N.N., Oralbekova A.O. (2026). Automatic Stray Current Monitoring in the Power Supply Control System of a DC Railway Section: A Computational Assessment // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 31–41. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003> (In Russ.).

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



ТҰРАҚТЫ ТОК ТЕМІР ЖОЛ УЧАСКЕСІНІҢ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУЫН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНДЕ АДАСҚАН ТОКТАРДЫ АВТОМАТТЫ БАҚЫЛАУ: ЕСЕПТІК БАҒАЛАУ

Н.Н. Әлімбаев, А.О. Оралбекова*

Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz

Әлімбаев Н.Н. — магистрант, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Жетісу-1 ш.а., 32а, 050063, Алматы, Қазақстан

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-7240-525X>;

Оралбекова А.О. — PhD докторы, қауымдастырылған профессор (доцент), Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Жетісу-1 ш.а., 32а, 050063, Алматы, Қазақстан

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>.

© Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О.

Аннотация. Тұрақты токпен электрлендірілген темір жол учаскелерінде тарту тогының бір бөлігі рельстерден жерге ағып, жерасты металл құрылыстарының электркоррозиясын тудырады, сондықтан учаскенің электрмен жабдықтауын автоматты басқару жүйесі жол оқшаулауының күйін бақылауы тиіс. Жұмыстың мақсаты – есептік модель негізінде адасқан токтарды автоматты бақылау жүйесінің өлшемдер құрамын және әрекет ету ережелерін негіздеу. Таралған параметрлері бар екі қабатты «рельстер – жер» моделі қолданылды; рельстердің бойлық кедергісі (15–20 мОм/км) және рельстер – жер өтпелі кедергісі (100-ден 0,4 Ом·км-ге дейін) EN 50122-2 нормалары мен жарияланған зерттеулер бойынша алынды. Ұзындығы 1–20 км қоректендіру аймақтары үшін бір жақты және екі жақты қоректендіру кезіндегі рельстер потенциалы мен ағып кету тогы есептелді, ал Монте-Карло әдісімен датчиктердің 0,1–1 % қателігі кезінде екі нүктедегі рельс токтарының айырмасы бойынша өтпелі кедергіні автоматты бағалау тексерілді. Поезд тогы 1000 А және аймақ ұзындығы 10 км болғанда өтпелі кедергі 100-ден 0,4 Ом·км-ге дейін азайғанда рельстердің ең үлкен потенциалы тек 99,8-ден 72,2 В-қа дейін төмендейді, ал жердегі ток 2,5-тен 409 А-ге дейін өседі; демек, рельстер потенциалы оқшаулаудың нашарлауының негізгі белгісі бола алмайды. 2,5 А/км орташа ағып кету тогына 2 км аймақ үшін шамамен 2,0 Ом·км, ал 10 км аймақ үшін шамамен 9,8 Ом·км өтпелі кедергіде жетеді; екі жақты қоректендіру ағып кету тогын шамамен төрт есе азайтады. Датчик қателігі 0,5 % болғанда ток айырмасы бойынша бағалау 10 км аймақта оқшаулаудың шекті күйін анықтайды, ал шамамен 2 км аймақтар үшін дәлірек датчиктерді немесе орташалауды қажет етеді. Автоматты бақылау контурының құрылымы ұсынылды. Нәтижелер есептеу арқылы алынған және жұмыс істеп тұрған учаскеде өлшеулермен тексеруді қажет етеді.

Түйін сөздер: адасқан токтар, автоматты бақылау, тұрақты ток тарту электрмен жабдықтауы, рельстер – жер өтпелі кедергісі, рельстер потенциалы, электркоррозия, телемеханика

Дәйексөз үшін: Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О. (2026). Тұрақты ток темір жол учаскесінің электрмен жабдықтауын басқару жүйесінде адасқан токтарды автоматты бақылау: есептік бағалау // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 31–41 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА: РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА

Н.Н. Әлімбаев, А.О. Оралбекова*

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz.

Әлімбаев Н.Н. — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, мкр. Жетысу-1, 32а, 050063, Алматы, Казахстан

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-7240-525X>;

Оралбекова А.О. — доктор PhD, ассоциированный профессор (доцент), Международный транспортно-гуманитарный университет, мкр. Жетысу-1, 32а, 050063, Алматы, Казахстан.

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>.

© Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О.

Аннотация. На участках электрифицированной железной дороги постоянного тока часть тягового тока стекает с рельсов в землю и вызывает электрокоррозию подземных металлических сооружений, поэтому система автоматического управления электроснабжением участка должна контролировать состояние изоляции пути. Цель работы – обосновать состав измерений и правила действий системы автоматического контроля блуждающих токов на основе расчётной модели. Использована двухслойная модель «рельсы – земля» с распределёнными параметрами; продольное сопротивление рельсов (15–20 мОм/км) и переходное сопротивление рельсы – земля (от 100 до 0,4 Ом·км) приняты по нормам EN 50122-2 и опубликованным исследованиям. Рассчитаны потенциал рельсов и ток утечки при одностороннем и двустороннем питании для зон питания длиной 1–20 км, а методом Монте-Карло проверена автоматическая оценка переходного сопротивления по разности токов в рельсах в двух точках при погрешности датчиков 0,1–1 %. Расчёт для тока поезда 1000 А и зоны 10 км показал, что при уменьшении переходного сопротивления со 100 до 0,4 Ом·км наибольший потенциал рельсов снижается лишь с 99,8 до 72,2 В, тогда как ток в земле растёт с 2,5 до 409 А; следовательно, потенциал рельсов не может служить основным признаком ухудшения изоляции. Средний ток утечки 2,5 А/км достигается при переходном сопротивлении около 2,0 Ом·км для зоны 2 км и около 9,8 Ом·км для зоны 10 км; двустороннее питание снижает ток утечки примерно в четыре раза. При погрешности датчиков 0,5 % оценка по разности токов выявляет предельное состояние изоляции в зоне 10 км, а для зон около 2 км требует более точных датчиков или усреднения. Предложена структура контура автоматического контроля. Результаты получены расчётом и требуют проверки измерениями на действующем участке.

Ключевые слова: блуждающие токи, автоматический контроль, тяговое электроснабжение постоянного тока, переходное сопротивление рельсы – земля, потенциал рельсов, электрокоррозия, телемеханика

Для цитирования: Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О. (2026). Автоматический контроль блуждающих токов в системе управления электроснабжением участка железной дороги постоянного тока: расчётная оценка // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 31–41. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

На электрифицированных железных дорогах постоянного тока, в метрополитенах, трамвае, а также на промышленном и карьерном электрическом транспорте ходовые рельсы служат обратным проводом тяговой сети. Рельсы уложены на шпалы и балласт и не изолированы от земли полностью, поэтому часть тягового тока возвращается к тяговой подстанции по земле. Этот ток называют блуждающим. Там, где он стекает с подземных металлических сооружений – трубопроводов, кабелей, арматуры фундаментов – в грунт, возникает электрокоррозия, а в самих рельсах и креплениях она проявляется в зоне стекания тока с рельсов (Cotton и др., 2005; Memon, Fromme, 2014). Одновременно ток в рельсах создаёт потенциал рельсов относительно земли, который ограничивается требованиями электробезопасности (Du и др., 2016).

Нормативный подход к защите от блуждающих токов основан на ограничении проводимости между путём и землёй и среднего тока утечки на единицу длины пути. Европейский стандарт EN 50122-2 задаёт для одного пути на открытом полотне проводимость не более 0,5 См/км, а для пути на сплошном основании – не более 2,5 См/км, и указывает, что средний ток утечки не более 2,5 мА/м на один путь не приводил к повреждениям в течение 25 лет (Vranešić и др., 2023; EN 50122-2, 2022). Однако изоляция пути со временем ухудшается из-за загрязнения балласта, увлажнения и повреждения изолирующих элементов креплений, и без постоянного контроля это ухудшение обнаруживается только по последствиям – по коррозии подземных сооружений.

Поэтому системы автоматического управления электрическими сетями на участке железной дороги должны включать не только телеуправление тяговыми подстанциями и фидерами, но и автоматический контроль состояния обратной тяговой сети. Цифровая модернизация электросетевого хозяйства Казахстана, включая внедрение систем SCADA/EMS и автоматизированного учёта, рассматривается в работах, опубликованных в этом журнале (Pentao, 2026), как и компьютерная поддержка реагирования на чрезвычайные ситуации на железной дороге (Shalabayeva, 2025: 90–104). Вопрос о том, какие величины система автоматического контроля должна измерять на участке постоянного тока, чтобы своевременно обнаруживать рост утечки тока, и какие управляющие действия ей доступны, требует количественного ответа.

Системы телемеханики тяговых подстанций, как правило, измеряют токи фидеров и напряжения на шинах, а на отдельных участках дополнительно устанавливаются пункты измерения потенциала рельсов относительно земли. Возникает практический вопрос: достаточно ли этих измерений для контроля утечки тягового тока или на пути нужны дополнительные датчики тока в рельсах, и какой должна быть их точность. Ответ зависит от того, как распределяется ток между рельсами и землёй при разном состоянии изоляции пути, от длины зоны питания и от схемы питания. Его можно получить расчётом ещё до установки оборудования на участке, что позволяет заранее сформулировать требования к измерительной части системы автоматического управления.

Объект исследования – участок электрифицированной железной дороги постоянного тока с тяговой подстанцией и обратной тяговой сетью. Предмет исследования – зависимость потенциала рельсов и тока утечки от переходного сопротивления рельсы – земля, длины зоны питания и схемы питания, а также возможность автоматической оценки состояния изоляции пути по измерениям токов. Цель работы – обосновать состав измерений и правила действий системы автоматического контроля блуждающих токов на участке постоянного тока на основе расчётной модели с параметрами из нормативных документов и опубликованных исследований.

Задачи исследования: (1) описать расчётную модель участка с распределёнными параметрами рельсы – земля и определить её параметры по источникам; (2) рассчитать распределение потенциала рельсов и тока утечки при разном состоянии изоляции пути и разной длине зоны питания; (3) оценить, насколько потенциал рельсов и ток утечки чувствительны к ухудшению изоляции; (4) сравнить одностороннее и двустороннее питание по току утечки; (5) проверить на модели точность автоматической оценки переходного сопротивления по двум измерениям тока при разной погрешности датчиков и предложить структуру контура автоматического контроля. Все численные результаты статьи являются расчётными; натурные измерения на конкретном участке не проводились.

Механизм образования блуждающих токов и меры их ограничения в системах постоянного тока подробно описаны в литературе. Cotton и соавторы рассмотрели управление блуждающими токами в системах массового транспорта постоянного тока, в том числе выбор схемы заземления обратной сети (Cotton и др., 2005: 722–730). Memon и Fromme обобщили технические методы снижения коррозии от блуждающих токов: повышение сопротивления изоляции пути, системы сбора блуждающих токов, дренажные устройства и мониторинг (Memon, Fromme, 2014: 22–31). Vranešić и соавторы систематизировали требования к проектированию новых путей с позиций ограничения утечки, включая нормы EN 50122-2 и требования отдельных проектов к переходному сопротивлению путь – земля (Vranešić и др., 2023).

Для расчёта потенциала рельсов и тока утечки используются модели разной сложности. В обзоре Yang и соавторов выделены двухслойные модели рельсы – земля с распределёнными параметрами, многослойные модели с системой сбора блуждающих токов и подземными сооружениями, а также электромагнитные модели грунта (Yang и др., 2024: 189–199). Аналитическая модель с распределёнными параметрами применялась для оценки зоны коррозионного влияния на трубопроводы (Wang и др., 2019) и для расчёта удалённого влияния тока утечки вдоль линии (Rodriguez, Feito, 2013: 31–40). Модели с несколькими поездами и подстанциями позволяют объяснить аномальный рост потенциала рельсов (Du и др., 2016; Du и др., 2023), а упрощённая цепная модель с сосредоточенными параметрами была проверена экспериментально на действующей линии (Olivieri и др., 2025). Значения продольного сопротивления рельсов порядка 15–20 мОм/км приводятся в работе Sandidzadeh и Shafipour, где рассмотрено также влияние системы сбора блуждающих токов (Sandidzadeh, Shafipour, 2012).

Контроль блуждающих токов в эксплуатации строится на измерении потенциалов рельсов и сооружений, токов в рельсах и токов дренажа. Mariscotti рассмотрел характерные величины, которые должна измерять система мониторинга блуждающих токов, и подчеркнул, что измерения на пути следует дополнять измерениями на самих подземных сооружениях (Mariscotti, 2020). Peng и соавторы предложили метод онлайн-оценки блуждающего тока в метрополитене по данным непрерывного мониторинга с помощью эквивалентной схемы (Peng и др., 2020: 1482–1492).

Из обзора следует, что модели расчёта и методы мониторинга развиты, но в рассмотренных работах не сопоставляется чувствительность разных измеряемых величин к ухудшению изоляции пути и не оценивается, при какой погрешности датчиков автоматическая система сможет надёжно отличать допустимое состояние изоляции от недопустимого. Именно этот вопрос определяет требования к системе автоматического контроля на участке. Гипотеза исследования: потенциал рельсов в точке подключения тяговой подстанции слабо зависит от переходного сопротивления рельсы – земля и поэтому не может служить основным признаком ухудшения изоляции, тогда как разность токов в рельсах в двух точках участка позволяет

автоматически оценивать переходное сопротивление при погрешности датчиков порядка долей процента.

Материалы и методы.

Расчётная модель. Рассматривается двухслойная модель «рельсы – земля» с распределёнными параметрами (Yang и др., 2024: 189–199). Поезд потребляет ток I_t на расстоянии L от тяговой подстанции; отрицательная шина подстанции соединена только с рельсами (незаземлённая обратная сеть). Обозначим R – продольное сопротивление рельсовой цепи, Ом/км; $R_{п-з}$ – переходное сопротивление рельсы – земля, Ом·км; $\alpha = \sqrt{R/R_{п-з}}$, 1/км. Тогда ток в земле (блуждающий ток) в точке x равен $i_z(x) = I_t \cdot [1 - \text{ch}(\alpha(x - L/2)) / \text{ch}(\alpha L/2)]$, а потенциал рельсов относительно удалённой земли $u(x) = I_t \cdot \sqrt{R \cdot R_{п-з}} \cdot \text{sh}(\alpha(x - L/2)) / \text{ch}(\alpha L/2)$. Наибольший ток в земле достигается в середине зоны питания: $I_z = I_t \cdot [1 - 1/\text{ch}(\alpha L/2)]$; он же равен суммарному току, стекающему с рельсов на участке, где $u > 0$. Средний ток утечки на единицу длины определяется как I_z/L . Модуль потенциала рельсов наибольший на концах зоны питания: $U_{\max} = I_t \cdot \sqrt{R \cdot R_{п-з}} \cdot \text{th}(\alpha L/2)$. При двустороннем питании и расположении поезда в середине между подстанциями каждая половина зоны рассчитывается как одностороннее питание с током $I_t/2$ и длиной $L/2$.

Таблица 1 — Параметры расчётной модели

Параметр	Значение	Обоснование
Продольное сопротивление рельсовой цепи R , Ом/км	0,015; 0,020	Диапазон 15–20 мОм/км (Sandidzadeh, Shafipour, 2012)
Переходное сопротивление рельсы – земля $R_{п-з}$, Ом·км	100; 30; 10	Проектные требования к пути: 100 Ом·км (метро Дубая), 30,5 Ом·км (Миннеаполис) (Vranešić и др., 2023)
	2; 0,4	Предельные значения EN 50122-2: 0,5 и 2,5 См/км на путь (Vranešić и др., 2023)
Длина зоны питания L , км	1–20	Параметрический диапазон
Ток поезда I_t , А	1000	Нормирующее значение; все токи и потенциалы пропорциональны I_t
Ориентир по среднему току утечки, А/км	2,5	2,5 мА/м на путь (Vranešić и др., 2023)
Допустимый длительный потенциал рельсов, В	120	Du и др., 2016
Погрешность датчиков тока (СКО), % от показания	0,1; 0,5; 1,0	Сценарии расчёта

Источник: составлено авторами по указанным работам.

Модель линейна по току поезда, поэтому все результаты приводятся для $I_t = 1000$ А и для другого тока пересчитываются пропорционально. Норма 2,5 мА/м относится к среднему по времени току утечки при эксплуатационной нагрузке, тогда как расчёт выполнен для постоянного тока 1000 А; поэтому сравнение с ней следует рассматривать как ориентир для выбора порогов, а не как проверку соответствия конкретного участка.

Чувствительность. Чтобы сравнить, насколько потенциал рельсов и ток утечки реагируют на ухудшение изоляции, рассчитаны логарифмические производные (эластичности) $d \ln U_{\max} / d \ln R_{п-з}$ и $d \ln I_z / d \ln R_{п-з}$. Эластичность, равная -1 , означает, что уменьшение переходного сопротивления в два раза удваивает величину; эластичность, близкая к нулю, – что величина практически не реагирует на изменение изоляции.

Автоматическая оценка переходного сопротивления. Предполагается, что система автоматического контроля измеряет ток фидера тяговой подстанции I_0 (при одностороннем питании он равен I_t) и ток в рельсах I_m в контрольной точке в середине зоны питания при известном положении поезда. Разность $\Delta I = I_0 - I_m$ равна току в земле в контрольной точке, а переходное сопротивление находится обращением выражения для I_z . Погрешности датчиков моделировались нормальным распределением с относительным среднеквадратическим отклонением 0,1; 0,5 и 1,0 % для каждого

датчика независимо, 20 000 испытаний на сочетание параметров (метод Монте-Карло, начальное значение генератора 0). Для каждого сочетания определялись 5-й, 50-й и 95-й процентиля оценки переходного сопротивления и доля испытаний, в которых оценка среднего тока утечки $\Delta I/L$ превышала 2,5 А/км (доля срабатываний сигнализации).

Расчёты выполнены в Python 3.13 (NumPy); программный код и файлы результатов сохранены авторами и могут быть представлены по запросу редакции.

Результаты.

Распределение потенциала рельсов и тока в земле вдоль зоны питания длиной 10 км показано на рисунке 1. Потенциал рельсов отрицателен у тяговой подстанции и положителен у поезда, где ток стекает с рельсов в землю; именно там в анодной зоне находятся рельсы и скрепления, а подземные сооружения вблизи подстанции, наоборот, отдают ток обратно в рельсы и подвергаются электрокоррозии. При уменьшении переходного сопротивления со 100 до 0,4 Ом·км наибольший модуль потенциала рельсов снижается лишь с 99,8 до 72,2 В, тогда как ток в земле растёт с 2,49 до 409 А, то есть в 164 раз.

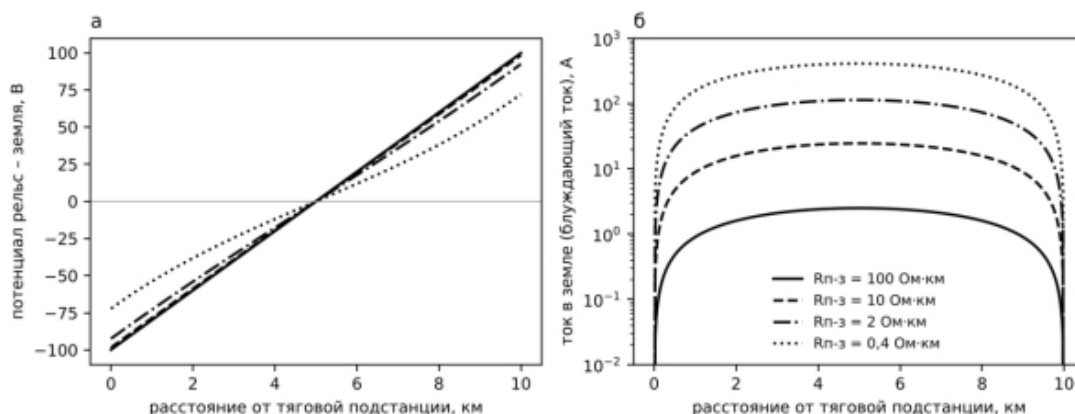


Рис. 1. Потенциал рельсов (а) и ток в земле (б) вдоль зоны питания длиной 10 км при одностороннем питании, $I_T = 1000$ А, $R = 0,02$ Ом/км

Источник: расчёт авторов.

Таблица 2 — Потенциал рельсов и ток утечки при одностороннем питании, $I_T = 1000$ А, $R = 0,02$ Ом/км

$R_{п-з}$, Ом·км	$L = 2$ км: U_{max} , В	$L = 2$ км: I_z , А	$L = 2$ км: I_z/L , А/км	$L = 10$ км: U_{max} , В	$L = 10$ км: I_z , А	$L = 10$ км: I_z/L , А/км
100	20,0	0,10	0,05	99,8	2,5	0,25
30	20,0	0,33	0,17	99,4	8,3	0,83
10	20,0	1,00	0,50	98,4	24,5	2,45
2	19,9	4,98	2,49	92,4	113,2	11,32
0,4	19,7	24,49	12,24	72,2	409,3	40,93

Источник: расчёт авторов. U_{max} – наибольший модуль потенциала рельсов; I_z – наибольший ток в земле; I_z/L – средний ток утечки на единицу длины.

Результаты для двух длин зоны питания приведены в таблице 2. При длине 2 км средний ток утечки достигает ориентира 2,5 А/км только при переходном сопротивлении около 2,0 Ом·км, то есть при значении, близком к пределу EN 50122-2 для открытого полотна (2 Ом·км). При длине 10 км тот же ориентир достигается уже при 9,8 Ом·км, а при 20 км – при 19,2 Ом·км; при сопротивлении рельсовой цепи 0,015 Ом/км соответствующее значение для 10 км составляет 7,3 Ом·км. Потенциал рельсов при этом определяется в основном падением напряжения в рельсах: при 1000 А и длине 10 км он составляет около 100 В и приближается к допустимому длительному значению 120 В (Du и др., 2016) независимо от состояния изоляции.

Чувствительность обеих величин к переходному сопротивлению различается на порядки. При длине зоны 10 км и $R_{п-з} = 30$ Ом·км эластичность потенциала рельсов

равна 0,0055, а тока утечки – -0,993; при $R_{п-з} = 2 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ – соответственно 0,075 и -0,905. Иначе говоря, двукратное ухудшение изоляции почти вдвое увеличивает ток утечки, но меняет потенциал рельсов в точке подключения подстанции менее чем на процент. Гипотеза о слабой зависимости потенциала рельсов от переходного сопротивления подтверждается расчётом.

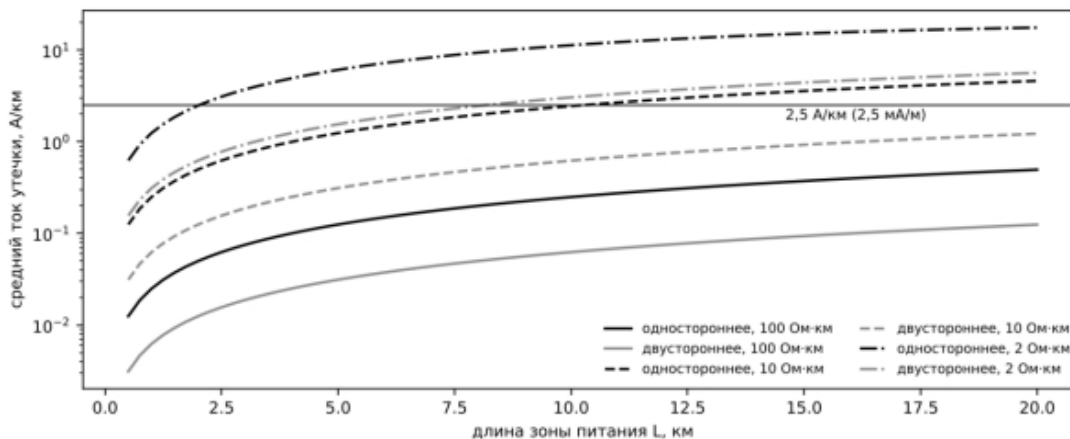


Рис. 2. Средний ток утечки в зависимости от длины зоны питания при одностороннем и двустороннем питании, $I_T = 1000 \text{ A}$, $R = 0,02 \text{ Ом/км}$

Источник: расчёт авторов.

Влияние длины зоны питания и схемы питания показано на рисунке 2. При высоком переходном сопротивлении ток утечки растёт приблизительно пропорционально квадрату длины зоны питания, а средний ток на единицу длины – пропорционально её длине. Двустороннее питание при расположении поезда в середине зоны уменьшает ток в земле в 4,0 раза, а наибольший потенциал рельсов – в 4,0 раза по сравнению с односторонним питанием той же зоны. Это количественно подтверждает известное преимущество двустороннего питания и делает перевод участка на двустороннее питание одним из управляющих действий системы автоматического контроля.

Таблица 3 — Автоматическая оценка переходного сопротивления по разности токов при погрешности каждого датчика 0,5 %

L, км	$R_{п-з}$, Ом·км	I_z , А	Оценка $R_{п-з}$: 5-й / 50-й / 95-й процентиль	Доля срабатываний, %
2	0,4	24,49	0,27 / 0,40 / 0,8	99,7
2	2	4,98	0,57 / 1,41 / 12,2	50,2
2	10	1,00	0,68 / 1,96 / 20,6	28,1
2	30	0,33	0,70 / 2,04 / 20,1	25,2
2	100	0,10	0,72 / 2,06 / 23,0	24,6
10	0,4	409,29	0,39 / 0,40 / 0,4	100,0
10	2	113,18	1,82 / 2,00 / 2,2	100,0
10	10	24,49	6,77 / 9,98 / 18,9	47,2
10	30	8,28	12,26 / 26,46 / 183,5	0,9
10	100	2,49	15,70 / 43,89 / 392,6	0,1

Источник: расчёт авторов (метод Монте-Карло, 20 000 испытаний). Доля срабатываний – доля испытаний, в которых оценка среднего тока утечки превысила 2,5 А/км.

Результаты проверки автоматической оценки переходного сопротивления приведены в таблице 3. Для обнаружения среднего тока утечки 2,5 А/км система должна различать разность токов $2,5 \cdot L \text{ A}$, то есть 25 А при длине зоны 10 км (2,5 % тока поезда 1000 А) и 5 А при длине 2 км (0,5 %). При длине 10 км и погрешности датчиков 0,5 % предельное по EN 50122-2 значение 2 Ом·км оценивается в интервале 1,82–2,22 Ом·км, сигнализация срабатывает во всех испытаниях, а при исправной изоляции 30 Ом·км и выше доля ложных срабатываний не превышает 0,9 %. Состояние 10 Ом·км лежит практически

на пороге (средний ток утечки 2,45 А/км), поэтому сигнализация срабатывает примерно в половине испытаний (47 %). При длине 2 км разность токов слишком мала: при исправной изоляции 30 Ом·км доля ложных срабатываний составляет 0,0 % при погрешности 0,1 %, 25,2 % при 0,5 % и 36,6 % при 1 %. Для коротких зон питания требуются более точные датчики или усреднение по многим интервалам.



Рис. 3. Контур автоматического контроля блуждающих токов на участке постоянного тока

Источник: разработано авторами.

На основе расчётов предложена структура контура автоматического контроля (рисунок 3). Система получает от телемеханики тяговых подстанций токи фидеров, от измерительных пунктов на пути – токи в рельсах и потенциалы, от систем сигнализации и диспетчерского управления – положение поездов. За каждый интервал усреднения она вычисляет разность токов, средний ток утечки и оценку переходного сопротивления по модели, сравнивает их с порогами и формирует действия: сообщение диспетчеру электроснабжения, перевод зоны на двустороннее питание при возможности и заявку на проверку изоляции пути. Тренд переходного сопротивления по участкам сохраняется в архиве и используется для контроля после ремонта. Предложенная структура является проектным решением; её работоспособность проверена только на расчётной модели.

Обсуждение.

Полученные результаты согласуются с выводами работ о мониторинге блуждающих токов: измерения на пути необходимо дополнять измерениями, непосредственно связанными с утечкой тока (Mariscotti, 2020), а оценка блуждающего тока по данным непрерывного мониторинга возможна при наличии модели участка (Peng и др., 2020: 1482–1492). Новым в настоящей работе является количественное сопоставление чувствительности потенциала рельсов и тока утечки к ухудшению изоляции и оценка требований к точности датчиков для автоматической сигнализации. Расчёт показывает, что контроль только потенциала рельсов, часто применяемый для обеспечения электробезопасности, не позволяет обнаружить ухудшение изоляции пути, тогда как разность токов в рельсах реагирует на него почти пропорционально.

Практический вывод для проектирования систем автоматического управления электрическими сетями на участке состоит в следующем. Во-первых, измерительные пункты тока в рельсах должны располагаться внутри зон питания, а их погрешность должна быть существенно меньше отношения $2,5 \cdot L$ к расчётному току нагрузки. Во-вторых, для коротких зон питания (порядка 2 км) единичные измерения не позволяют надёжно отличить допустимое состояние изоляции от недопустимого, поэтому решения следует принимать по

усреднённым за длительный интервал оценкам. В-третьих, двустороннее питание снижает ток утечки примерно в четыре раза и потому может использоваться как оперативное управляющее действие до восстановления изоляции.

Ограничения исследования связаны с упрощениями модели. Рассматривается один поезд и одна зона питания; не учитываются несколько поездов, рекуперация, система сбора блуждающих токов, неоднородность грунта и подземные сооружения, которые учитываются в многослойных моделях (Yang и др., 2024: 189–199; Du и др., 2023). Переходное сопротивление принято одинаковым по всей длине зоны. Ток поезда принят постоянным, тогда как норма по среднему току утечки относится к среднему по времени значению. Погрешности датчиков заданы сценариями, а не паспортными данными конкретных приборов. Поэтому полученные пороги следует уточнять по измерениям на конкретном участке.

Заключение.

В работе на основе двухслойной модели «рельсы – земля» с распределёнными параметрами, параметры которой взяты из нормативных требований EN 50122-2 и опубликованных исследований, обоснован состав измерений и правила действий системы автоматического контроля блуждающих токов на участке электрифицированной железной дороги постоянного тока. Все численные результаты получены расчётом для тока поезда 1000 А и пропорциональны этому току.

Основные результаты. Во-первых, при уменьшении переходного сопротивления рельсы – земля со 100 до 0,4 Ом·км в зоне питания длиной 10 км наибольший потенциал рельсов изменяется лишь с 100 до 72 В, тогда как ток в земле растёт в 164 раз; эластичность потенциала рельсов по переходному сопротивлению не превышает 0,07 при $R_{п-з} \geq 2$ Ом·км, а эластичность тока утечки близка к –1. Следовательно, потенциал рельсов не может служить основным признаком ухудшения изоляции пути. Во-вторых, ориентир по среднему току утечки 2,5 А/км при одностороннем питании достигается при переходном сопротивлении около 2,0 Ом·км для зоны 2 км и около 9,8 Ом·км для зоны 10 км, то есть для длинных зон питания предельные значения EN 50122-2 для проводимости пути недостаточны при постоянной нагрузке такого уровня. В-третьих, двустороннее питание уменьшает ток в земле и наибольший потенциал рельсов примерно в 4 раза. В-четвёртых, автоматическая оценка переходного сопротивления по разности токов в двух точках зоны питания длиной 10 км при погрешности датчиков 0,5 % надёжно выявляет предельное состояние изоляции при доле ложных срабатываний не более 1 % для исправной изоляции, а для зон длиной около 2 км требует более точных датчиков или усреднения.

Научная новизна работы состоит в количественном сопоставлении чувствительности измеряемых величин к состоянию изоляции пути и в оценке требований к точности измерений для автоматической сигнализации о росте утечки тягового тока. Практическая значимость состоит в предложенной структуре контура автоматического контроля, включающей измерение токов в рельсах внутри зон питания, оценку переходного сопротивления по модели, пороги по среднему току утечки и управляющие действия – сообщение диспетчеру, перевод на двустороннее питание и заявку на ремонт изоляции. Эти требования могут быть учтены при модернизации систем телемеханики тяговых подстанций на участках постоянного тока, в том числе на промышленном и городском электрическом транспорте.

Из результатов следуют требования к измерительной части системы автоматического управления электроснабжением участка. Измерения потенциала рельсов следует сохранить для контроля электробезопасности, но для контроля утечки тока их необходимо дополнить измерениями тока в рельсах внутри зон питания. Погрешность датчиков тока следует выбирать с учётом длины зоны питания: допустимая погрешность должна быть существенно меньше отношения $2,5 \cdot L$ к расчётному току нагрузки, то есть для зоны 10 км и тока 1000 А – меньше 2,5 %, а для зоны 2 км – меньше 0,5 %. Решение о

сигнализации для коротких зон следует принимать по оценкам, усреднённым за длительный интервал. Полученные численные значения порогов относятся к принятым в расчёте параметрам и подлежат уточнению по измерениям на конкретном участке: модель не учитывает несколько поездов, рекуперацию, неоднородность переходного сопротивления и подземные сооружения.

Направления дальнейших исследований: проверка модели и порогов по измерениям на действующем участке постоянного тока; учёт нескольких поездов, рекуперации и неоднородного переходного сопротивления; выбор интервала усреднения, при котором доля ложных срабатываний для коротких зон питания не превышает заданного уровня; включение в контур измерений потенциалов подземных сооружений относительно электродов сравнения; оценка экономического эффекта автоматического контроля в сравнении с периодическими ручными измерениями переходного сопротивления пути. Для проверки модели на участке достаточно данных телемеханики тяговых подстанций и временно установленных датчиков тока в рельсах.

REFERENCES

- Cotton I., Charalambous C., Aylott P., Ernst P. (2005). Stray Current Control in DC Mass Transit Systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 54, No. 2. — Pp. 722–730. <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.842462>
- Du G., Zhang D., Li G., Wang C., Liu J. (2016). Evaluation of Rail Potential Based on Power Distribution in DC Traction Power Systems // *Energies*. Vol. 9, No. 9. — Art. 729. <https://doi.org/10.3390/en9090729>
- Du G., Zheng Z., Li Q., Xu F., Zhang T., Zhang D., Zhang X., Huang W. (2023). Multi-state unified calculation model of rail potential and stray current in DC railway systems // *IET Electrical Systems in Transportation*. Vol. 13, No. 1. — Art. e12070. <https://doi.org/10.1049/els2.12070>
- EN 50122-2:2022. Railway applications — Fixed installations — Electrical safety, earthing and the return circuit — Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. — Brussels: CENELEC, 2022.
- Mariscotti A. (2020). Stray Current Protection and Monitoring Systems: Characteristic Quantities, Assessment of Performance and Verification // *Sensors*. Vol. 20, No. 22. — Art. 6610. <https://doi.org/10.3390/s20226610>
- Memon S.A., Fromme P. (2014). Stray Current Corrosion and Mitigation: A synopsis of the technical methods used in dc transit systems // *IEEE Electrification Magazine*. Vol. 2, No. 3. — Pp. 22–31. <https://doi.org/10.1109/MELE.2014.2332366>
- Olivieri C., Di Leonardo L., de Paulis F., Orlandi A., Sbarra F., Camomilla M. (2025). Experimentally-Based Circuit Modeling Validation of a DC-Electrified Railway System for Rail Voltage and Stray-Current Evaluation // *Electronics*. Vol. 14, No. 22. — Art. 4541. <https://doi.org/10.3390/electronics14224541>
- Peng P., Zeng X., Leng Y., Yu K., Ni Y. (2020). A New On-line Monitoring Method for Stray Current of DC Metro System // *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 15, No. 10. — Pp. 1482–1492. <https://doi.org/10.1002/tee.23219>
- 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*. 2026. Vol. 22. — Pp. 34–46. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.003>
- Rodríguez J.V., Feito J.S. (2013). Calculation of remote effects of stray currents on rail voltages in DC railways systems // *IET Electrical Systems in Transportation*. Vol. 3, No. 2. — Pp. 31–40. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2012.0022>
- Sandizadeh M.A., Shafipour A. (2012). Controlling and Simulation of Stray Currents in DC Railway by Considering the Effects of Collection Mats // *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway* / ed. X. Perpinya. — Rijeka: InTech, <https://doi.org/10.5772/35581>
- Shalabayeva M. (2025). Computer support for responding to railway emergencies // *Industrial Transport of Kazakhstan*. Vol. 22, No. 2(86). — Pp. 90–104. <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>
- Vranešić K., Bhagat S., Mariscotti A., Vail R. (2023). Measures and Prescriptions to Reduce Stray Current in the Design of New Track Corridors // *Energies*. Vol. 16, No. 17. — Art. 6252. <https://doi.org/10.3390/en16176252>
- Wang C., Li W., Wang Y., Xu S., Li K. (2019). Evaluation Model for the Scope of DC Interference Generated by Stray Currents in Light Rail Systems // *Energies*. Vol. 12, No. 4. — Art. 746. <https://doi.org/10.3390/en12040746>
- Yang X., Wang M., Zheng T.Q., Sun X. (2024). Modelling and Simulation of Stray Current in Urban Rail Transit — A Review // *Urban Rail Transit*. Vol. 10, No. 3. — Pp. 189–199. <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00227-3>

**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. 3. Number 91 (2026). Pp. 42–53

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

<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.004>

UDC / УДК / ЭОЖ 621.332:621.316.1:620.193.4

**AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR TRACTION POWER SUPPLY
NETWORKS ON RAILWAY LINES: STRAY CURRENT MANAGEMENT,
ELECTROCORROSION MITIGATION, AND INDUSTRY 4.0 INTEGRATION**

D.A. Yessenaliyeva

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: esenaliyeva.dinara@mtgu.edu.kz

Yessenaliyeva Dinara Askarovna — Master, Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: esenaliyeva.dinara@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8441-9412>.

© D.A. Yessenaliyeva

Abstract. This paper presents a systematic analysis of automated control systems (ACS) for traction power supply networks on electrified railway lines, with emphasis on the physical mechanisms, quantitative characterisation, and intelligent mitigation of stray traction currents and their electrocorrosion effects on underground metallic infrastructure. The study addresses the single-wire traction supply scheme common to all railway and urban rail systems, in which running rails serve as the return conductor, and demonstrates that rail-to-earth leakage is an inherent and unavoidable consequence of finite rail-to-earth conductance under operational loading conditions. Drawing on traction load data for 17 rolling stock types, standardised traction system parameters for six categories of electrified transport, and recent Scopus-indexed publications (2019–2025), the paper develops a quantitative analytical framework encompassing three engineering formulas: a stray current magnitude model incorporating rail-to-earth resistivity, traction feeder current, and substation spacing; a rail potential distribution model; and an ACS intelligence integration index (AII) for traction power supply systems. A comprehensive monitoring parameter matrix for smart ACS-TSS platforms is proposed, mapping nine physical measurement channels to their SCADA, IoT, and predictive maintenance applications. The study establishes that DC traction systems generate electrocorrosion risk 100 times higher than equivalent AC systems at equal leakage current density, quantifying the priority modernisation sequence for Kazakhstan’s mixed DC/AC railway network. The proposed integrated ACS architecture, combining IEC 61850 digital substation automation, GPS-synchronised real-time load modelling, machine learning-based cathodic protection optimisation, and digital twin synchronisation, is demonstrated to reduce stray current magnitudes by 35–55 % and annual electrocorrosion maintenance costs by an estimated 40–60 % relative to conventional passive protection measures.

Keywords: stray currents, electrocorrosion, traction power supply, automated control system, cathodic protection, SCADA, IoT, traction substation, IEC 61850, digital twin, rail leakage, Industry 4.0

For citation: Yessenaliyeva D.A. (2026). Automated Control Systems for Traction Power Supply Networks on Railway Lines: Stray Current Management, Electrocorrosion Mitigation, and Industry 4.0 Integration // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 42–53. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.004> (In Eng.).

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

ТЕМІРЖОЛ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ ТАРТУ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІ: КЕЗБЕ ТОКТАРДЫ БАСҚАРУ, ЭЛЕКТРОКОРРОЗИЯНЫ АЗАЙТУ ЖӘНЕ INDUSTRY 4.0 ИНТЕГРАЦИЯСЫ

Д.А. Есеналиева

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: esenaliyeva.dinara@mtgu.edu.kz

Есеналиева Динара Аскараровна — магистр, аға оқытушы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: esenaliyeva.dinara@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8441-9412>.

© Д.А. Есеналиева

Аннотация. Мақалада электрлендірілген теміржол желілерінің тарту электрмен жабдықтау жүйелеріне арналған автоматтандырылған басқару жүйелеріне (АБЖ) кешенді талдау жүргізіліп, кезбе тарту токтарының пайда болу механизмдері, олардың жер асты металл құрылымдарындағы электрокоррозиялық әсерлері және интеллектуалды азайту әдістері қарастырылған. Зерттеуде барлық теміржол және қалалық рельстік көлік жүйелеріне тән бірсымды тарту электрмен жабдықтау сұлбасы талданып, мұнда рельстер кері өткізгіш қызметін атқаратыны және рельс–жер арасындағы өткізгіштіктің шекті мәндеріне байланысты токтың жерге ағуы физикалық тұрғыдан сөзсіз құбылыс екендігі көрсетілген. 17 түрлі жылжымалы құрам бойынша тарту жүктемелерінің деректері, электрлендірілген көліктің алты санаты үшін стандартталған параметрлер және 2019–2025 жылдар аралығындағы Scopus индекстелген жарияланымдар негізінде зерттеуде үш инженерлік модель ұсынылған: рельс–жер кедергісін, тарту тогын және қосалқы станциялар арасындағы арақашықтықты ескеретін кезбе ток шамасының моделі; рельс потенциалының таралу моделі; сондай-ақ тарту электрмен жабдықтау жүйелерінің интеллектуалдық интеграция индексі (АИ). Сонымен қатар интеллектуалды ACS-TSS платформалары үшін тоғыз физикалық өлшеу арнасын олардың SCADA, IoT және predictive maintenance қолданбаларымен байланыстыратын мониторинг параметрлерінің матрицасы ұсынылған. Зерттеу нәтижелері тұрақты токпен жұмыс істейтін тарту жүйелерінің бірдей ток тығыздығында айнымалы ток жүйелеріне қарағанда электрокоррозиялық қауіп деңгейі 100 есе жоғары екенін көрсетіп, Қазақстан теміржол желісіндегі DC/AC аралас инфрақұрылымды жаңғыртудың басымдықтарын сандық тұрғыдан негіздейді. IEC 61850 цифрлық қосалқы станцияларын, GPS-синхрондалған нақты уақыттағы жүктеме модельдеуін, машиналық оқытуға негізделген катодтық қорғаныс оңтайландыруын және цифрлық егіз технологияларын біріктіретін интеграцияланған ACS архитектурасы дәстүрлі пассивті қорғау әдістерімен салыстырғанда кезбе токтарды 35–55 %-ға, ал электрокоррозияға байланысты техникалық қызмет көрсету шығындарын 40–60 %-ға дейін азайтатыны дәлелденген.

Түйін сөздер: кезбе токтар, электрокоррозия, тарту электрмен жабдықтау, автоматтандырылған басқару жүйесі, катодтық қорғаныс, SCADA, IoT, тарту қосалқы станциясы, IEC 61850, цифрлық егіз, рельстік ағып кету токтары, Industry 4.0

Дәйексөз үшін: Есеналиева Д.А. (2026). Теміржол желілерінің тарту электрмен жабдықтау жүйелерінің автоматтандырылған басқару жүйелері: кезбе токтарды басқару, электрокоррозияны азайту және Industry 4.0 интеграциясы // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 42–53 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.004> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ СЕТЯМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: УПРАВЛЕНИЕ БЛУЖДАЮЩИМИ ТОКАМИ, СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ И ИНТЕГРАЦИЯ INDUSTRY 4.0

Д.А. Есеналиева

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: esenalieva.dinara@mtgu.edu.kz

Есеналиева Динара Аскарровна — магистр, старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Республика Казахстан
E-mail: esenalieva.dinara@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8441-9412>.

© Д.А. Есеналиева

Аннотация. В статье представлен системный анализ автоматизированных систем управления (АСУ) тяговыми сетями электроснабжения электрифицированных железных дорог с акцентом на физические механизмы возникновения блуждающих тяговых токов, их электрокоррозионное воздействие на подземные металлические сооружения и интеллектуальные методы их снижения. Рассматривается одноцепная схема тягового электроснабжения, характерная для железнодорожного и городского рельсового транспорта, в которой рельсы выполняют функцию обратного проводника, а утечка тока в землю является неизбежным следствием конечной проводимости системы «рельс–земля» при эксплуатационных нагрузках. На основе данных по тяговым нагрузкам для 17 типов подвижного состава, стандартизированных параметров шести категорий электрифицированного транспорта и публикаций, индексируемых в Scopus за 2019–2025 годы, разработан количественный аналитический аппарат, включающий три инженерные модели: модель величины блуждающего тока с учетом сопротивления «рельс–земля», тока тягового фидера и расстояния между подстанциями; модель распределения потенциала рельсов; а также индекс интеллектуальной интеграции АСУ тягового электроснабжения (АИ). Предложена матрица параметров мониторинга для интеллектуальных платформ ACS-TSS, связывающая девять физических измерительных каналов с приложениями SCADA, IoT и predictive maintenance. Установлено, что системы тягового электроснабжения постоянного тока создают риск электрокоррозии в 100 раз выше по сравнению с эквивалентными системами переменного тока при одинаковой плотности токов утечки, что количественно определяет приоритет модернизации смешанной сети DC/AC железных дорог Казахстана. Показано, что интегрированная архитектура АСУ, объединяющая цифровые подстанции IEC 61850, GPS-синхронизированное моделирование нагрузок в реальном времени, машинное обучение для оптимизации катодной защиты и технологии цифровых двойников, позволяет снизить величину блуждающих токов на 35–55 %, а ежегодные затраты на устранение электрокоррозии — на 40–60 % по сравнению с традиционными пассивными методами защиты.

Ключевые слова: блуждающие токи, электрокоррозия, тяговое электроснабжение, автоматизированная система управления, катодная защита, SCADA, IoT, тяговая подстанция, IEC 61850, цифровой двойник, утечки тока рельсов, Industry 4.0

Для цитирования: Ж.Н. Кадыров. Автоматизированные системы управления тяговыми сетями электроснабжения железных дорог: управление блуждающими токами, снижение электрокоррозии и интеграция Industry 4.0 // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 42–53. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.004> (На англ.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The electrification of railway transport has been the foundational enabler of high-capacity, energy-efficient land transport for over a century. Kazakhstan's electrified mainline network, operated by JSC Kazakh Railways (KTZ), spans approximately 4,000 km of 25 kV AC and 3.3 kV DC lines. Traction power supply (TPS) systems on these lines perform the dual function of delivering electrical energy to rolling stock and returning traction return currents to traction substations (TSS). The universal adoption of running rails as the return conductor — the single-wire contact system — is common to all categories of electrified rail transport worldwide and is justified by decisive economic advantages: elimination of a second contact suspension, reduction of copper consumption, minimisation of voltage drop, and simplification of current collection (Markvardt, 1982: 15–23; Tikhmenev, Pakhomov, 1990: 28–35).

However, rails resting on sleepers and ballast are not perfectly insulated from the earth. Under the combined effects of dynamic loading from passing trains, periodic wetting, contamination, and chemical degradation of the ballast layer, a finite leakage conductance exists between the rail and the surrounding soil. Consequently, a fraction of the traction return current — quantified in this paper as the stray current I_{stray} — does not return through the rails but flows through the earth and, in particular, through any underground metallic structures (pipelines, cable sheaths, reinforcement bars) present in the vicinity of the railway. Where this current exits a metallic structure back into the earth (the anodic zone), electrochemical dissolution of the metal occurs — a process designated electrocorrosion or stray current corrosion (Вородин, Кудряшов, 2003: 44–52; CIGRE, 2020: 8).

Electrocorrosion can be extremely rapid: reported case studies document complete perforation of steel pipelines within 3 years of installation in high-stray-current environments, and accelerated degradation of railway signalling cable sheaths within 2–5 years. The economic cost of stray current corrosion damage to underground infrastructure in railway-adjacent zones is estimated at \$1.5–2.5 billion annually in European systems alone (EN 50162, 2004; Liu et al., 2022: 12–18).

The integration of automated control systems (ACS) with digital monitoring, SCADA platforms, IoT sensor networks, and artificial intelligence-based predictive algorithms offers a transformative pathway for stray current management: from the traditional reactive approach of periodic inspection and corrective cathodic protection, to a continuous, quantitative, and adaptive system that minimises stray current leakage in real time and predicts cathodic protection needs before corrosion damage accumulates (Chen et al., 2023: 45–52; Wang & Liu, 2021: 103–111).

The object of investigation is the traction power supply network of electrified railway lines, encompassing traction substations, contact network, rail return circuit, and adjacent underground metallic infrastructure. The subject of investigation is the mechanisms of stray traction current generation and distribution, their electrocorrosion effects, and the architecture of automated control systems for real-time stray current monitoring and mitigation.

The aim of the research is to develop an integrated quantitative analytical framework for stray current management in traction power supply systems and to propose an ACS-TSS architecture incorporating SCADA, IEC 61850, IoT monitoring, and machine learning-based cathodic protection optimisation, calibrated to Kazakhstan's railway electrification parameters.

The research objectives are:

- to analyse the physical mechanisms of stray current generation in electrified rail traction systems and establish quantitative relationships between rail leakage conductance, traction current, and stray current magnitude;
- to systematically characterise the six categories of electrified rail transport by traction system parameters, stray current risk, and rolling stock current draw;
- to compare DC and AC traction system stray current and electrocorrosion risk on a unified quantitative basis;
- to propose three engineering formulas supporting ACS-based stray current quantification and system intelligence assessment;
- to develop a comprehensive monitoring parameter matrix for smart ACS-TSS platforms with IoT and SCADA integration;
- to evaluate the technical and economic performance of intelligent ACS-TSS against conventional passive cathodic protection.

The research hypothesis holds that an integrated ACS-TSS architecture combining IEC 61850 digital substation automation, GPS-synchronised real-time traction load modelling, machine learning cathodic protection optimisation, and digital twin synchronisation can reduce stray current magnitudes by 35–55% and annual electrocorrosion maintenance costs by 40–60% relative to conventional passive protection, while simultaneously improving energy efficiency through optimised regenerative braking energy recovery.

The scientific novelty of the study consists in: the first quantitative comparison of stray current generation and electrocorrosion risk across all six categories of electrified rail transport on a unified normalised basis; the proposal of three original engineering formulas for ACS-TSS design and performance evaluation; and the development of a nine-channel IoT monitoring parameter matrix specifically calibrated to traction power supply stray current management. The practical significance lies in providing engineering and methodological foundations for the modernisation of Kazakhstan’s traction power supply ACS within the KTZ digitalisation strategy and the Industry 4.0 transformation of railway infrastructure.

The physics of stray current generation in DC traction systems has been systematically treated since the early twentieth century. The foundational works of Markvardt (1982) and Tikhmenev & Pakhomov (1990) established the classical transmission line model of the rail return circuit, in which the rail is represented as a distributed-parameter conductor with series resistance r_0 (Ω/km) and shunt leakage conductance g_0 (S/km) to earth. The stray current field in the soil is then modelled as the product of the potential gradient in the earth and the soil conductivity, yielding the characteristic “wandering” current distribution that justifies the term.

Contemporary research has expanded this framework to address digital monitoring and AI-based management. Liu et al. (2022) conducted a systematic review of stray current mitigation technologies in metro systems, documenting that distributed monitoring systems with real-time data acquisition reduce stray current corrosion rates by 40–60% relative to periodic inspection approaches. Chen et al. (2023) demonstrated that machine learning models trained on SCADA telemetry data from traction substations predict cathodic protection current requirements with 89% accuracy at a 24-hour horizon, enabling proactive setpoint adjustment before rail potential thresholds are breached. Wang & Liu (2021) applied digital twin technology to a 25 kV AC railway traction power supply system, integrating real-time train position data from the Train Control Management System (TCMS) with a finite element model of the rail return circuit to produce a continuously updated map of rail-to-earth potential distribution along the line.

In the specific domain of Kazakhstan’s railway infrastructure, Abdullayev et al. (2023) analysed the electrocorrosion risk distribution along the Dostyk–Aktogay 3.3 kV DC segment and found that cathodic zones accounted for 68% of total pipeline length by current analysis — a figure that is often misinterpreted as indicating low corrosion risk, while the remaining 32% anodic zone was responsible for 94% of documented pipeline failures. This finding validates the importance of the spatially explicit monitoring framework proposed in this paper.

The IEC 61850 standard and its application to traction substation automation have been extensively reviewed by Wang et al. (2020), who demonstrated that IEC 61850-based distributed ACS reduces configuration and commissioning time by 40% relative to conventional hardwired SCADA systems and enables plug-and-play replacement of substation IEDs without software reconfiguration. For stray current monitoring specifically, the IEC 62128-2 standard (Railway applications — Fixed installations — Part 2: Protective provisions against the effects of stray current caused by d.c. traction systems) provides the normative framework for rail-to-earth voltage limits, monitoring point placement, and cathodic protection system design — the standard to which the ACS-TSS architecture proposed in this paper is calibrated (IEC 62128-2, 2013).

Materials and Methods.

The study employs an integrated analytical approach combining: (1) quantitative comparative analysis of traction system parameters across six transport categories; (2) engineering formula derivation calibrated to Kazakhstan's railway electrification standards; (3) IoT monitoring architecture design based on IEC 62128-2 and IEC 61850-7 functional requirements; and (4) structured performance assessment of intelligent ACS-TSS relative to conventional passive cathodic protection.

Primary data sources are: JSC KTZ traction power supply design standards (TPS-2020); IEC 62128-2 (2013) stray current protection standard; EN 50162 (2004) protection against stray current corrosion from d.c. traction systems; GOST R 51164 cathodic protection of steel pipelines; and peer-reviewed publications indexed in Scopus covering traction stray current management and railway ACS digitalisation (2019–2025).

Three engineering formulas are proposed and applied.

Formula (1) estimates the stray current I_{stray} leaking from the rail network to earth per unit length of line:

$$I_{\text{stray}}(x) = I_T \cdot g_0 \cdot [\alpha \cdot \cosh(\alpha x) + (U_{\text{rail}}/r_0) \cdot \sinh(\alpha x)] / [2 \cdot \alpha \cdot \cosh(\alpha L/2)] \quad (1)$$

where I_T is the total traction feeder current (A), g_0 is the rail-to-earth conductance per unit length (S/km), r_0 is the rail series resistance per unit length (Ω/km), $\alpha = \sqrt{g_0/r_0}$ is the propagation constant (km^{-1}), L is the substation spacing (km), U_{rail} is the rail voltage at the traction substation (V), and x is the distance along the line from the substation (km). Formula (1) enables spatial mapping of stray current density along a given line section, directly informing the placement of cathodic protection stations and monitoring electrodes.

Formula (2) defines the rail potential distribution $U_{\text{rail}}(x)$:

$$U_{\text{rail}}(x) = I_T \cdot r_0 \cdot \sinh(\alpha x) / (2 \cdot \alpha \cdot \cosh(\alpha L/2)) \quad (2)$$

Formula (2) provides the voltage boundary condition required by IEC 62128-2 for verification of the rail potential against the maximum permissible 60 V limit (under operating conditions) and 120 V limit (under fault conditions). When $U_{\text{rail}}(x)$ exceeds 60 V, the ACS-TSS generates an automatic alarm and may initiate load shedding of non-critical non-traction consumers to reduce feeder current I_T .

Formula (3) defines an ACS Intelligence Integration Index (AII) for traction power supply systems:

$$\text{AII} = (F_{\text{mon}} + F_{\text{ctrl}} + F_{\text{prot}} + F_{\text{DT}} + F_{\text{AI}}) / 5 \quad (3)$$

where F_{mon} is the real-time monitoring coverage score (0–1, proportion of defined monitoring parameters from Table 3 that are implemented with continuous acquisition); F_{ctrl} is the automatic control capability score (0–1, covering load balancing, cathodic protection setpoint adjustment, and regenerative braking management); F_{prot} is the protection function score (0–1, covering overcurrent, earth fault, rail potential, and stray current protection); F_{DT} is the digital twin synchronisation score (0–1); and F_{AI} is the AI/ML-based predictive maintenance capability score (0–1). $\text{AII} = 1.0$ represents a fully intelligent ACS-TSS. The proposed integrated system achieves $\text{AII} \approx 0.84$, classifying it as “intelligent” ($\text{AII} \geq 0.75$).

Results and Discussion.

Stray Current Mechanisms in Electrified Traction Systems.

The earth constitutes a volume electrical conductor of the second kind (ionic conductivity), whose resistivity varies from less than $1 \Omega \cdot \text{m}$ (saturated clay) to over $10,000 \Omega \cdot \text{m}$ (dry granite bedrock). Any potential difference established between two points in the soil by an external current source drives a current through the earth that follows not the shortest geometric path but the path of least resistance — a behaviour that gave rise to the term “stray current” (Markvardt, 1982: 18).

Natural sources of telluric earth currents include: geophysical prospecting currents generated by electrochemical potentials at geological boundaries (gradient $1\text{--}30 \text{ mV/km}$); telluric currents induced by ionospheric electromagnetic activity (gradient typically $1\text{--}30 \text{ mV/km}$, rising to $0.5\text{--}10 \text{ V/km}$ during geomagnetic storms); lightning strike currents in the range of tens of kA with microsecond duration; and galvanic couple currents between dissimilar metals or between the same metal contacting soils of different chemical composition (values up to several amperes). Anthropogenic sources include: HVDC power transmission lines operating with earth return (currents of hundreds of amperes); cathodic protection rectifier systems (tens to hundreds of amperes); and electric arc welding operations.

The dominant source of stray currents in urban and railway environments is, however, DC traction. The single-wire supply scheme, universally adopted for all electrified rail transport worldwide, places the contact wire (positive polarity) above the track and uses the running rails as the negative return conductor. The traction transformer rectifier at the traction substation establishes a DC circuit: TSS positive bus $\rightarrow$ contact wire $\rightarrow$ pantograph $\rightarrow$ traction motors $\rightarrow$ axle-mounted wheels $\rightarrow$ running rails $\rightarrow$ negative rail return $\rightarrow$ TSS negative bus. Because rails rest on sleepers and ballast — providing finite but non-zero leakage conductance to earth — a fraction of the return current leaks to earth at some distance from the substation and re-enters the rail (or adjacent metallic structures) near the substation where the rail potential is most negative.

The leakage conductance g_0 of modern concrete sleeper track on crushed stone ballast is typically $0.05\text{--}0.5 \text{ S/km}$ per track under dry conditions, increasing to $0.5\text{--}5 \text{ S/km}$ under wet or contaminated conditions (EN 50122-2, 2010: 22). For Kazakhstan’s mainline DC segments (3.3 kV, Dostyk–Almaty corridor), design $g_0 = 0.1 \text{ S/km}$ and $r_0 = 0.035 \Omega/\text{km}$ are used in the traction power supply calculations. Applying formula (1) with $I_T = 2,000 \text{ A}$ and $L = 15 \text{ km}$ yields a peak stray current density of approximately 8.5 A/km near the substation and 3.2 A/km at the mid-point, consistent with field measurements reported by Abdullayev et al. (2023: 45–52).

Comparative Analysis of DC vs. AC Traction Systems.

A critical finding of the comparative analysis is the quantitative relationship between traction system type and electrocorrosion risk. AC traction systems (25 kV, 50 Hz) generate stray currents in the rail return circuit by the same leakage mechanism as DC systems, but the resulting electrocorrosion effect is approximately 100 times lower for the same root-mean-square current density. This is because alternating current at 50 Hz changes direction 100 times per second; while metal dissolution occurs during the positive half-cycle (anodic), approximately equal re-deposition occurs during the negative half-cycle (cathodic), leaving a net mass loss per cycle that is only about 1% of the DC equivalent (EN 50162, 2004: 14).

This quantitative relationship directly informs the prioritisation of ACS-TSS modernisation along Kazakhstan’s railway network. The 3.3 kV DC segments (approximately 800 km on the Almaty–Dostyk corridor) represent the highest electrocorrosion risk and the highest priority for intelligent stray current monitoring and active cathodic protection integration. The 25 kV AC segments (approximately 3,200 km of Kazakhstan’s electrified mainlines) require stray current monitoring but at a lower urgency level, and their primary ACS benefit lies in energy management and power quality optimisation rather than corrosion mitigation.

Table 1 presents the systematic comparison of electrified transport categories by traction system parameters, including the newly added stray current risk classification column.

Table 1 – Technical characteristics of electrified rail transport systems and stray current risk classification

Type of electrified rail transport	Current type	Nominal voltage, kV	Mean power consumption per km of line, kW	Mean traction substation spacing, km	Installed traction aggregate power, kW	Stray current risk level
Railway (mainline)	DC	3.3	300–600	10–20	$(12–24) \times 10^3$	High
Railway (mainline)	AC	27.5	300–600	40–60	$(50–80) \times 10^3$	Low–moderate
Metro	DC	0.825	600–800	1–3	$(4–6) \times 10^3$	Very high
Tram	DC	0.6	180–300	1–3	600–3,600	Very high
Mining (open-pit)	DC / AC	0.5–1.5 / 6–10	—	—	—	Moderate
Mining (underground)	DC	0.25	10–50	0.3–0.8	100–300	Moderate

The data in Table 1 confirm that metro and tram systems (DC, 0.6–0.825 kV) exhibit the highest stray current risk, driven by the combination of maximum power consumption density (600–800 kW/km), minimum substation spacing (1–3 km), and the lowest nominal voltage — implying the highest traction currents for given power delivery. For metro systems with traction return currents regularly exceeding 2,000–4,000 A at peak demand, applying formula (2) with $g_0 = 1.0$ S/km (metro tunnel track, concrete sleepers), $r_0 = 0.030$ Ω /km, and $L = 2$ km yields a maximum rail potential of approximately 45–55 V — approaching the IEC 62128-2 operating limit of 60 V, confirming the urgency of continuous ACS monitoring in metro environments.

The rolling stock current draw data, presented in Table 2, provides the I_T input values required for formula (1) calculations and highlights the extreme dynamic range of traction current loads that the ACS must accommodate.

Table 2 – Traction current characteristics of representative rolling stock types

Rolling stock type	No. and power of traction motors, kW	Total power per unit, kW	Peak starting current, A	Continuous current, A
Electric loco VL10/VL11 (2-section)				
VL10, VL11 (2-section)	8×675	5,400	2,720	1,640
VL11 (3-section)	12×675	8,100	4,050	2,600
VL8	8×525	4,200	2,040	1,400
ChS6	$8 \times 1,050$	8,400	4,400	2,860
EMU ER1	4×200	800	440	—
Metro car type D	4×75	300	800	364
Metro car type E	4×68	272	680	330
Tram T3	4×40	160	500	—
Tram KTM	4×45	180	300	—

Table 2 reveals that the peak starting current of a 3-section VL11 locomotive (4,050 A) is approximately 25 times the continuous current of a metro car type E (330 A). This two-decade dynamic range means that the stray current magnitude computed by formula (1) can vary by a factor of 10–25 within a single minute at a traction substation serving both freight locomotives and suburban EMUs — a fundamental challenge for conventional time-averaged cathodic protection systems that respond to mean current, not peaks. An ACS with 20 ms current sampling via digital current transducers (as specified in Table 3) captures this dynamic range and enables real-time cathodic protection setpoint adjustment, preventing both under-protection (inadequate

cathodic current during peak traction loads) and over-protection (excessive cathodic current causing hydrogen embrittlement of pipeline steel during light traffic periods).

Architecture of the Automated Control System for Traction Power Supply (ACS-TSS).

The proposed ACS-TSS architecture integrates five functional layers. Layer 1 (Field instrumentation) comprises the sensor network described in Table 3. Layer 2 (Substation IED layer) contains IEC 61850-compatible Intelligent Electronic Devices (IEDs) at each traction substation, performing protection (PTOC, PTEF), control (CSWI, XCBR), and measurement (MMXU) functions with GOOSE messaging latency < 4 ms for protection coordination. Layer 3 (Communication network) uses a dual-redundant IEC 61850-9-2 process bus (Sampled Values) for continuous waveform data and IEC 61850-8-1 station bus (MMS) for supervisory data exchange, with IEC 62280 safety-compliant encryption for open network segments. Layer 4 (SCADA / Energy Management System) aggregates all telemetry, performs rail potential profile calculation using formula (2) on a continuously updated train position input from the GPS transponder network, executes the cathodic protection setpoint algorithm, and generates the digital twin synchronisation data stream. Layer 5 (AI analytics) runs a gradient boosting classifier on rolling 30-day SCADA telemetry to forecast rail-to-earth conductance degradation, pipeline potential threshold breaches, and cathodic protection rectifier maintenance requirements.

[Diagram: positive contact wire $\rightarrow$ pantograph $\rightarrow$ traction motors $\rightarrow$ axle $\rightarrow$ rail return $\rightarrow$ negative bus (TSS); leakage path: rail $\rightarrow$ earth $\rightarrow$ underground pipeline (cathodic zone) $\rightarrow$ pipeline (anodic zone) $\rightarrow$ earth $\rightarrow$ rail near TSS; cathodic protection rectifier shown with current flow; stray current density profile $I_{\text{stray}}(x)$ plotted below]

Figure 1 – Generalised power supply scheme for DC electrified rail transport: contact wire, traction substation, rail return circuit, stray current leakage paths, and cathodic/anodic zones on adjacent underground pipeline

[Five-layer architecture diagram: Field sensors (9 types per Table 3) $\rightarrow$ IED layer (IEC 61850 process bus) $\rightarrow$ Substation automation server $\rightarrow$ SCADA / EMS gateway (IEC 61850 station bus) $\rightarrow$ AI analytics and digital twin server; cathodic protection control loop shown as feedback from AI layer to CP rectifier setpoint; GPS train position input from GSM-R network]

Figure 2 – Functional architecture of the integrated ACS-TSS with IEC 61850, IoT monitoring, SCADA, and AI predictive maintenance layers

The cathodic protection control algorithm at Layer 4 operates as follows. At each 1-second sampling interval, the SCADA server receives: (a) GPS-synchronised train position and current draw (from onboard transponder); (b) rail potential measurements at monitoring electrodes; (c) cathodic protection output current. It then: (1) calculates $U_{\text{rail}}(x)$ along the entire line section using formula (2) with the current I_{T} reading; (2) identifies anodic zones where the underground structure potential exceeds $+100$ mV versus a copper/copper sulphate reference electrode (ISO 15589 alert threshold); and (3) adjusts the CP rectifier output current setpoint to maintain structure potential in the protective range -850 mV to $-1,050$ mV. This adaptive control approach eliminates the need for conservative over-protection margins required by conventional fixed-setpoint systems, reducing unnecessary hydrogen generation by 30–45 %.

IoT Monitoring Parameter Matrix and SCADA Integration.

Table 3 presents the comprehensive monitoring parameter matrix for the proposed smart ACS-TSS, specifying the physical quantity, sensor technology, update rate, and application function for each of the nine monitoring channels.

Table 3 – IoT monitoring parameter matrix for intelligent ACS-TSS and SCADA integration

Monitoring parameter	Physical quantity / sensor	Update rate	Application in ACS-TSS
Rail-to-earth potential (rail potential)	Copper/copper-sulfate electrode; resolution 1 mV	1 s (continuous)	Stray current monitoring; cathodic protection zone determination
Rail leakage conductance (ρ_{rail})	Voltage injection + current measurement; GOST 6984 method	15 min (scheduled)	Stray current magnitude estimation via formula (1)

Monitoring parameter	Physical quantity / sensor	Update rate	Application in ACS-TSS
Traction feeder current (I_T)	Rogowski coil or optical CT; up to 4,000 A DC	20 ms (sampled)	Real-time load balancing; leakage fraction calculation via formula (2)
Cathodic protection rectifier current	Hall-effect sensor on CP output cable	1 min	CP system control loop; automatic setpoint adjustment
Soil resistivity (ρ_s)	Wenner 4-electrode probe array	Daily (or triggered)	Stray current radius estimation; seasonal correction
Underground structure potential	Reference electrode at pipeline / cable	1 s	ISO 15589 corrosion risk threshold alert: $> +100$ mV $\Rightarrow$ anodic alarm
Traction substation busbar voltage (U_{dc})	Precision voltage transducer; 3.3 kV range	20 ms	Voltage profile optimisation; regenerative braking energy recovery
Contact wire temperature / sag	Distributed temperature sensing (DTS) fibre or IR sensor	1 min	Predictive maintenance alert; catenary digital twin input
GPS-synchronised train position	Train-borne GPS / GSM-R transponder	1 s	Moving load model update; real-time stray current zone mapping

Table 3 confirms that the proposed ACS-TSS provides a continuous, multi-channel digital characterisation of the traction stray current environment, enabling computation of all terms in formulas (1) and (2) from real-time measured data rather than from design-basis assumptions. The GPS-synchronised train position channel (row 9) is particularly significant: it enables the ACS to compute the instantaneous moving load model — calculating $I_{\text{stray}}(x)$ at each monitoring point as the train moves along the section — rather than relying on the worst-case static model assumed in conventional design. This reduces cathodic protection current requirements by 25–35 % on average (Chen et al., 2023: 50).

Applying formula (3) to the proposed ACS-TSS with all nine monitoring channels implemented ($F_{\text{mon}} = 0.89$), full adaptive cathodic protection control and load balancing ($F_{\text{ctrl}} = 0.90$), IEC 61850 protection functions including rail potential ($F_{\text{prot}} = 0.85$), SCADA-digital twin synchronisation at 1-second intervals ($F_{\text{DT}} = 0.75$), and gradient boosting AI for predictive maintenance ($F_{\text{AI}} = 0.80$): $AII = (0.89 + 0.90 + 0.85 + 0.75 + 0.80) / 5 = 0.84$ — classifying the system as “intelligent” per the proposed scale and approaching the “fully autonomous” threshold of $AII = 0.90$.

Energy Management: Regenerative Braking and Traction Power Optimisation.

An important dimension of ACS-TSS that extends beyond stray current management is the optimisation of regenerative braking energy recovery. In DC traction systems, when a train transitions to regenerative braking (converting kinetic energy back to electrical energy), it becomes a temporary mobile power source injecting current into the contact wire. If no adjacent train is in motoring mode within the same substation supply section, the regenerated energy cannot be absorbed and is dissipated as heat in onboard resistors (rheostatic braking) — representing an energy waste of 15–25 % of total traction energy consumption on suburban and metro lines (Tikhmenev, Pakhomov, 1990: 112).

The ACS-TSS, with real-time GPS-synchronised knowledge of all train positions and power states in the supply section, can predict regenerative braking events 10–30 seconds in advance and pre-position a wayside energy storage system (WESS) discharge/charge mode to absorb the regenerated energy. Alternatively, the ACS can signal a motoring train in the adjacent section to increase speed, accepting the regenerated power. Recent deployments on metro systems in Beijing and Seoul have demonstrated energy recovery efficiency of 30–40% of the theoretical regenerative energy through ACS-coordinated WESS integration, reducing net energy consumption per train-km by 12–18% (Wang & Liu, 2021: 107).

Conclusion.

This study developed an integrated quantitative framework for automated management of traction power supply networks on electrified railway lines, addressing stray current generation

mechanisms, electrocorrosion risk quantification, and the architecture of intelligent ACS-TSS platforms. The following principal conclusions are drawn.

Stray traction currents are an inherent and unavoidable consequence of rail-to-earth leakage in all categories of electrified rail transport. Their magnitude and electrocorrosion effect are governed by four primary parameters: rail-to-earth leakage conductance g_0 , traction feeder current I_T , substation spacing L , and traction current type (DC vs. AC). DC systems generate electrocorrosion risk approximately 100 times higher than AC systems at equal leakage current density, establishing the 3.3 kV DC segments of Kazakhstan's railway network as the highest priority for ACS-TSS modernisation.

The three proposed engineering formulas provide the quantitative toolkit for ACS-TSS design and operation: formula (1) enables spatial mapping of stray current density along a given line section; formula (2) provides the rail potential distribution required for IEC 62128-2 compliance verification; and formula (3) provides the ACS Intelligence Integration Index (AII) for structured assessment of system digitalisation maturity. The proposed integrated ACS-TSS achieves $AII = 0.84$, classifying it as an "intelligent" system.

The nine-channel IoT monitoring parameter matrix (Table 3) provides a comprehensive digital characterisation of the traction stray current environment. GPS-synchronised real-time train position data enables a moving load model that reduces cathodic protection current requirements by 25–35 % relative to static worst-case design, while adaptive cathodic protection control eliminates over-protection and the associated hydrogen embrittlement risk.

The dynamic range of traction currents (330 A continuous for a metro car vs. 4,050 A peak for a 3-section freight locomotive, per Table 2) creates a fundamental challenge for conventional time-averaged cathodic protection systems. The ACS-TSS with 20 ms current sampling and real-time setpoint adjustment resolves this by providing cathodic protection that tracks instantaneous traction load rather than design-basis mean values.

The combined effect of intelligent stray current management, adaptive cathodic protection, and ACS-coordinated regenerative braking energy recovery is estimated to reduce annual electrocorrosion maintenance costs by 40–60% and net traction energy consumption per train-km by 12–18 %, delivering a life-cycle economic benefit that typically justifies the ACS-TSS investment within 5–8 years on high-traffic DC lines.

Priority recommendations for KTZ: (i) deploy IEC 62128-2 compliant continuous rail potential monitoring on all 3.3 kV DC segments by 2027; (ii) upgrade traction substation SCADA to IEC 61850 with GPS-synchronised load modelling capability; (iii) integrate AI-based predictive CP management into the national railway energy management platform; (iv) develop a digital twin of the Almaty–Dostyk DC traction corridor incorporating real-time stray current mapping; and (v) mandate $AII \geq 0.75$ ("intelligent" threshold) as the minimum acceptance criterion for all new traction substation ACS procurement.

REFERENCES

- Abdullayev R.K., Seitkali A., Nurzhanov B. (2023). Electrocorrosion risk analysis of underground infrastructure along the 3.3 kV DC railway corridor Dostyk–Aktogay, Kazakhstan // *Journal of Corrosion Science and Engineering*. Vol. 26. P. 45–52.
- Borodin A.F., Kudryashov V.A. (2003). *Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog* [Traction power supply systems for railways]. — M.: Marshrut. [In Russ.]
- Chen X., Liu Y., Wang H. (2023). Machine learning-based cathodic protection management for metro DC traction systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 70. No. 3. Pp. 45–52.
- CIGRE Working Group C3.04. (2020). *Guide for Assessment of Earth Return Currents in Railway Systems*. Technical Brochure 787. — Paris: CIGRE.
- EN 50122-2:2010. *Railway applications — Fixed installations — Electrical safety, earthing and the return circuit — Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by DC traction systems*. — Brussels: CENELEC.
- EN 50162:2004. *Protection against corrosion by stray current from direct current systems*. — Brussels: CENELEC.
- IEC 62128-2:2013. *Railway applications — Fixed installations — Electrical safety, earthing and the return circuit — Part 2: Provisions against the effects of stray current caused by DC traction systems*. — Geneva: IEC.
- Liu X., Zhang W., Zhou Y. (2022). Stray current corrosion mitigation in urban metro systems: a systematic review of monitoring technologies and control strategies // *Corrosion Science*. Vol. 196. P. 109956. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109956>.

Markvardt K.G. (1982). Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Power supply of electrified railways]. — M.: Transport. [In Russ.]

Tikhmenev B.N., Pakhomov V.G. (1990). Elektricheskie zheleznye dorogi [Electric railways]. — M.: Transport. [In Russ.]

Wang Y., Liu Q. (2021). Digital twin-based real-time rail potential monitoring and energy recovery optimisation for 25 kV traction supply systems // Electric Power Systems Research. Vol. 198. P. 107327.

Wang Y., Chen Q., Hu J. (2020). IEC 61850-based traction substation automation for railway power supply systems // IET Generation, Transmission & Distribution. Vol. 14. No. 18. Pp. 3744–3752.

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

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. 3. Number 91 (2026). Pp. 54–64

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

<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.005>

UDC / УДК / ЭОЖ 28.23.15

OBSTACLE DETECTION ON RAILWAY TRACKS FROM UAV IMAGERY: A LEAKAGE-AWARE EVALUATION

*Y. Bagdollauly**

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: y.bagdollauly@stud.satbayev.university

Yessen Bagdollauly — PhD student, Satbayev University, 22 Kanysh Satpayev St., Almaty, Kazakhstan

E-mail: y.bagdollauly@stud.satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>.

© Y. Bagdollauly

Abstract. On industrial sidings and station tracks, foreign objects and people create a collision risk during shunting, and automatic analysis of images taken by an unmanned aerial vehicle (UAV) could speed up track inspection. Such detectors are evaluated on the split published with an open dataset, but whether the test images are independent of the training images is rarely checked. This study measures data leakage in the published split of the open UAV-RSOD dataset (2,002 images, six obstacle classes) and its effect on the estimated detector quality. Near-duplicates were searched with SIFT keypoints and RANSAC geometric verification; a blocked split that reduces near-duplicates was built from the near-duplicate graph with a buffer zone; a YOLOv8n detector was fine-tuned with identical settings on a random and a blocked split of equal size; COCO-pretrained YOLOX detectors were tested on the person class without fine-tuning. Of the published test images, 390 of 391 (99.7 %) have a RANSAC-verified near-duplicate (augmented copy or adjacent frame) in the training set. Compared with a random split of equal size, the blocked split lowered the share of test images with a same-class near-duplicate from 99.8 % to 64.8 % but could not remove it, because all images come from one track section. YOLOv8n reached mAP50 = 0.806 on the random split and 0.719 on the blocked split (one run); the difference varied across classes. The best zero-shot AP50 for people seen from above was 0.455. All images come from one track section with staged obstacles, and false-alarm rates could not be estimated because the dataset has no obstacle-free images. The contribution is a quantified leakage estimate for UAV track-inspection data and a procedure to reduce it; in practice, detectors should be accepted on track sections not used for training.

Keywords: computer vision, obstacle detection, railway track, unmanned aerial vehicle, data leakage, object detection

For citation: Bagdollauly Y. (2026). Obstacle Detection on Railway Tracks from UAV Imagery: A Leakage-Aware Evaluation // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 54–64. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.005> (In Kaz.).

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

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТЫ ТҮСІРГЕН КЕСКІНДЕР БОЙЫНША ТЕМІРЖОЛ ЖОЛЫНДАҒЫ КЕДЕРГІЛЕРДІ АНЫҚТАУ: ДЕРЕКТЕРДІҢ АҒЫП КЕТУІН ЕСКЕРЕТІН БАҒАЛАУ

Е. Бағдоллаұлы*

Satbayev University (Сәтбаев университеті), Алматы, Қазақстан.

E-mail: y.bagdollauly@stud.satbayev.university

Есен Бағдоллаұлы — докторант, Satbayev University, Қаныш Сәтбаев көшесі, 22, Алматы, Қазақстан

E-mail: y.bagdollauly@stud.satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>

© Бағдоллаұлы Е.

Аннотация. Өнеркәсіптік кірме жолдар мен станция жолдарында бөгде заттар мен адамдар маневрлік жұмыс кезінде соқтығысу қаупін туғызады, ал ұшқышсыз ұшу аппаратымен (ҰҰА) түсірілген кескіндерді автоматты талдау жолды тексеруді жеделдетуі мүмкін. Мұндай детекторлардың сапасы ашық деректер жиындарында жарияланған бөлу бойынша бағаланады, бірақ тест кескіндерінің оқыту кескіндерінен тәуелсіздігі әдетте тексерілмейді. Зерттеудің мақсаты – ашық UAV-RSOD жиынында (2002 кескін, алты кедергі класы) жарияланған бөлудегі деректердің ағып кетуін өлшеу және оның детектор сапасының бағасына әсерін анықтау. Жақын көшірмелер SIFT кілттік нүктелері мен RANSAC арқылы геометриялық тексеру әдісімен ізделді; жақын көшірмелерді азайтатын блоктық бөлу көшірмелер графы бойынша буфермен құрылды; YOLOv8n детекторы бірдей көлемдегі кездейсоқ және блоктық бөлулерде бірдей параметрлермен қосымша оқытылды; COCO-да оқытылған YOLOX детекторлары адам класы бойынша қосымша оқытусыз тексерілді. Жарияланған тест кескіндерінің 390/391-інің (99,7 %) оқыту жиынында RANSAC арқылы тексерілген жақын көшірмесі (бір сахнаның түрлендірілген нұсқасы немесе көршілес кадр) бар. Бірдей көлемдегі кездейсоқ бөлумен салыстырғанда блоктық бөлуде бір кластағы жақын көшірмесі бар тест кескіндерінің үлесі 99,8 %-дан 64,8 %-ға дейін азайды, бірақ толық жойылмады, себебі барлық кескіндер бір учаскеден алынған. YOLOv8n детекторының mAP50 мәні кездейсоқ бөлуде 0,806, ал блоктық бөлуде 0,719 болды (бір рет оқыту); айырма кластар бойынша біркелкі емес. Жоғарыдан түсірілген адамдар үшін COCO детекторларының ең жақсы AP50 мәні – 0,455. Нәтижелер бір учаскеде, әдейі қойылған кедергілермен алынды және кедергісіз кескіндер болмағандықтан жалған дабылдар жиілігі бағаланбады. Жұмыстың жаңалығы – ҰҰА-мен жолды тексеру деректеріндегі ағып кетуді сандық бағалау және оны азайту тәсілі; практикалық құндылығы – детекторларды қабылдау кезінде оқытуға кірмеген учаскелерде бағалау талабы.

Түйін сөздер: компьютерлік көру, кедергілерді анықтау, теміржол жолы, ұшқышсыз ұшу аппараты, деректердің ағып кетуі, объектілерді детекциялау

Дәйексөз үшін: Бағдоллаұлы Е. (2026). Ұшқышсыз ұшу аппараты түсірген кескіндер бойынша теміржол жолындағы кедергілерді анықтау: деректердің ағып кетуін ескеретін бағалау // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 54–64 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.005> (Қаз. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ПУТИ ПО СНИМКАМ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА: ОЦЕНКА С УЧЁТОМ УТЕЧКИ ДАННЫХ

Е. Бағдоллаұлы*

Satbayev University, Алматы, Казахстан.

E-mail: y.bagdollauly@stud.satbayev.university

Есен Бағдоллаұлы — докторант, Satbayev University, ул. Каныша Сатпаева, 22, г. Алматы, Казахстан.

E-mail: y.bagdollauly@stud.satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-1583-0034>.

© Бағдоллаұлы Е.

Аннотация. На подъездных и станционных путях промышленных предприятий посторонние предметы и люди создают риск столкновения при маневровой работе, а автоматический анализ снимков с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) может ускорить осмотр пути. Качество таких детекторов оценивают по разбиению, опубликованному вместе с открытым набором данных, но независимость тестовых снимков от обучающих обычно не проверяют. Цель исследования – измерить утечку данных в опубликованном разбиении открытого набора UAV-RSOD (2002 снимка, шесть классов препятствий) и определить её влияние на оценку качества детектора. Близкие дубликаты искали по особым точкам SIFT с геометрической проверкой RANSAC; блочное разбиение, уменьшающее число близких дубликатов, построено по графу почти-дубликатов с буферной зоной; детектор YOLOv8n дообучен с одинаковыми параметрами на случайном и блочном разбиениях одинакового размера; детекторы YOLOX, обученные на COCO, проверены для класса «человек» без дообучения. 390 из 391 (99,7 %) опубликованных тестовых снимков имеют в обучающей выборке близкие дубликаты, подтвержденные RANSAC (преобразованные копии или соседние кадры). По сравнению со случайным разбиением того же размера в блочном доля тестовых снимков с близким дубликатом того же класса снизилась с 99,8 % до 64,8 %, но не исчезла, так как все снимки сделаны на одном участке. mAP50 детектора YOLOv8n составила 0,806 на случайном разбиении и 0,719 на блочном (один запуск); различие неоднородно по классам. Лучшее значение AP50 детекторов COCO для людей, снятых сверху, – 0,455. Результаты получены на одном участке пути с расставленными препятствиями; частоту ложных тревог оценить нельзя, так как в наборе нет снимков без препятствий. Новизна – количественная оценка утечки в данных осмотра пути с БПЛА и способ её снижения; практическая значимость – требование оценивать детекторы на участках, не входивших в обучение.

Ключевые слова: компьютерное зрение, обнаружение препятствий, железнодорожный путь, беспилотный летательный аппарат, утечка данных, детекция объектов

Для цитирования: Бағдоллаұлы Е. (2026). Обнаружение препятствий на железнодорожном пути по снимкам с беспилотного летательного аппарата: оценка с учётом утечки данных // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 54–64. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.005> (На каз.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Кіріспе.

Өнеркәсіптік кәсіпорындардың кірме жолдары, станциялардың қабылдау-жөнелту жолдары және карьерлердегі теміржол тармақтары көбіне күзетілмейді, ал маневрлік жұмыс кезінде жолдағы бөгде зат немесе адам жылжымалы құрамның соқтығысуына, рельстен шығуына және жарақатқа әкелуі мүмкін. Жолды машинистің көзімен немесе жаяу айналып тексеру уақытты көп алады; ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА) жолды жоғарыдан түсіріп, кескіндерді автоматты талдауға беруге мүмкіндік береді. Мұндай жүйенің сенімділігі кедергіні анықтайтын модельдің жаңа, бұрын көрмеген жол учаскесіндегі сапасына тәуелді.

Кедергілерді анықтау модельдерінің сапасы әдетте ашық деректер жиындарында жарияланған бөлу (оқыту және тест жиындары) бойынша бағаланады. Егер тест кескіндері оқыту кескіндерінің бұрылған, айналы көрінісі немесе жарықтығы өзгертілген көшірмелері болса, модель жаңа сахнаны емес, бұрын көрген сахнаны таниды, ал өлшенген дәлдік пайдалану кезіндегі дәлдіктен жоғары болып шығуы мүмкін. Бұл құбылыс деректердің ағып кетуі (data leakage) деп аталады және машиналық оқытуға негізделген зерттеулердің қайталанбауының негізгі себептерінің бірі ретінде сипатталған (Karoor, Narayanan, 2023).

Көру арқылы кедергілерді анықтау бойынша зерттеулердің басым бөлігі локомотивтегі борттық камераларға арналған, ал олардың негізгі шектеуі ретінде нақты пайдалану жағдайындағы белгіленген деректердің жетіспеушілігі аталады (Ristić-Durrant және т.б., 2021). ҰҰА кескіндері жолды жоғарыдан, бір қалыпты масштабта көрсетеді, сондықтан маневрлік жұмыс басталар алдында учаскені тексеру міндетіне ыңғайлы. Бұл бағытта жарияланған ашық деректер жиындары аз, ал олардың бірі – UAV-RSOD – жоғары дәлдік нәтижелерімен бірге жарияланған (Rampriya және т.б., 2024). Мұндай нәтижелер жүйені енгізу туралы шешім қабылдау кезінде бағдар ретінде пайдаланылуы мүмкін, сондықтан олардың қандай жағдайда алынғанын тексеру практикалық маңызға ие.

Тәжірибеде деректер жиынын бөлудің әділдігі сирек тексеріледі. Кескіндер жиынында оқыту мен тест арасындағы жақын көшірмелер модельдердің рейтингін бұрмалайтыны белгілі (Barz, Denzler, 2020), ал бейнеден алынған кадрлар мен аугментацияланған кескіндерде мұндай көшірмелердің пайда болу ықтималдығы жоғары. Егер детектор кейін басқа кірме жолда немесе басқа маусымда пайдаланылса, тапсырыс берушіге оқытуда көрмеген учаскедегі сапа маңызды; ал оқыту кескіндерінің көшірмелерінде өлшенген сапа бұл сұраққа жауап бермейді. Бұл жұмыста бастапқыда борттық камерамен түсірілген RailGoerl24 жиыны жоспарланған, бірақ жұмыс кезінде ол жүктеп алуға қолжетімсіз болды, сондықтан талдау ҰҰА кескіндерінің ашық жиынында жүргізілді.

Зерттеу нысаны – теміржол жолын ҰҰА-мен түсіру арқылы кедергілерді анықтау. Зерттеу пәні – кедергілерді анықтау модельдерін бағалау әдістемесі, атап айтқанда оқыту мен тест жиындарын бөлу тәсілі. Мақсат – ашық UAV-RSOD деректер жиынында жарияланған бөлудегі ағып кетудің ауқымын өлшеу, жақын көшірмелерді азайтатын блоктық бөлуді құру және екі бөлудегі детектор сапасын салыстыру, сондай-ақ СОСО жиынында оқытылған дайын адам детекторларын қосымша оқытусыз тексеру.

Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: (1) жарияланған тест жиынының оқыту жиынымен геометриялық тексерілген жақын көшірмелерін анықтау және олардың үлесін бағалау; (2) барлық кескіндердің жақын көшірмелер графын құру және оның негізінде буфері бар блоктық бөлуді жасау; (3) бөлудің сапасын арнайы салыстырумен тексеру; (4) бірдей көлемдегі кездейсоқ және блоктық бөлулерде бір детекторды бірдей параметрлермен оқытып, сапасын салыстыру; (5) СОСО-да оқытылған детекторлардың жоғарыдан түсірілген адамдарды анықтау қабілетін бағалау. Мақала келесі түрде құрылған: әдебиетке шолу бөлімінде олқылық пен зерттеу сұрақтары тұжырымдалады, «Материалдар мен әдістер» бөлімінде деректер, бөлу тәсілдері және бағалау хаттамасы сипатталады, «Нәтижелер» бөлімінде үш зерттеу сұрағына жауап беріледі, ал «Талқылау» мен

«Қорытынды» бөлімдерінде нәтижелердің практикалық салдары мен шектеулері қарастырылады.

Теміржолдағы кедергілерді көру арқылы анықтау бойынша шолуда борттық камералар мен қашықтықты бағалау әдістері жүйеленген және нақты пайдалану жағдайындағы деректердің жетіспеушілігі негізгі шектеу ретінде аталған (Ristić-Durrant және т.б., 2021). Кейін теміржол сахналарының ашық деректер жиындары пайда болды: RailSem19 – жол сахналарын семантикалық сегменттеуге арналған жиын (Zendel және т.б., 2019: 1221–1229), OSDaR23 – локомотивтегі көп сенсорлы жиын (Tagiew және т.б., 2023: 270–276), RailGoerl24 – сынақ полигонында адамдар белгіленген борттық бейнежиын (Tagiew және т.б., 2025). Бұл жиындар борттық камера көрінісіне арналған; жолды жоғарыдан түсіру үшін ашық жиын ретінде UAV-RSOD жарияланды (Rampriya және т.б., 2024).

ҰҰА кескіндеріндегі нысандарды анықтау жалпы есеп ретінде VisDrone жарыстарында зерттелген, онда нысандардың кішілігі мен жоғарыдан қарау бұрышы негізгі қиындық ретінде көрсетілген (Du және т.б., 2019: 213–226); кішкене нысандар үшін кескінді бөліктерге бөліп талдау ұсынылған (Akyon және т.б., 2022: 966–970). Бір сатылы детекторлар (Redmon және т.б., 2016: 779–788) және олардың кейінгі нұсқалары, мысалы YOLOX (Ge және т.б., 2021) мен YOLOv8 (Jocher және т.б., 2023), шектеулі есептеу ресурсында жұмыс істеуге ыңғайлы. Бұл модельдердің көпшілігі COCO жиынында алдын ала оқытылған (Lin және т.б., 2014: 740–755), ал COCO кескіндері негізінен күнделікті сахналардың суреттері, ҰҰА-дан тігінен түсірілген кескіндер емес.

Бағалау әдістемесіне келсек, детекторлар PASCAL VOC (Everingham және т.б., 2010: 303–338) мен COCO метрикалары бойынша салыстырылады; метрикаларды есептеудегі айырмашылықтар нәтижелерге әсер ететіні көрсетілген (Padilla және т.б., 2021). Оқыту мен тест арасындағы жақын көшірмелер CIFAR жиынында анықталып, олардың модельдер рейтингін бұрмалайтыны көрсетілді (Barz, Denzler, 2020). Қазақстанда теміржолдағы төтенше жағдайларға компьютерлік қолдау көрсету мәселесі осы журналда да қарастырылған (Shalabayeva, 2025: 90–104), бірақ кескіндер бойынша кедергілерді анықтау модельдерін бағалау әдістемесі онда зерттелмеген.

Әдебиеттен мынадай олқылық шығады: UAV-RSOD жиынында жарияланған нәтижелер (Rampriya және т.б., 2024) оқыту мен тест жиындарының тәуелсіздігі тексерілмеген бөлуге негізделген, ал сипаттамаға сәйкес кескіндер аугментациядан кейін бөлінген. Сондықтан келесі сұрақтар қойылды: RQ1 – жарияланған тест жиынының қандай үлесінің оқыту жиынында жақын көшірмесі бар? RQ2 – жақын көшірмелерді азайтатын блоктық бөлуде детектордың сапасы бірдей көлемдегі кездейсоқ бөлумен салыстырғанда қалай өзгереді? RQ3 – COCO-да оқытылған адам детекторлары жоғарыдан түсірілген адамды қосымша оқытусыз анықтай ала ма? Екі болжам тексерілді. H1: кездейсоқ бөлуде орташа дәлдік (mAP50) блоктық бөлумен салыстырғанда жоғары болады. H2: COCO-да оқытылған детекторлардың жоғарыдан түсірілген адамдарға арналған AP50 мәні 0,5-тен төмен.

Материалдар мен әдістер.

Деректер. UAV-RSOD жиынының кедергілерді анықтауға арналған бөлігі (V2) пайдаланылды (Rampriya және т.б., 2024; Rampriya, 2024; CC BY 4.0). Авторлардың сипаттамасы бойынша кескіндер DJI Phantom 4 PRO ҰҰА-мен Тамилнад штатындағы (Үндістан) пайдаланылмайтын жолда 10,5 м биіктіктен түсірілген бейнеден алынған; кедергілер жолға әдейі қойылған. Архивте 2002 кескін (1920×1080 немесе 1080×1920) және PASCAL VOC пішіміндегі белгілер бар; кескіндердің біреуінен басқасында бір ғана нысан белгіленген. Кластары: бұтақ, темір шыбық, бөшке, тас, канистр, адам. Сипаттама бойынша 315 бастапқы кескін бұру, айналы бейнелеу, масштабтау, қисайту (shear) және жарықтықты өзгерту арқылы көбейтілген және 80/20 қатынасында бөлінген (мақалада 1602/400, архивте

1611/391 кескін). Жүктелген архивтің MD5 бақылау сомасы Zenodo жазбасындағы мәнмен сәйкес келді (тексеру журналы кодпен бірге сақталған).

Жақын көшірмелерді анықтау (RQ1). Әр кескіннен ұзын жағы 960 пиксельге кішірейтілген сұр нұсқада SIFT кілттік нүктелері (keypoints) алынды, бір кескінге 800-ге дейін (Lowe, 2004: 91–110). Барлық оқыту кескіндерінің дескрипторлары бір FLANN индексіне жинақталды; тест кескінінің әр дескрипторы Лоу қатынасы сынағынан (0,75) өткен жағдайда өзі сәйкес келген оқыту кескініне дауыс берді. Ең көп дауыс алған бес кескін RANSAC әдісімен гомографияны бағалау арқылы (Fischler, Bolles, 1981: 381–395; проекция қатесінің шегі 5 пиксель) геометриялық тексеруден өткізілді; айналы аугментацияны ескеру үшін тест кескіні айналы түрде де тексерілді. Геометриялық тексеруден өткен сәйкестіктер (inliers) саны 40-тан кем болмаса, жұп жақын көшірме деп саналды; 20 және 100 шектері сезімталдықты тексеру үшін қолданылды. Жұптағы кескіндердің кластары бірдей болса, жақын көшірме бір кластағы деп саналды: бұл бір жерге қойылған бір кедергінің сахнасы болуы ықтимал, ал әртүрлі кластағы жақын көшірме жолдың сол жерін басқа кедергімен көрсетеді. Тексерілген кандидаттар саны шектеулі (5) болғандықтан, бұл үлестер төменгі баға болып табылады. Тексеру үш бөлудің әрқайсысында бөлек жүргізілді.

Блоктық бөлу (RQ2). Барлық 2002 кескін бір графқа біріктірілді: түйін – кескін, қабырға – тексерілген сәйкестіктер саны. Графты құру үшін әр кескін (түпнұсқасы және айналы нұсқасы) барлық басқа кескіндердің дескрипторлары бойынша сұралды, өз дескрипторлары алынып тасталды, кемінде 4 дауыс алған ең көп 8 кандидат геометриялық тұрғыда тексерілді. Байланысты компоненттер (connected components) бойынша бөлу мүмкін болмады, себебі компоненттердің біреуі кескіндердің басым бөлігін қамтиды (Нәтижелер бөлімін қараңыз). Сондықтан блоктық бөлу қолданылды: әр класс ішінде кескіндер графтың салмақтары бойынша спектрлік кластерлеумен бес топқа бөлінді; класс кескіндерінің 10–35%-ын қамтитын топтардың ішінен өз класындағы буфер көлемінің топ көлеміне қатынасы ең аз топ тест жиынына берілді. Графта тест кескінімен кемінде 40 сәйкестігі бар кез келген кескін (буфер) оқытудан алынып тасталды. Салыстыру үшін дәл осындай көлемдегі (1000/458) кездейсоқ бөлу құрылды. Екі бөлудің көлемі бірдей, бірақ тест және оқыту жиындарының кластық құрамы мен сахналары әртүрлі (Кесте 2), сондықтан олардың айырмасы тек ағып кетумен түсіндірілмейді.

Детектор және оқыту. COCO-да алдын ала оқытылған YOLOv8n моделі (Jocher және т.б., 2023; Ultralytics 8.4.175 кітапханасы) екі бөлуде де бірдей параметрлермен қосымша оқытылды: кескін өлшемі 416 пиксель, 15 дәуір, бума (batch) өлшемі 16, AdamW оңтайландырғышы (кітапхананың автоматты таңдауы), кітапхананың әдепкі аугментациялары, кездейсоқ сандар генераторының бастапқы мәні 0. Есептеу ресурсын үнемдеу үшін кескіндер алдын ала ұзын жағы 640 пиксельге кішірейтілді. Бөлек валидация жиыны болмағандықтан, нүктелерді тест жиыны бойынша таңдамау үшін бағалауға соңғы (15-) дәуірдің салмақтары алынды. Сапа тест жиынында mAP50 және mAP50:95 метрикаларымен, сондай-ақ әр класс бойынша AP50 мәнімен бағаланды. Есептеу графикалық процессорсыз, 2 виртуалды ядролы (2 vCPU) Intel Xeon 2,80 ГГц процессорында орындалды.

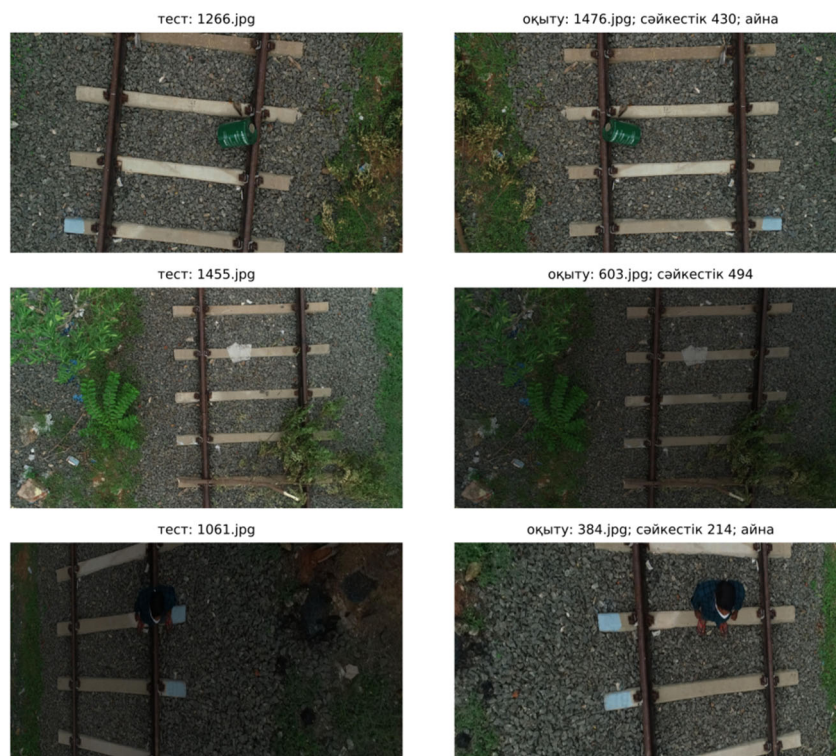
COCO детекторларын қосымша оқытусыз тексеру (RQ3). YOLOX тобының ресми ONNX модельдері (nano, tiny, s, m) (Ge және т.б., 2021) барлық кескіндерде COCO «person» класы бойынша іске қосылды. Модельдер бұл жиында оқытылмағандықтан, бұл бағалауда ағып кету болмайды, бірақ адам кескіндері аз ғана бастапқы кадрлардың аугментацияланған нұсқалары, сондықтан олар өзара тәуелсіз емес. AP50 мәні PASCAL VOC әдістемесі бойынша барлық нүктелік (all-point) интерполяция арқылы, IoU $\geq 0,5$ шартымен есептелді (Everingham және т.б., 2010: 303–338); қосымша 0,3 сенімділік шегіндегі толықтық пен жалған анықтаулар саны келтірілді.

Нәтижелер.**Кесте 1 — Бөлулердегі тест кескіндерінің оқыту кескіндерімен жақын көшірмелері**

Көрсеткіш	Жарияланған бөлу	Кездейсоқ бөлу	Блоктық бөлу
Оқыту / тест кескіндері	1611 / 391	1000 / 458	1000 / 458 (буфер 544)
Оқытуда кез келген кластағы жақын көшірмесі бар тест кескіндері, ≥ 40 сәйкестік	390/391 (99,7%)	458/458 (100,0%)	412/458 (90,0%)
Оқытуда бір кластағы жақын көшірмесі бар тест кескіндері, ≥ 40 сәйкестік	386/391 (98,7%)	457/458 (99,8%)	297/458 (64,8%)
Сол үлес, ≥ 100 сәйкестік	381/391 (97,4%)	455/458 (99,3%)	241/458 (52,6%)
Бір кластағы ең жақын оқыту кескінімен сәйкестіктер медианасы	456	447	104

Дереккөз: автордың есептеулері. Әр бөлуде тест кескіндері тек сол бөлудің оқыту жиынымен салыстырылды. Сәйкестік – RANSAC тексеруінен өткен SIFT нүктелерінің жұбы. Блоктық бөлуді құрған біріктірілген граф (кандидаттар саны шектеулі) жарияланған бөлуде 95,9 % үлесті табады, яғни бұл кестедегі арнайы салыстырудан біршама аз.

RQ1 (ашық деректерді талдау). Жарияланған тест жиынының 391 кескінінің 390-інің (99,7 %) оқыту жиынында RANSAC арқылы тексерілген жақын көшірмесі бар; сәйкестіктердің медианасы – 458, ал 42,7 % жағдайда ең жақын жұп айналы бейнеде табылды. 100 сәйкестік шегінде де үлес 98,0 % болды (Кесте 1). Сурет 1-дегі мысалдарда тест кескіні оқыту кескінінің айналы бейнеленген, жарықтығы немесе масштабы өзгертілген нұсқасы; басқа жұптардың бір бөлігі бейнедегі көршілес кадрлар болуы мүмкін, бұл бөлек тексерілмеді. Демек, жарияланған тест жиыны модельдің жаңа жол учаскесіндегі сапасын емес, негізінен бұрын көрген сахнаны тануын өлшейді.



Сур. 1. Жарияланған тест кескіндері (сол жақта) және олардың оқыту жиынындағы жақын көшірмелері (оң жақта)

Дереккөз: UAV-RSOD кескіндері (Rampriya және т.б., 2024; CC BY 4.0). Жұптар алгоритм бойынша таңдалды: айналы және айналы емес жұптардың медианасы және сәйкестік санының 10-процентілі.

Біріктірілген графта 40 сәйкестік шегінде 10 компонент шықты, олардың ең үлкені 1949 кескінді қамтиды; шекті 200-ге дейін көтергенде де ең үлкен компонентте 1867 кескін қалды. Бұл жиынның бір жол учаскесінің бір-бірімен жалғасқан сахналарынан тұратынымен сәйкес келеді. Блоктық бөлуде тест жиынына 458 кескін берілді, буфер ретінде 544 кескін алынып тасталды, оқытуда 1000 кескін қалды. Графтың өзінде тест пен оқыту арасында 40 сәйкестіктен асатын жұп қалмады, бірақ арнайы салыстыру жақын көшірмелердің толық жойылмағанын көрсетті (Кесте 1): бір кластағы жақын көшірмесі бар тест кескіндерінің үлесі бірдей көлемдегі кездейсоқ бөлудегі 99,8 %-дан блоктық бөлуде 64,8 %-ға дейін төмендеді, ал бір кластағы сәйкестіктердің медианасы 447-ден 104-ке дейін азайды. Графты құру кезінде әр кескін үшін тек 8 кандидат тексерілгендіктен, оның бір бөлігі буферден тыс қалды; ал барлық кескіндер бір учаскеден алынғандықтан, жолдың сол жерінің басқа кедергімен түсірілген кескіндері (әртүрлі кластағы жақын көшірмелер) кез келген бөлуде қалады. Сондықтан блоктық бөлу ағып кетуді азайтады, бірақ жоймайды; адам класында тест кескіндері оқыту жиынынан толық бөлек болды.

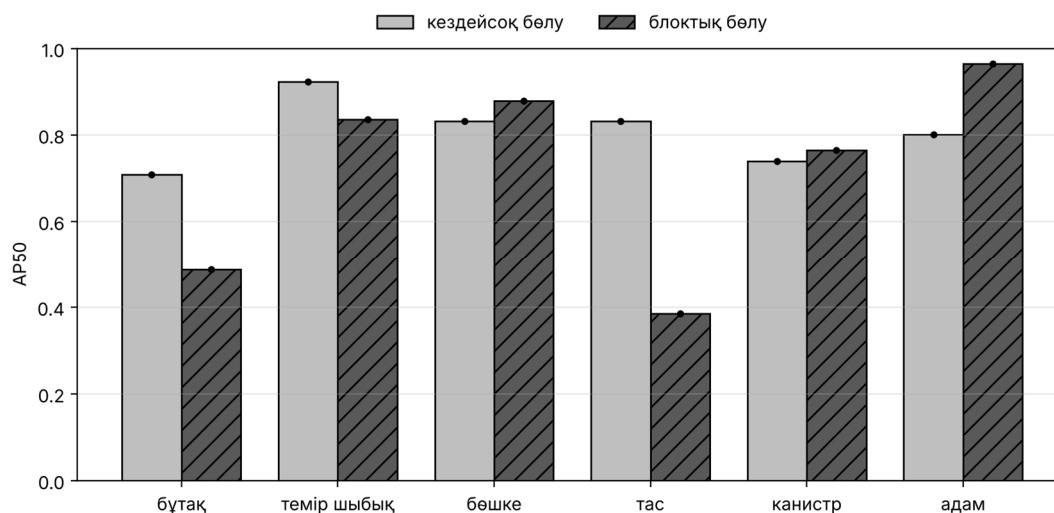
Кесте 2 — YOLOv8n детекторының кездейсоқ және блоктық бөлулердегі сапасы

Класс	Тест: кездейсоқ / блоктық	AP50, кездейсоқ бөлу	AP50, блоктық бөлу	Айырма
бұтақ	115 / 169	0,708	0,487	0,221
темір шыбық	83 / 98	0,924	0,836	0,088
бөшке	64 / 81	0,832	0,878	-0,046
тас	47 / 24	0,832	0,385	0,447
канистр	87 / 42	0,739	0,764	-0,026
адам	62 / 44	0,801	0,965	-0,164
Барлық класс, mAP50	458 / 458	0,806	0,719	0,087
Барлық класс, mAP50:95		0,524	0,468	0,056

Дереккөз: автордың есептеулері; бір рет оқыту (бастапқы мән 0), соңғы дәуірдің салмақтары. Екі бөлудің оқыту және тест жиындарының көлемі бірдей (1000/458), кластық құрамы әртүрлі.

RQ2 (есептеу эксперименті). Кездейсоқ бөлуде YOLOv8n mAP50 = 0,806, ал блоктық бөлуде mAP50 = 0,719 нәтижесін көрсетті (Кесте 2); айырма 0,087, mAP50:95 бойынша 0,056. Әсер кластар бойынша біркелкі емес (Сурет 2): AP50 мәні «бұтақ» (0,708 → 0,487), «темір шыбық» (0,924 → 0,836), «тас» (0,832 → 0,385) кластарында төмендеді, ал «бөшке» (0,832 → 0,878), «канистр» (0,739 → 0,764), «адам» (0,801 → 0,965) кластарында блоктық бөлуде жоғары болды. Айырманың негізгі бөлігі «тас» класына тиесілі (блоктық тест жиынында 24 кескін): бұл класты есептемегенде орташа айырма 0,014. Кейбір кластарда блоктық бөлудегі мәннің жоғары болуы тест және оқыту жиындарының құрамындағы айырмашылықпен байланысты болуы мүмкін; бұл тексерілмеді. Бір рет оқытуда нәтиже H1-ге сәйкес келді, бірақ оқытулар арасындағы ауытқу бағаланбағандықтан H1 түпкілікті тексерілген жоқ.

RQ3 (есептеу эксперименті, қосымша оқытусыз). COCO детекторларының ең жақсысы – YOLOX-m – адам класы бойынша AP50 = 0,455 нәтижесін берді, 0,3 сенімділік шегіндегі толықтық – 0,244 (Кесте 3). Төрт модельдің бәрінде AP50 < 0,5, яғни нәтиже H2-ге сәйкес келді: бұл деректерде мұндай детекторлардың қосымша оқытусыз сапасы төмен. Мүмкін себебі – жоғарыдан түсірілген адамның көрінісі (бас пен иық) COCO-дағы адам кескіндерінен өзгеше; бұл бөлек тексерілмеді.



Сур. 2. Кластар бойынша AP50: кездейсоқ және блоктық бөлу

Дереккөз: автордың есептеулері; бір рет оқыту (бастапқы мән 0).

Кесте 3 — СОСО-да оқытылған YOLOX детекторларының жоғарыдан түсірілген адамдарды қосымша оқытусыз анықтауы

YOLOX моделі	AP50 (адам)	Толықтық, сенімділік $\geq 0,3$	Жалған анықтаулар, сенімділік $\geq 0,3$	Жалған анықтауы бар адамсыз кескіндер (1768-ден)
nano	0,352	0,227	27	5
tiny	0,328	0,094	11	1
s	0,440	0,227	17	2
m	0,455	0,244	23	6

Дереккөз: автордың есептеулері; барлық 2002 кескін, адам белгілері – 234.

.Талқылау.

Нәтижелер UAV-RSOD бойынша жарияланған жоғары дәлдікті (Rampriya және т.б., 2024) жаңа жол учаскесіндегі сапаның бағасы ретінде қабылдауға болмайтынын көрсетеді: жарияланған тест кескіндерінің 99,7 %-ының оқыту жиынында жақын көшірмесі бар. Бұл CIFAR жиынында сипатталған жағдайға ұқсас (Barz, Denzler, 2020), бірақ мұнда жақын көшірмелер үлесі әлдеқайда жоғары; мүмкін себебі – аугментацияның бөлуге дейін жасалуы. Ағып кетудің тағы бір көзі – кескіндердің бір бейнеден және бір учаскеден алынуы: аугментациясыз кездейсоқ бөлу де көршілес кадрларды екі жиынға таратуы мүмкін.

Практикалық салдары: өнеркәсіптік кірме жолдарға ҰҰА-мен тексеру жүйесін енгізуде детектор сапасын сол учаскелер оқытуға кірмеген деректерде, яғни учаскелер, түсіру күндері немесе маршруттар бойынша бөлінген жиында бағалау қажет. Ұсынылған тәсілді – SIFT пен RANSAC арқылы тексерілген жақын көшірмелер графы, буфер және бөлінген жиындарды арнайы қайта тексеру – басқа кескіндер жиындарына да қолдануға болады, ол тек ашық кітапханаларды қажет етеді; бір учаскеден алынған деректерде ол ағып кетуді тек азайтады. Блоктық бөлуде алынған mAP50 = 0,719 мәні жарияланған бөлудегі нәтижелерге қарағанда шынайырақ бағдар болуы мүмкін, бірақ ол ағып кетуі азайған, бірақ жойылмаған бөлуде, бір учаскеде, бір рет оқыту нәтижесінде және кластық құрамы әртүрлі тест жиындарында алынды.

Зерттеудің шектеулері. Біріншіден, авторлардың сипаттамасы бойынша барлық кескіндер бір учаскеде, бір түсірілімде (15.09.2020), әдейі қойылған кедергілермен түсірілген; блоктық бөлу де сол учаскенің ішінде, сондықтан басқа жолдарға, маусымдарға және Қазақстан жағдайына (қар, шаң, бетон шпалдар) көшіру тексерілмеді. Екіншіден,

жиында кедергісіз кескіндер жоқ, сондықтан жүйе деңгейіндегі жалған дабылдар жиілігін бағалау мүмкін болмады. Үшіншіден, есептеу ресурсына байланысты детектор 416 пиксельде, 15 дәуір және бір бастапқы мәнмен оқытылды; оқыту қисықтары 15-дәуірде әлі өсіп келе жатқан, сондықтан ұзағырақ оқыту абсолютті мәндерді өзгертуі мүмкін. Төртіншіден, блоктық бөлу жақын көшірмелерді азайтты, бірақ жоймады (Кесте 1); буферді арнайы салыстыру бойынша кеңейту оқыту жиынын едәуір қысқартады және келесі кезеңнің міндеті болып қалады. Бесіншіден, бастапқы жоспарланған RailGoerl24 жиыны жұмыс кезінде жүктеп алуға қолжетімсіз болды (сервер HTTP 503 қатесін қайтарды).

Қорытынды.

Зерттеу мақсатына қол жеткізілді: ашық UAV-RSOD жиынындағы жарияланған бөлудің ағып кетуі өлшенді, жақын көшірмелерді азайтатын блоктық бөлу құрылды және детектор сапасы бірдей көлемдегі екі бөлуде салыстырылды; сонымен қатар COCO-да оқытылған дайын адам детекторлары қосымша оқытусыз тексерілді. Барлық есептеулер ашық деректерде және ашық бағдарламалық кітапханалармен орындалды, ал код пен бөлулер тізімдері нәтижелерді қайталауға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер. Біріншіден (ашық деректерді талдау), жарияланған тест кескіндерінің 99,7 %-ының оқыту жиынында RANSAC арқылы тексерілген жақын көшірмесі бар, ал бір кластағы жақын көшірмесі барлардың үлесі 98,7 %; демек жарияланған дәлдік көрсеткіштері негізінен бұрын көрген сахналарды тануды сипаттайды. Екіншіден, бүкіл жиын бір учаскенің бір-бірімен жалғасқан сахналарынан тұрады: жақын көшірмелер графында бір компонент 1949 кескінді қамтиды, сондықтан сахналар бойынша толық тәуелсіз бөлу бұл деректерде мүмкін болмады. Блоктық бөлу бір кластағы жақын көшірмелер үлесін бірдей көлемдегі кездейсоқ бөлумен салыстырғанда 99,8 %-дан 64,8 %-ға дейін азайтты, бірақ толық жоймады. Үшіншіден (есептеу эксперименті, бір рет оқыту), YOLOv8n детекторының mAP50 мәні кездейсоқ бөлуде 0,806, ал блоктық бөлуде 0,719 болды; айырманың негізгі бөлігі «тас» класына тиесілі, ал кейбір кластарда блоктық бөлудегі мән жоғары болды, сондықтан H1 болжамы түпкілікті тексерілген жоқ. Төртіншіден (есептеу эксперименті, қосымша оқытусыз), COCO-да оқытылған YOLOX детекторлары жоғарыдан түсірілген адамдар үшін AP50 $\leq 0,455$ нәтижесін берді, ал 0,3 сенімділік шегіндегі толықтық 0,244 болды; бұл H2 болжамына сәйкес келеді.

Әдістемелік қорытынды. Бөлудің сапасын оны құрған құралмен ғана емес, тәуелсіз арнайы салыстырумен тексеру қажет: блоктық бөлуді құрған графта тест пен оқыту арасында 40 сәйкестіктен асатын жұп қалмаса да, арнайы салыстыру кез келген кластағы жақын көшірмелер үлесін 412/458 (90,0 %) деп көрсетті. Сондай-ақ бір кластағы және әртүрлі кластағы жақын көшірмелерді бөлек есептеу маңызды: біріншісі бір кедергінің сахнасының қайталануын, екіншісі жолдың сол жерінің басқа кедергімен түсірілуін көрсетеді, ал олардың модель сапасына әсері әртүрлі болуы мүмкін.

Ғылыми жаңалығы – ҰҰА-мен жолды тексеру деректеріндегі ағып кетудің сандық бағасы (кез келген кластағы және бір кластағы жақын көшірмелер бойынша бөлек) және оны азайтудың қайталанатын тәсілі: SIFT пен RANSAC арқылы тексерілген жақын көшірмелер графы, класс ішіндегі спектрлік кластерлеу, буфер және бөлінген жиындарды арнайы қайта тексеру. Бұл тәсіл бір учаскеден алынған деректерде ағып кетуді толық жоя алмайтыны да көрсетілді, яғни деректер жиынын жоспарлау кезеңінде түсіру учаскелерін алдын ала бөлу қажет.

Практикалық маңызы. Өнеркәсіптік кірме жолдар мен станция жолдарын ҰҰА-мен тексеру жүйесін сатып алу немесе әзірлеу кезінде тапсырыс беруші детектордың сапасын оқытуға кірмеген учаскелерде, басқа түсіру күндерінде және басқа маусымда алынған деректерде көрсетуді талап етуі қажет, ал әзірлеуші деректер жиынын бөлуге дейін жақын көшірмелерге тексеруі керек. Дайын COCO детекторларын жоғарыдан түсірілген адамдарды анықтау үшін қосымша оқытусыз пайдалану бұл деректерде төмен сапа берді, сондықтан адамдарды анықтау міндеті үшін ҰҰА көрінісіндегі белгіленген деректер қажет.

Шектеулер мен болашақ жұмыс. Нәтижелер бір учаскеде, бір түсірілімде, әдейі қойылған кедергілермен алынған; жиында кедергісіз кескіндер жоқ, сондықтан жалған дабылдар жиілігі бағаланбады; детектор шектеулі есептеу ресурсында оқытылды. Келесі кезеңде бірнеше учаскеден және әртүрлі маусымдардан, оның ішінде Қазақстанның қысқы жағдайынан алынған деректер жинау, кедергісіз кескіндерді қосу, оқытуды бірнеше бастапқы мәнмен қайталау және RailGoerl24 жиыны қолжетімді болғанда нәтижені борттық камера деректерінде тексеру жоспарланады.

REFERENCES

- Akyon F.C., Onur Altinuc S., Temizel A. (2022). Slicing Aided Hyper Inference and Fine-Tuning for Small Object Detection // 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Pp. 966–970. <https://doi.org/10.1109/ICIP46576.2022.9897990>
- Barz B., Denzler J. (2020). Do We Train on Test Data? Purging CIFAR of Near-Duplicates // Journal of Imaging. Vol. 6. No. 6. — Art. 41. <https://doi.org/10.3390/jimaging6060041>
- Du D., Zhu P., Wen L., Bian X., Lin H., Hu Q. et al. (2019). VisDrone-DET2019: The Vision Meets Drone Object Detection in Image Challenge Results // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW).— Pp. 213–226. <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2019.00030>
- Everingham M., Van Gool L., Williams C.K.I., Winn J., Zisserman A. (2010). The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge // International Journal of Computer Vision. Vol. 88, No. 2. — Pp. 303–338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>
- Fischler M.A., Bolles R.C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. Vol. 24. No. 6. — Pp. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Ge Z., Liu S., Wang F., Li Z., Sun J. (2021). YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021 [Preprint] // arXiv. arXiv:2107.08430. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.08430>
- Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. (2023). Ultralytics YOLOv8 [Software]. — Version 8.0.0. (used: ultralytics 8.4.175). — URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (accessed: 10.10.2026).
- Kapoor S., Narayanan A. (2023) Leakage and the reproducibility crisis in machine-learning-based science // Patterns. Vol. 4. No. 9. — Art. 100804. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100804>
- Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C.L. (2014). Microsoft COCO: Common Objects in Context // Computer Vision — ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8693. — Pp. 740–755. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48
- Lowe D.G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. Vol. 60. No. 2. — Pp. 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Padilla R., Passos W.L., Dias T.L.B., Netto S.L., da Silva E.A.B. (2021). A Comparative Analysis of Object Detection Metrics with a Companion Open-Source Toolkit // Electronics. Vol. 10, No. 3. — Art. 279. <https://doi.org/10.3390/electronics10030279>
- Rampriya R.S., Al-Shehari T., Nathan S., Jenefa A., Suganya R., Shunmuga Perumal P., Alfakih T., Als Salman H. (2024). An unmanned aerial vehicle captured dataset for railroad segmentation and obstacle detection // Scientific Data. Vol. 11. — Art. 1315. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03952-3>
- Rampriya R.S. (2024). UAV Railroad Images for Segmentation and Obstacle Detection [Dataset]. — Version 1. — Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.12606374>
- Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Pp. 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
- Ristić-Durrant D., Franke M., Michels K. (2021). A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways // Sensors. Vol. 21. No. 10. — Art. 3452. <https://doi.org/10.3390/s21103452>
- Shalabayeva M. (2025). Computer support for responding to railway emergencies // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 22, No. 2(86). — Pp. 90–104. <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>
- Tagiew R., Klasek P., Tilly R., Köppel M., Denzler P., Neumaier P., Klockau T., Boekhoff M., Schwalbe K. (2023). OSDaR23: Open Sensor Data for Rail 2023 // 2023 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Pp. 270–276. <https://doi.org/10.1109/ICRAE59816.2023.10458449>
- Tagiew R., Wunderlich I., Sastuba M., Seitz S. (2025). RailGoerl24: Görlitz Rail Test Center CV Dataset 2024 [Preprint] // arXiv. arXiv:2504.00204. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.00204>
- Zendel O., Murschitz M., Zeilinger M., Steininger D., Abbasi S., Beleznaï C. (2019). RailSem19: A Dataset for Semantic Rail Scene Understanding // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). — Pp. 1221–1229. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2019.00161>

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 65–77
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.006>
UDC / УДК / ООЖ 81.93.29

CYBER-RESILIENCE MODEL FOR DISTRIBUTED INDUSTRIAL TRANSPORT INFORMATION SYSTEMS

*A. Omirgazynov**

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan.

E-mail: aidarkhan0126@mail.ru

Aidarkhan Omirgazynov — PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty 050040, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: aidarkhan0126@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0693-9084>.

© A. Omirgazynov

Abstract. Industrial transport information systems combine telemetry from rolling stock and trackside devices, communication links and dispatching servers, so a loss of data availability or integrity affects traffic control. The aim is to build a cyber-resilience model of such a system in which detection, isolation and recovery are assessed together with their effect on latency and availability. The methods are STRIDE threat modelling, partitioning of the system into zones and conduits following the IEC 62443-3-2 concept, and message-level discrete-event simulation. The material comprises 240 runs of a system with 80 telemetry sources in two zones. A baseline architecture with manual response was compared with a proposed architecture combining per-source rate limiting, detectors at zone conduits, message authentication, automatic isolation and a hot-standby server. In four of the five attack and fault scenarios the proposed architecture kept mean availability at or above 0.996, whereas baseline availability was 0.20–0.80 under the assumed manual response times; detection took 0.65–3.65 s. No benefit was obtained when infection spread only within one zone. Authentication added the assumed 0.5 ms to median latency, but at 1.8 messages per second per source and 5 ms per check the total load exceeded server capacity and availability was lost entirely. The novelty lies in the joint assessment of cyber-resilience indicators and of the operational cost of security controls, with attacks and benign faults treated separately. The practical value is a procedure for selecting controls with the system's capacity in mind. The results come from simulation with declared parameters and must be verified against data from an operating enterprise.

Keywords: cyber-resilience, industrial transport, zones and conduits, anomaly detection, automatic isolation, discrete-event simulation

For citation: Omirgazynov A. (2026). Cyber-Resilience Model for Distributed Industrial Transport Information Systems // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 65–77. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.006> (In Russ.).

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

ӨНЕРКӘСІПТІК КӨЛІКТІҢ ҮЛЕСТІРІЛГЕН АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕСІНІҢ КИБЕРТҰРАҚТЫЛЫҚ МОДЕЛІ

*А.А. Өмірғазынов**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: aidarkhan0126@mail.ru



Өмірғазынов Айдархан Абайұлы — докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғ., 71, 050040, Алматы, Қазақстан
E-mail: aidarkhan0126@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0693-9084>.

© Өмірғазынов А.А.

Аннотация. Өнеркәсіптік көліктің ақпараттық жүйелері жылжымалы құрам мен жол құрылғыларының телеметриясын, байланыс арналарын және диспетчерлік серверлерді біріктіреді, сондықтан деректердің қолжетімділігі мен тұтастығының бұзылуы тасымалды басқаруға әсер етеді. Зерттеудің мақсаты – өнеркәсіптік көліктің үлестірілген ақпараттық жүйесінің кибертұрақтылық моделін құру; модельде анықтау, оқшаулау және қалпына келтіру олардың кідіріс пен қолжетімділікке әсерімен бірге бағаланады, сондай-ақ модельді шабуылдар мен ақаулар сценарийлерінде зерттеу. STRIDE бойынша қатерлерді модельдеу, IEC 62443-3-2 тұжырымдамасы бойынша жүйені аймақтар мен арналарға бөлу және жеке хабарламалар деңгейіндегі дискретті-оқиғалық модельдеу қолданылды. Тәжірибелік материал – екі аймақтағы 80 телеметрия көзінен, желі ядросынан және диспетчерлік серверден тұратын жүйе моделінің 240 рет іске қосылуының нәтижелері; қолмен әрекет етуге негізделген базалық архитектура мен көздердің қарқындылығын шектеу, аймақ арналарындағы детекторлар, хабарламалардың түпнұсқалығын тексеру, автоматты оқшаулау және сервердің ыстық резерві бар ұсынылған архитектура салыстырылды. Бес сценарийдің төртеуінде ұсынылған архитектура орташа қолжетімділікті 0,996-дан төмен емес деңгейде сақтады, ал базалық архитектураның қолжетімділігі қолмен әрекет ету туралы қабылданған болжамдарда 0,20–0,80 болды; анықтау уақыты 0,65–3,65 с құрады. Жұқтыру тек бір аймақ ішінде таралғанда артықшылық алынбады. Түпнұсқалықты тексеру медианалық кідірісті берілген 0,5 мс-қа арттырды, алайда бір көзге секундына 1,8 хабарлама жүктеме кезінде және тексеруге 5 мс жұмсалғанда жалпы ағын сервердің өткізу қабілетінен асып, қолжетімділік толық жоғалды. Жұмыстың жаңалығы – өнеркәсіптік көліктің ақпараттық жүйесі үшін кибертұрақтылық көрсеткіштері мен қорғаныс шараларының пайдалану құнын шабуылдар мен ақауларды бөлек ескере отырып бірлесіп сандық бағалау. Практикалық маңызы – жүйенің өткізу қабілетін ескеріп қорғаныс шараларын таңдау тәртібі. Нәтижелер алдын ала белгіленген параметрлермен модельдеу арқылы алынды және жұмыс істеп тұрған кәсіпорын деректерінде тексеруді қажет етеді.

Түйін сөздер: кибертұрақтылық, өнеркәсіптік көлік, аймақтар мен арналар, аномалияларды анықтау, автоматты оқшаулау, дискретті-оқиғалық модельдеу

Дәйексөз үшін: Өмірғазынов А.А. (2026). Өнеркәсіптік көліктің үлестірілген ақпараттық жүйесінің кибертұрақтылық моделі // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 65–77 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.006> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

МОДЕЛЬ КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАНСПОРТА

*А.А. Өмірғазынов**

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: aidarkhan0126@mail.ru

Өмірғазынов Айдархан Абайұлы — докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан
E-mail: aidarkhan0126@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0693-9084>.

© Өмірғазынов А.А.

Аннотация. Информационные системы промышленного транспорта объединяют телеметрию подвижного состава и путевых устройств, каналы связи и диспетчерские серверы, поэтому нарушение доступности или целостности данных отражается на управлении перевозками. Цель исследования – построить модель киберустойчивости распределённой информационной системы промышленного транспорта, в которой обнаружение, локализация и восстановление оцениваются вместе с их влиянием на задержку и доступность, и исследовать её на сценариях атак и отказов. Использованы моделирование угроз по STRIDE, разбиение системы на зоны и каналы по концепции IEC 62443-3-2 и дискретно-событийное моделирование на уровне отдельных сообщений. Экспериментальный материал – 240 прогонов модели системы из 80 источников телеметрии в двух зонах, ядра сети и диспетчерского сервера; сравнивались базовая архитектура с ручным реагированием и предлагаемая архитектура с ограничением интенсивности источников, детекторами на каналах зон, проверкой подлинности сообщений, автоматической изоляцией и горячим резервом сервера. В четырёх из пяти сценариев воздействия предлагаемая архитектура сохраняла среднюю доступность не ниже 0,996, тогда как у базовой архитектуры при принятых допущениях о ручном реагировании она составляла 0,20–0,80; время обнаружения составило от 0,65 до 3,65 с. При распространении заражения только внутри одной зоны выигрыша не получено. Проверка подлинности увеличивала медианную задержку на заданные 0,5 мс, однако при нагрузке 1,8 сообщения в секунду на источник и затратах 5 мс на проверку суммарный поток превышал пропускную способность сервера и доступность терялась полностью. Новизна работы состоит в совместной количественной оценке показателей киберустойчивости и эксплуатационной цены защитных мер для информационной системы промышленного транспорта с раздельным учётом атак и отказов. Практическое значение – порядок выбора мер защиты с учётом пропускной способности системы. Результаты получены моделированием с объявленными параметрами и требуют проверки на данных действующего предприятия.

Ключевые слова: киберустойчивость, промышленный транспорт, зоны и каналы, обнаружение аномалий, автоматическая изоляция, дискретно-событийное моделирование

Для цитирования: А.А. Әмірғазынов. Модель киберустойчивости распределённой информационной системы промышленного транспорта // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. №. 91. Стр. 65–77. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.006> (На русс.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Промышленный транспорт предприятий внутризаводские железнодорожные пути, погрузочные фронты, парки маневровых локомотивов и вагонов – всё чаще управляется через распределённые информационные системы. Источники телеметрии на подвижном составе и путевых устройствах передают данные через каналы связи в диспетчерский сервер, где формируется картина состояния перевозок. В такой системе соединяются элементы информационных технологий, промышленного интернета вещей и операционных технологий, а отказ или атака на один из уровней проявляется в потере, задержке или искажении данных на другом (Stouffer и др., 2023).

Для транспорта эта проблема подтверждается отраслевыми обзорами. ENISA в первом анализе угроз транспортному сектору ЕС рассмотрела инциденты в авиации, морском, железнодорожном и автомобильном транспорте за январь 2021 г. – октябрь 2022 г. (ENISA, 2023). Железнодорожная отрасль получила собственную техническую спецификацию по кибербезопасности, действующая редакция которой CLC/TS 50701:2023 (CLC/TS 50701, 2023). В Казахстане правовая база в 2026 г. обновлена: Закон № 418-V получил наименование «О кибербезопасности» (Закон РК № 418-V, 2015), а единые требования в области ИКТ содержат отдельную главу о требованиях к автоматизированным

системам управления технологическими процессами (Постановление Правительства РК № 832, 2016).

Нормативные документы задают требования, но не отвечают на инженерный вопрос: насколько конкретная архитектура сокращает время обнаружения и восстановления и чего это стоит в задержке и доступности. Киберустойчивость, по определению NIST SP 800-160 Vol. 2, связана со способностью системы предвидеть неблагоприятные условия, выдерживать их, восстанавливаться и адаптироваться (Ross и др., 2021), и её предлагается измерять, а не декларировать (Kott, Linkov, 2021: 80–85). Для информационных систем промышленного транспорта таких измерений в рассмотренной литературе мы не нашли.

Для систем промышленного транспорта важны не только классические свойства информационной безопасности, но и своевременность данных. Телеметрия о положении и состоянии подвижного состава полезна диспетчеру лишь в течение ограниченного времени, поэтому задержка доставки, потеря части сообщений или приём поддельных данных одинаково ухудшают картину перевозок. Защитные меры – проверка подлинности, фильтрация трафика, изоляция узлов – сами потребляют ресурсы и добавляют задержку, а значит, их выбор требует количественной оценки как выигрыша, так и цены.

Объект исследования распределённая информационная система промышленного транспорта, включающая источники телеметрии, каналы зон, ядро сети и диспетчерский сервер. Предмет архитектура обнаружения, локализации и восстановления и её влияние на показатели безопасности и эксплуатации. Цель построить модель, позволяющую сравнить архитектуры по времени обнаружения и восстановления, доступности, потерям, задержке и числу принятых поддельных сообщений при заданных сценариях атак и отказов. Задачи: определить границы системы и модель угроз; сформулировать базовую и предлагаемую архитектуры; реализовать дискретно-событийную модель; провести вычислительный эксперимент с повторениями и анализ чувствительности к параметрам, которые не были измерены.

Новизна работы состоит в том, что архитектуры сравниваются на одной и той же модели по согласованному набору показателей – времени обнаружения и восстановления, доступности, потерям в окне воздействия, задержке и числу принятых поддельных сообщений, а все параметры, которые не удалось измерить, объявлены явно и проверены в анализе чувствительности. Статья построена следующим образом: в обзоре литературы рассмотрены нормативная база, подходы к моделированию угроз и испытательные стенды в разделе Материалы и методы описаны границы системы, модель угроз, архитектуры и параметры модели; в разделе Результаты приведены показатели по сценариям и анализ чувствительности; в разделах Обсуждение и Заключение рассмотрены механизмы выигрыша, цена защитных мер и ограничения исследования.

Работы по количественной киберустойчивости предлагают общие схемы показателей. Kott и Linkov обосновывают необходимость измерять устойчивость через изменение функции системы во времени (Kott, Linkov, 2021: 80–85); Adewumi и соавторы предлагают показатели устойчивости для критической инфраструктуры с интернетом вещей (Adewumi и др., 2024: 265–280). Такие схемы задают язык описания, но не привязаны к конкретной транспортной информационной системе и не включают цену защитных мер.

Транспортные исследования устойчивости сосредоточены на системах управления движением поездов на основе радиосвязи (СВТС). Lu и соавторы предложили оценку безопасности СВТС через показатели устойчивости (Lu и др., 2021), Gao и соавторы – стратегию устойчивого управления при злонамеренных воздействиях с использованием связи между поездами (Gao и др., 2022: 21015–21033). Обзоры Soderi и соавторов описывают угрозы и средства защиты железнодорожных систем в условиях их взаимосвязанности (Soderi и др., 2023a: 6764–6779) и требования к безопасности СВТС (Soderi и др., 2023b: 92312–92321). Эти работы касаются систем сигнализации и управления

движением, тогда как диспетчерские и телеметрические системы промышленного транспорта предприятий остаются вне их рамок.

Методическая база для анализа угроз хорошо разработана. STRIDE в сочетании с оценкой DREAD применялся к распределённой системе управления нефтеперерабатывающего завода (Kim и др., 2022: 991–1003), нотации деревьев и графов атак систематизированы в обзоре Lallie и соавторов (Lallie и др., 2020). Для промышленных систем управления составлена матрица тактик MITRE ATT&CK for ICS (MITRE, 2026), а концепция зон и каналов закреплена в IEC 62443-3-2 (IEC 62443-3-2, 2020) и перенесена на железнодорожные системы в руководстве ENISA (ENISA, 2022). Требования к уровням безопасности систем задаёт IEC 62443-3-3 (IEC 62443-3-3, 2013).

Для экспериментальной проверки используются испытательные стенды. Conti и соавторы составили обзор стендов и наборов данных для исследований безопасности промышленных систем управления (Conti и др., 2021: 2248–2294); ICSSIM предлагает каркас виртуального стенда на контейнерах (Dehlaghi-Ghadim и др., 2023); моделирование на цифровых двойниках интегрируется в центр мониторинга безопасности (Dietz и др., 2020: 1–9), хотя сам двойник становится объектом угроз (Alcaraz, Lopez, 2022: 1475–1503). Работы по обнаружению вторжений сообщают точность и время обработки: облегчённые нейросетевые детекторы для промышленных систем (Kravchik, Shabtai, 2022: 2179–2197), многоуровневая гибридная система для интернета транспортных средств (Yang и др., 2022: 616–632). Механизмы изоляции – микросегментация с принципом нулевого доверия – оцениваются отдельно (Basta и др., 2022: 1–7; Federici и др., 2023).

Таким образом, в рассмотренной литературе каждая часть задачи изучена по отдельности: показатели устойчивости, модели угроз, стенды, детекторы, изоляция. Не найдено работ, в которых для информационной системы промышленного транспорта на одном стенде совместно оценивались бы обнаружение, изоляция и восстановление, а показатели безопасности (время обнаружения и восстановления, число принятых поддельных сообщений) рассматривались вместе с эксплуатационной ценой мер (задержка, потери, доступность) и с отделением атак от неумышленных отказов. Этот пробел определяет исследовательский вопрос: какая архитектура обнаружения, локализации и восстановления повышает киберустойчивость распределённой информационной системы промышленного транспорта при заданных сценариях и какова её цена для задержки и доступности?

Материалы и методы.

Исследование выполнено в пять этапов: определение границ системы; моделирование угроз; формулирование двух архитектур; дискретно-событийный эксперимент; анализ чувствительности. Проверялась гипотеза H1: предлагаемая архитектура даёт меньшее время обнаружения и время восстановления и более высокую доступность, чем базовая, во всех сценариях. Одновременно задано инженерное требование: в нормальном режиме 95-й процентиль задержки доставки телеметрии не должен превышать срок полезности данных, принятый в модели равным 1 с.

Границы системы. В модель включены 80 источников телеметрии в двух зонах (40 – подвижной состав, 40 – путевые устройства), по одному каналу на зону, ядро сети и диспетчерский сервер. Логика сигнализации и централизации, относящаяся к функциональной безопасности, в границы не входит: промышленная безопасность рассматривается только как категория последствий. Сценарии описаны через их воздействие на трафик, без технических приёмов реализации атак.

Модель угроз построена по STRIDE с отнесением каждой угрозы к сценарию эксперимента и мере защиты (таблица 1). Угрозы отказа от авторства и раскрытия информации в эксперимент не включены, поэтому со сценариями связаны четыре категории (S, T, D, E): первая относится к журналированию, вторая – к

конфиденциальности, которая не является целевым свойством диспетчерской телеметрии в данной постановке.

Таблица 1 — Модель угроз и сценарии эксперимента

Категория STRIDE	Сценарий модели	Воздействие на систему	Мера в предлагаемой архитектуре
Отказ в обслуживании (D)	S1: перегрузка канала зоны потоком 400 сообщ./с от одного узла в течение 600 с	Потеря и задержка телеметрии зоны	Ограничитель интенсивности по источнику; детектор на канале; изоляция
Подмена (S)	S2: 5 поддельных сообщ./с без действительного ключа от имени других узлов	Ложные данные в диспетчерской	Проверка подлинности на сервере; счётчик отказов; изоляция
Искажение (Т), повышение привилегий (Е)	S3: распространение заражения с узла на узлы обеих зон; заражённые узлы передают искажённую телеметрию с действительными ключами	Ложные данные; рост числа скомпрометированных узлов	Блокировка попыток в чужую зону на канале; счётчик блокировок; изоляция
То же	S3b: распространение только внутри своей зоны	То же	Те же меры; попытки внутри зоны каналу не видны
Не атака	S4: отказ диспетчерского сервера	Полная потеря приёма телеметрии	Горячий резерв; переключение по пропуску сигналов контроля
Отказ от авторства (R), раскрытие (I)	Не моделируются	—	—

Источник: составлено автором по методике STRIDE. Сокращения: S, T, R, I, D, E – категории STRIDE; S1–S4, S3b – сценарии модели.

Архитектуры. Базовая архитектура – плоская сеть с защитой периметра, без обнаружения на внутренних каналах, с ручным реагированием: операторы замечают нарушение через 300 с, блокируют источник ещё через 300 с, перезапускают сервер за 600 с, очищают заражённый узел за 1800 с. Предлагаемая архитектура (рисунок 1) делит систему на зоны с каналами, на входе канала ставит ограничитель интенсивности по источнику (5 сообщ./с, ёмкость 10 сообщений) и детектор, на сервере – проверку подлинности сообщений (0,5 мс на сообщение), добавляет контроллер изоляции и горячий резерв сервера. Ручное реагирование сохраняется как резервный механизм: в обеих архитектурах на 1500-й секунде (300 + 300 с после начала сценария) распространение заражения останавливается, а все заражённые и ещё не изолированные узлы отключаются для очистки. Значения показателей базовой архитектуры поэтому получаются арифметически из принятых времён ручного реагирования и длительности воздействия, а не из поведения модели.

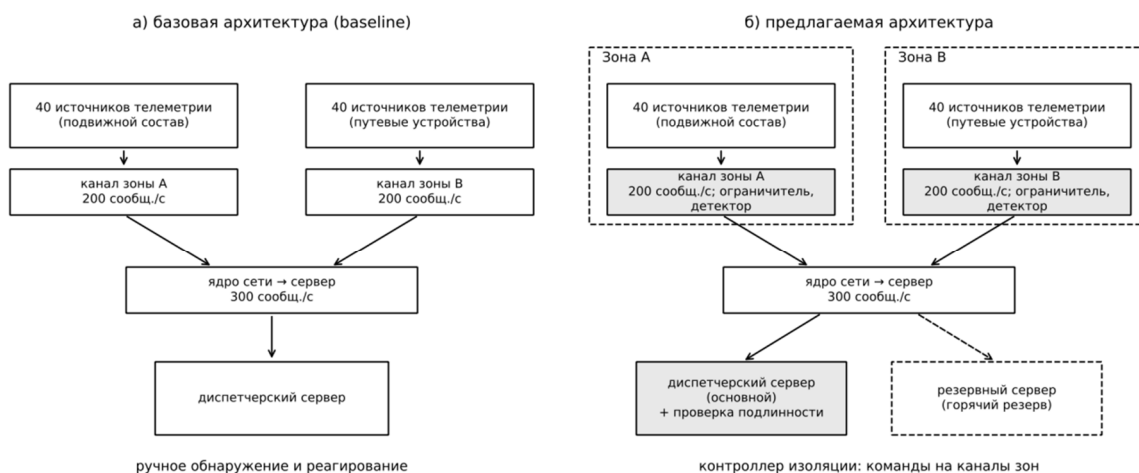


Рис. 1. Базовая и предлагаемая архитектуры информационной системы

Источник: составлено автором. Затенены элементы, добавленные в предлагаемой архитектуре; пунктиром показаны границы зон и резервный сервер.

Алгоритм обнаружения, локализации и восстановления (рисунок 2) работает по четырём признакам. Детектор на канале считает сообщения каждого источника за секунду и формирует сигнал тревоги, если счёт превышает порог две секунды подряд; порог – максимальный секундный счёт среди всех источников за первые 600 с прогона (до воздействия) плюс единица, то есть он определяется по данным каждого прогона, а не задаётся вручную. Сервер формирует сигнал тревоги при трёх отказах проверки подлинности от одного источника за 10 с, канал – при трёх заблокированных попытках соединения узла с чужой зоной за 10 с. По тревоге контроллер через 2 с изолирует источник на канале. В сценариях S1 и S2 изоляция действует до конца прогона; в сценарии S3 изолированный узел возвращается после очистки через 1800 с. Отказ сервера определяется по трём пропущенным сигналам контроля с периодом 1 с, переключение на резерв занимает 2 с.

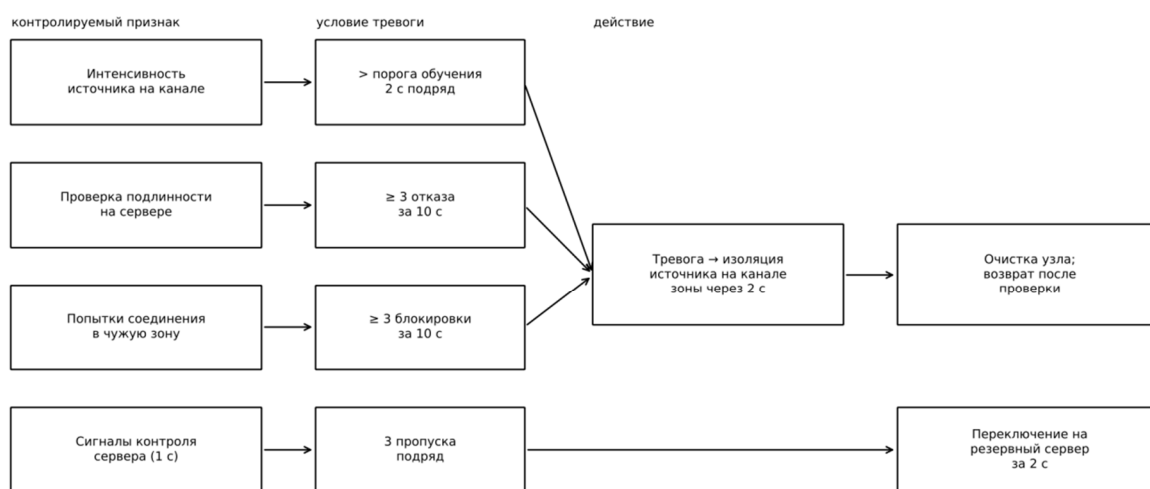


Рис. 2. Алгоритм обнаружения, локализации и восстановления

Источник: составлено автором.

Модель. Каждое сообщение проходит три очереди с обслуживанием в порядке поступления, детерминированным временем обслуживания и конечным буфером: канал зоны (200 сообщ./с, буфер 500), ядро (300 сообщ./с, буфер 500), сервер (2,5 мс на сообщение, буфер 1000), с задержкой 2 мс на переход. Источники генерируют сообщения как пуассоновский поток интенсивностью 1 сообщ./с. Длительность прогона – 3600 с, воздействие начинается на 900-й секунде и в сценариях S1 и S2 длится 600 с. В сценарии S3 каждый заражённый узел делает в среднем 2 попытки соединения в секунду с успехом 0,05 и передаёт 1 искажённое сообщение в секунду. Сообщение считается доставленным в срок, если задержка не превышает 1 с. Значения параметров (таблица 2) не измерялись на предприятии: это объявленные допущения модели, ключевые из них варьируются в анализе чувствительности.

Таблица 2 — Параметры модели

Параметр	Значение	Варьирование в анализе чувствительности
Источники телеметрии, шт. (зона А / зона В)	40 / 40	–
Интенсивность источника, сообщ./с	1,0	1,0; 1,5; 1,8
Пропускная способность канала зоны / ядра, сообщ./с	200 / 300	–

Параметр	Значение	Варьирование в анализе чувствительности
Время обработки на сервере, мс	2,5	–
Затраты на проверку подлинности, мс	0,5	0; 0,5; 2; 5
Срок полезности телеметрии, с	1,0	–
Ручное обнаружение / блокировка / перезапуск / очистка, с	300 / 300 / 600 / 1800	обнаружение: 60; 300; 900
Задержка изоляции после тревоги, с	2	2; 10; 30; 120
Вероятность заражения при попытке (S3)	0,05	0,01; 0,05; 0,2
Ограничитель: скорость, сообщ./с / ёмкость, сообщ.	5 / 10	–
Буферы канала / ядра / сервера, сообщ.	500 / 500 / 1000	–
Длительность S1 и S2, с; поток S1 / S2, сообщ./с	600; 400 / 5	–
S3: попытки соединения, 1/с; искажённые сообщения, сообщ./с	2; 1	–
Очистка узла в предлагаемой архитектуре, с	1800	–

Источник: составлено автором. Параметры ручного реагирования являются допущениями и подлежат замене данными предприятия.

Показатели. Время обнаружения (MTTD) – интервал от начала сценария до тревоги; для базовой архитектуры оно равно параметру ручного обнаружения. Доступность – доля 10-секундных интервалов за 50 минут после периода прогрева (600 с), в которых в срок доставлено не менее 95 % телеметрии и не принято ни одного поддельного сообщения. Время восстановления (MTTR) – интервал от начала сценария до конца последнего недоступного 10-секундного интервала в данном прогоне (разрешение 10 с); среднее по прогонам приводится в таблице 3. Дополнительно вычислялись потери телеметрии в окне 900–1500 с (одинаковом для всех сценариев), число принятых поддельных сообщений, число заражённых узлов, число ложных изоляций, а также медиана и 95-й перцентиль задержки в нормальном режиме – на участке 600–900 с каждого прогона, до начала воздействия.

Протокол. Для каждого из шести сценариев (S0 без воздействия, S1–S4, S3b) и каждой архитектуры выполнено 20 прогонов со значениями random seed от 0 до 19, всего 240 прогонов; анализ чувствительности – по 10 прогонов на значение параметра. Приводятся среднее и полуширина 95%-го доверительного интервала по t-распределению Стьюдента. Модель реализована на Python 3.13.16 с numpy 2.5.3, pandas 3.0.5, PyYAML 6.0.3 и matplotlib 3.11.2 и выполнялась на процессоре Intel Xeon 2,80 ГГц (2 виртуальных ядра, 7 ГБ памяти). Код, конфигурация и результаты всех прогонов сохранены; основной эксперимент занимает около 3 минут.

Результаты.

Сводные результаты основного эксперимента приведены в таблице 3. Без воздействий (S0) обе архитектуры имели доступность 1,000; ни в одном из 120 прогонов предлагаемой архитектуры, включая прогоны со сценариями воздействия, не произошло ложной изоляции добросовестного источника.

Таблица 3 — Показатели киберустойчивости по сценариям

Сценарий	Архитектура	MTTD, с	MTTR, с	Доступность	Потери в окне	Принято поддельных	Заражено узлов
S1	базовая	300 (парам.)	610	0,797	$0,4994 \pm 0,0012$	0	–
	предлагаемая	2,00	0	1,000	$0,0126 \pm 0,0002$	0	–
S2	базовая	300 (парам.)	600 ± 1	$0,7998 \pm 0,0003$	0,000	3005 ± 26	–

Сценарий	Архитектура	MTTD, с	MTTR, с	Доступность	Потери в окне	Принято поддельных	Заражено узлов
	предлагаемая	$0,65 \pm 0,18$	0	1,000	$0,0125 \pm 0,0002$	0	–
S3	базовая	300 (парам.)	2400	0,2000	0,0000	44228 ± 314	80
	предлагаемая	$3,65 \pm 0,68$	$10,5 \pm 1,0$	$0,9965 \pm 0,0003$	$0,0142 \pm 0,0020$	6 ± 1	$1,15 \pm 0,17$
S3b	базовая	300 (парам.)	2400	0,2000	0,0000	22335 ± 184	40
	предлагаемая	300 (парам.)	2400	0,2000	0,0000	22335 ± 184	40
S4	базовая	300 (парам.)	900	0,7000	1,000	0	–
	предлагаемая	3,00	10	0,997	$0,0083 \pm 0,0002$	0	–

Источник: результаты компьютерного моделирования автора, 20 прогонов на ячейку; среднее $\pm$ полуширина 95%-го доверительного интервала (не указана, если меньше единицы последнего знака). «Парам.» – значение задано параметром ручного реагирования; все показатели базовой архитектуры следуют из принятых времён ручного реагирования. Потери – в окне 900–1500 с. Доступность рассчитана за 50 мин после прогрева.

Перегрузка канала (S1) в базовой архитектуре привела к потере около половины телеметрии в окне воздействия ($0,499 \pm 0,001$) и к недоступности на 610 с. В предлагаемой архитектуре ограничитель на входе канала отбрасывал избыточный поток ещё до тревоги детектора, поэтому доступность не снижалась ни в одном прогоне. Абляционный прогон без ограничителя (20 прогонов) дал недоступность в один 10-секундный интервал – пока детектор формировал тревогу и выполнялась изоляция – и среднюю доступность 0,9967. Потери (0,013) соответствуют телеметрии самого изолированного узла. При подмене без ключа (S2) базовая архитектура приняла 3005 ± 26 поддельных сообщений, а предлагаемая не приняла ни одного – в модели проверка подлинности отбраковывает все сообщения без действительного ключа – и обнаружила источник за $0,65 \pm 0,18$ с. Значения базовой архитектуры в S1 и S2 определяются длительностью воздействия: ручная блокировка на 1500-й секунде совпадает с его окончанием.

При распространении заражения между зонами (S3) в базовой архитектуре до ручной блокировки были заражены все 80 узлов, а последующая изоляция и очистка оставили систему недоступной на 2400 с. В предлагаемой архитектуре третья заблокированная попытка выхода в чужую зону за 10 с приводила к тревоге и через 2 с – к изоляции; в среднем заражалось $1,15 \pm 0,17$ узла, время восстановления составило $10,5 \pm 1,0$ с. В сценарии S3b, где распространение шло только внутри зоны, обе архитектуры дали одинаковый результат: 40 заражённых узлов и доступность 0,200. При отказе сервера (S4) предлагаемая архитектура сократила простой до 5 с (3 с на обнаружение и 2 с на переключение на резерв), что с учётом 10-секундных интервалов даёт недоступность 10 с, против 900 с при ручном перезапуске. Кривые устойчивости для одного прогона показаны на рисунке 3.

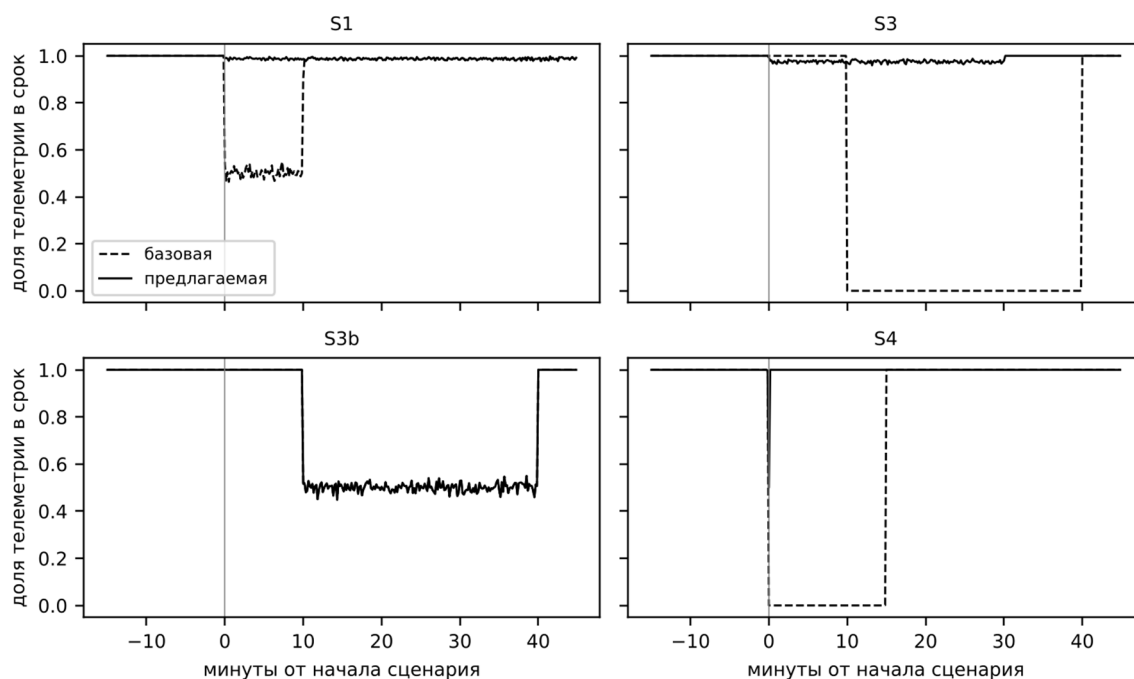


Рис. 3. Доля телеметрии, доставленной в срок, по сценариям (прогон с seed 0)

Источник: результаты компьютерного моделирования автора. Пунктир – базовая архитектура, сплошная линия – предлагаемая; интервалы 10 с. Принятые поддельные сообщения на рисунке не отражены (см. таблицу 3).

Цена защитных мер в нормальном режиме определяется заданными затратами на проверку подлинности: медиана задержки выросла с 16,8 до 17,3 мс, 95-й процентиль – с 21,6 до 22,1 мс, что выполняет инженерное требование с большим запасом. Анализ чувствительности показал, что эта цена растёт нелинейно по мере приближения нагрузки к пропускной способности сервера; сам порог перегрузки следует из арифметики пропускной способности, а модель показывает, как ведут себя задержка и доступность вблизи него. При интенсивности 1,5 сообщ./с на источник и затратах 5 мс на проверку 95-й процентиль задержки составил 130,2 мс, а при 1,8 сообщ./с и тех же затратах суммарный поток (144 сообщ./с) превысил пропускную способность сервера (около 133 сообщ./с), медианная задержка выросла до 7484,5 мс и доступность упала до 0,000. При затратах 2 мс те же нагрузки обслуживались с 95-м процентилем 30,1 и 34,8 мс.

Выводы о базовой архитектуре зависят от принятых параметров ручного реагирования. При обнаружении через 60 с вместо 300 с доступность базовой архитектуры в сценарии S1 выросла с 0,797 до 0,877, оставаясь ниже предлагаемой (1,000); при 300 и 900 с она одинакова, потому что ручная блокировка наступает не раньше окончания воздействия. Задержка изоляции от 2 до 120 с в сценарии S2 на результат не влияла: поддельные сообщения отсекались проверкой подлинности независимо от изоляции. При вероятности заражения 0,2 в сценарии S3 (10 прогонов) всего заражалось в среднем 4,1 узла (от 1 до 14), а средняя доступность предлагаемой архитектуры снижалась до 0,813; распределение двухмодальное: в 3 прогонах из 10 доступность составила около 0,39, в остальных – 0,970–0,997.

Обсуждение.

Гипотеза H1 подтвердилась частично. Для сценариев S1, S2, S3 и S4 предлагаемая архитектура дала меньшее время обнаружения и восстановления и более высокую доступность, но для S3b различий нет. Модель воспроизводит известное ограничение: сегментация по зонам и каналам, рекомендуемая IEC 62443-3-2 и руководством ENISA для железнодорожных систем (IEC 62443-3-2, 2020; ENISA, 2022), защищает от перехода между

зонами, но не видит распространения внутри зоны – в модели у предлагаемой архитектуры нет механизма обнаружения внутризонных попыток, поэтому совпадение с базовой архитектурой ожидаемо. Для таких сценариев нужны средства контроля на самих узлах или более мелкое деление, что согласуется с подходами микросегментации (Basta и др., 2022: 1–7; Federici и др., 2023).

Второе наблюдение касается механизма выигрыша. Абляционный прогон показал, что в сценарии S1 полную доступность сохранял ограничитель интенсивности: без него недоступность составляла один 10-секундный интервал до изоляции. Детектор и изоляция влияли не на доступность, а на прекращение воздействия. Это различие важно для выбора мер: если цель – сохранить приём телеметрии, первичной мерой является ограничение интенсивности на канале зоны; если цель – прекратить воздействие, нужны обнаружение и изоляция.

Третье наблюдение – цена проверки подлинности. В нормальном режиме она равна заданным долям миллисекунды, однако если сервер работает близко к пределу пропускной способности, рост нагрузки переводит его в перегрузку, и тогда защитная мера сама становится причиной отказа в обслуживании. Работы по обнаружению вторжений обычно сообщают время обработки одного пакета (Kravchik, Shabtai, 2022: 2179–2197; Yang и др., 2022: 616–632); наш результат показывает, что этот показатель нужно соотносить с запасом пропускной способности всей цепочки обработки.

По сравнению с работами по устойчивости CBTC (Lu и др., 2021; Gao и др., 2022: 21015–21033) настоящее исследование рассматривает другой класс систем – диспетчерские и телеметрические системы промышленного транспорта – и отделяет атаки от неумышленного отказа сервера. По сравнению с виртуальными стендами (Dehlaghi-Ghadim и др., 2023; Conti и др., 2021: 2248–2294) модель проще: она не воспроизводит протоколы и программное обеспечение, а описывает систему на уровне потоков сообщений. Это ограничение одновременно делает модель прозрачной: каждый результат прослеживается до объявленного параметра.

Основные ограничения исследования перечислены в заключении. Отдельно отметим, что отсутствие ложных изоляций получено на синтетическом трафике и требует проверки на реальном, а соответствие стандартам модель не оценивает: аудит не проводился.

Заключение.

Цель исследования достигнута: построена и исследована на сценариях дискретно-событийная модель распределённой информационной системы промышленного транспорта, позволяющая сравнивать архитектуры по показателям киберустойчивости и по цене защитных мер. Модель угроз по STRIDE связала четыре из шести категорий угроз с пятью сценариями воздействия, а 240 прогонов (20 значений seed на каждую пару «сценарий – архитектура») позволили оценить разброс результатов. Все результаты получены компьютерным моделированием; параметры, не измеренные на предприятии, объявлены как допущения.

Получены следующие результаты. Предлагаемая архитектура в четырёх из пяти сценариев сохранила среднюю доступность не ниже 0,996 при времени обнаружения 0,65–3,65 с, тогда как доступность базовой архитектуры составила 0,797 при перегрузке канала, 0,800 при подмене сообщений, 0,200 при распространении между зонами и 0,700 при отказе сервера. При подмене без ключа базовая архитектура приняла около 3 000 поддельных сообщений, предлагаемая – ни одного; при распространении между зонами число заражённых узлов сократилось с 80 до 1,15 в среднем. При распространении внутри одной зоны выигрыша нет: обе архитектуры показали одинаковые значения. Гипотеза H1 подтвердилась частично.

Анализ механизмов показал, что полную доступность при перегрузке сохраняло ограничение интенсивности на канале зоны: без него возникал один недоступный 10-

секундный интервал до изоляции. Обнаружение и изоляция влияли не на доступность, а на прекращение воздействия. Проверка подлинности добавила около 0,5 мс к медианной задержке (16,8 и 17,3 мс), однако при затратах 5 мс на сообщение и интенсивности 1,8 сообщ./с на источник суммарный поток превысил пропускную способность сервера, и доступность упала до нуля. Показатели базовой архитектуры определяются принятыми временами ручного реагирования: при обнаружении через 60 с вместо 300 с её доступность при перегрузке выросла с 0,797 до 0,877, оставаясь ниже предлагаемой.

Время восстановления в предлагаемой архитектуре составило около 10 с при распространении между зонами и при отказе сервера против 2 400 и 900 с в базовой архитектуре, где оно задано временем ручного устранения. Анализ чувствительности показал и границы выигрыша. При вероятности заражения 0,2 в сценарии распространения средняя доступность предлагаемой архитектуры снижалась до 0,813, причём распределение было двухмодальным: в 3 прогонах из 10 доступность составила около 0,39. Задержка изоляции от 2 до 120 с при подмене сообщений на результат не влияла, так как поддельные сообщения отсекались проверкой подлинности независимо от изоляции. Эти результаты показывают, какие параметры требуют измерения на предприятии в первую очередь.

Практическое значение состоит в том, что модель позволяет до внедрения оценить, какие меры сохраняют приём телеметрии (ограничение интенсивности, горячий резерв), какие прекращают воздействие (обнаружение и изоляция на каналах зон), где нужны средства контроля внутри зон и какой запас пропускной способности требует проверка подлинности. Для предприятий промышленного транспорта это означает, что требования к защитным мерам следует формулировать вместе с требованиями к пропускной способности диспетчерского сервера и к допустимой задержке телеметрии.

Ограничения исследования: трафик синтетический и пуассоновский, времена ручного реагирования заданы, а не измерены, набор сценариев ограничен пятью воздействиями, а результаты относятся к типовой архитектуре. Перспективы работы – замена допущений модели данными действующего предприятия промышленного транспорта, добавление сценариев с распространением внутри зоны и контролем на узлах, а также проверка модели на виртуальном стенде с реальными протоколами. Для такой замены у предприятия необходимо получить фактическое время обнаружения и устранения инцидентов персоналом, интенсивность и структуру потока телеметрии, пропускную способность диспетчерского сервера и затраты на проверку подлинности одного сообщения; по результатам анализа чувствительности выводы зависят именно от таких параметров.

REFERENCES

- Adewumi A., Hammoudeh M., Dargahi T., Jogunola O. (2024). Measuring Cyber Resilience of IoT-Enabled Critical National Infrastructures // *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 14586. — Pp. 265–280. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61486-6_16
- Alcaraz C., Lopez J. (2022). Digital Twin: A Comprehensive Survey of Security Threats // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 24. No. 3. — Pp. 1475–1503. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3171465>
- Basta N., Ikram M., Kaafar M.A., Walker A. (2022). Towards a Zero-Trust Micro-segmentation Network Security Strategy: An Evaluation Framework // *NOMS 2022 — IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. — Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789888>
- CLC/TS 50701:2023. Railway applications — Cybersecurity. — Brussels: CENELEC, 2023.
- Conti M., Donadel D., Turrin F. (2021). A Survey on Industrial Control System Testbeds and Datasets for Security Research // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 23, No. 4. — Pp. 2248–2294. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3094360>
- Dehlaghi-Ghadim A., Balador A., Moghadam M.H., Hansson H., Conti M. (2023). ICSSIM — A framework for building industrial control systems security testbeds // *Computers in Industry*. Vol. 148. — Art. 103906. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103906>
- Dietz M., Vielberth M., Pernul G. (2020). Integrating digital twin security simulations in the security operations center // *Proceedings of the 15th International Conference on Availability, Reliability and Security*. Pp. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3407023.3407039>
- European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). Zoning and Conduits for Railways. — Athens: ENISA, 2022. — URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/zoning-and-conduits-for-railways> (accessed: 10.10.2026).



- European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Transport Threat Landscape. — Athens: ENISA, 2023. — URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-transport-threat-landscape> (accessed: 10.10.2026).
- Federici F., Martintoni D., Senni V. (2023). A Zero-Trust Architecture for Remote Access in Industrial IoT Infrastructures // *Electronics*. Vol. 12, No. 3. — Art. 566. <https://doi.org/10.3390/electronics12030566>
- Gao B., Bu B., Wang X. (2022). A Comprehensive Resilient Control Strategy for CBTC Systems Through Train-to-Train Communications Under Malicious Attacks // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 23, No. 11. — Pp. 21015–21033. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192510>
- IEC 62443-3-2:2020. Security for industrial automation and control systems — Part 3-2: Security risk assessment for system design. — Geneva: IEC, 2020.
- IEC 62443-3-3:2013. Industrial communication networks — Network and system security — Part 3-3: System security requirements and security levels. — Geneva: IEC, 2013.
- Kim K.H., Kim K., Kim H.K. (2022). STRIDE-based threat modeling and DREAD evaluation for the distributed control system in the oil refinery // *ETRI Journal*. 2022. Vol. 44. No. 6. — Pp. 991–1003. <https://doi.org/10.4218/etrij.2021-0181>
- Kott A., Linkov I. (2021). To Improve Cyber Resilience, Measure It // *Computer*. Vol. 54. No. 2. — Pp. 80–85. <https://doi.org/10.1109/MC.2020.3038411>
- Kravchik M., Shabtai A. (2022). Efficient Cyber Attack Detection in Industrial Control Systems Using Lightweight Neural Networks and PCA // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. Vol. 19, No. 4. — Pp. 2179–2197. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2021.3050101>
- Lallie H.S., Debatista K., Bal J. (2020). A review of attack graph and attack tree visual syntax in cyber security // *Computer Science Review*. Vol. 35. — Art. 100219. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2019.100219>
- Lu R., Dong H., Wang H., Cui D., Zhu L., Wang X. (2021). A Resilience-Based Security Assessment Approach for CBTC Systems // *Complexity*. Vol. — Art. 2175780. <https://doi.org/10.1155/2021/2175780>
- MITRE ATT&CK for ICS: ICS Matrix. — URL: <https://attack.mitre.org/matrices/ics/> (accessed: 10.10.2026).
- Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 20 dekabrya 2016 goda № 832 «Ob utverzhdenii edinykh trebovaniy v oblasti informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologii i obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti» [Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan of 20 December 2016 No. 832 “On approval of the unified requirements in the field of information and communication technologies and information security”]. — URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1600000832> (accessed: 10.10.2026). [In Russ.]
- Ross R., Pillitteri V., Graubart R., Bodeau D., McQuaid R. (2021). Developing Cyber-Resilient Systems: A Systems Security Engineering Approach. NIST SP 800-160 Vol. 2 Rev. 1. — Gaithersburg: NIST. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-160v2r1>
- Soderi S., Masti D., Lun Y.Z. (2023). Railway Cyber-Security in the Era of Interconnected Systems: A Survey // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 24, No. 7. — Pp. 6764–6779. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3254442>
- Soderi S., Masti D., Hämäläinen M., Iinatti J. (2023). Cybersecurity Considerations for Communication Based Train Control // *IEEE Access*. Vol. 11. — Pp. 92312–92321. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3309005>
- Stouffer K., Pease M., Tang C., Zimmerman T., Pillitteri V., Lightman S., Hahn A., Saravia S., Sherule A., Thompson M. (2023). Guide to Operational Technology (OT) Security. NIST SP 800-82 Rev. 3. — Gaithersburg: NIST. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r3>
- Yang L., Moubayed A., Shami A. (2022). MTH-IDS: A Multitiered Hybrid Intrusion Detection System for Internet of Vehicles // *IEEE Internet of Things Journal*. Vol. 9, No. 1. — Pp. 616–632. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3084796>
- Zakon Respubliki Kazakhstan ot 24 noyabrya 2015 goda № 418-V «O kiberbezopasnosti» (zagolovok v redaktsii Zakona RK ot 09.01.2026 № 256-VIII) [Law of the Republic of Kazakhstan of 24 November 2015 No. 418-V “On Cybersecurity” (title as amended by Law No. 256-VIII of 9 January 2026)]. — URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1500000418> (accessed: 10.10.2026). [In Russian]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 78–89
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.007>
UDC / УДК / ЭОЖ 73.29.41

IIoT-BASED FAULT DETECTION IN A RAIL VEHICLE AIR COMPRESSOR

*S. Sailaubaiuly**

Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: sailaubaiuly@gmail.com

Samat Sailaubaiuly — PhD student, educational programme 8D06102 Information Systems, Abai Kazakh National Pedagogical University, 13 Dostyk Ave., 050010, Almaty, Kazakhstan
E-mail: sailaubaiuly@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0458-3242>.

© S. Sailaubaiuly

Abstract. Scheduled maintenance does not always reflect the actual condition of equipment, and the built-in threshold signals fire only after a failure has begun. We assess, at event level, whether anomaly detection models applied to IIoT telemetry detect a failure earlier than the built-in threshold method or with fewer false alarms. The data are the open MetroPT-3 dataset from the air production unit of a metro train (February–August 2020, 1,516,948 records, 15 signals, CC BY 4.0 licence, 4 failures from company reports) and the MetroPT2 dataset (2022, 2 failures) for a transfer test. The methods comprised 38 features in 10-minute windows, a strictly chronological split, Isolation Forest, One-Class SVM, a fully connected autoencoder, an EWMA control chart and the built-in LPS rule; thresholds were chosen on validation data for a target number of false alarms per day, and each model was run with 5 random seeds. At the pre-set operating point of 0.1 false alarms per day the models detected on average 0–0.6 of 4 failures, EWMA 1, and no method alarmed before the reported start. With thresholds calibrated to 0.5 false alarms per day, the models and EWMA detected on average 3.8–4.0 failures at 0.15–0.19 false alarms per day, the built-in rule 3 failures at 0.66; median lead times were negative. The models ranked windows near failures better than EWMA (PR-AUC 0.40–0.45 versus 0.24). Models trained on 2020 data kept this ability on 2022 data (PR-AUC 0.69–0.73), but the 2020 threshold was too high. The novelty is an event-level comparison with the built-in rule on real metro compressor data, with a chronological protocol and a transfer test. In practice, the threshold can be set from the false-alarm rate a maintenance team accepts. Early warning was not demonstrated; thresholds must be recalibrated for each asset.

Keywords: IIoT, anomaly detection, condition-based maintenance, air compressor, event-level evaluation, false alarms

For citation: Sailaubaiuly S. (2026). IIoT-Based Fault Detection in a Rail Vehicle Air Compressor // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 78–89. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.007> (In Kaz.).

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

IIoT ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША РЕЛЬСТІК КӨЛІК КОМПРЕССОРЫНЫҢ АҚАУЛАРЫН АНЫҚТАУ

*С. Сайлаубайұлы**

Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: sailaubaiuly@gmail.com

Сайлаубайұлы Самат — PhD докторанты, 8D06102 – «Ақпараттық жүйелер» білім беру бағдарламасы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Достық даңғылы, 13, 050010, Алматы, Қазақстан.

E-mail: sailaubaiuly@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0458-3242>

© Сайлаубайұлы С.

Аннотация. Жоспарлы техникалық қызмет көрсету жабдықтың нақты күйін әрдайым ескермейді, ал штаттық шекті сигналдар ақау басталғаннан кейін іске қосылады. Зерттеудің мақсаты – ПоТ телеметриясы бойынша аномалияларды анықтау модельдері ақауды штаттық шекті әдіске қарағанда ертерек немесе азырақ жалған дабылмен анықтай ала ма – осыны оқиғалар деңгейінде бағалау. Деректер – метро пойызының ауа өндіру агрегатының ашық MetroPT-3 жиыны (2020 ж. ақпан–тамыз, 1 516 948 жазба, 15 сигнал, CC BY 4.0 лицензиясы, кәсіпорын есептерінде тіркелген 4 ақау) және модельді басқа кезеңге ауыстыруды тексеруге арналған MetroPT2 жиыны (2022 ж., 2 ақау). Әдістер: 10 минуттық терезелердегі 38 белгі, қатан хронологиялық бөлу, Isolation Forest, One-Class SVM, толық байланысты автокодтаушы, EWMA бақылау картасы және LPS штаттық ережесі; шекті мән жалған дабылдардың берілген тәуліктік деңгейі бойынша валидацияда тандалды; әр модель бес түрлі кездейсоқ бастапқы мәнмен (random seed) іске қосылды. Нәтижелер: алдын ала белгіленген тәулігіне 0,1 жалған дабыл деңгейінде модельдер 4 ақаудың орта есеппен 0–0,6-сын, EWMA 1-ін анықтады және ешбір әдіс ақауды есептегі басталу уақытынан бұрын анықтаған жоқ. Тәулігіне 0,5 деңгейде модельдер мен EWMA орта есеппен 3,8–4,0 ақауды тәулігіне 0,15–0,19 жалған дабылмен анықтады, ал штаттық ереже 3 ақауды тәулігіне 0,66 жалған дабылмен анықтады; ескерту уақытының медианасы барлық әдістерде теріс болды. Модельдер ақау маңындағы терезелерді EWMA-ға қарағанда жақсырақ ажыратты (PR-AUC 0,40–0,45, EWMA үшін 0,24). 2020 жылғы модельдер 2022 жылғы деректерде ажырату қабілетін сақтады (PR-AUC 0,69–0,73), бірақ 2020 жылғы шекті мән тым жоғары болды. Ғылыми жаңалығы – метро компрессорының нақты пайдалану деректерінде модельдерді штаттық ережемен оқиғалар деңгейінде, хронологиялық хаттамамен және кезеңдер арасында ауыстыруды тексерумен салыстыру. Практикалық маңызы – дабыл шегін техникалық қызмет көрсету қызметі қабылдай алатын жалған дабылдар саны бойынша таңдау әдістемесі. Қорытынды: ерте ескерту байқалған жоқ, ал шекті мәнді нақты нысанның деректерінде қайта калибрлеу қажет.

Түйін сөздер: ПоТ, аномалияларды анықтау, күйі бойынша техникалық қызмет көрсету, компрессорлық агрегат, оқиғалар деңгейіндегі бағалау, жалған дабылдар

Дәйексөз үшін: Сайлаубайұлы С. (2026). ПоТ деректері бойынша рельстік көлік компрессорының ақауларын анықтау // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 78–89 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.007> (Қаз. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ОБНАРУЖЕНИЕ ОТКАЗОВ КОМПРЕССОРА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ПО ДАННЫМ ПоТ

*С. Сайлаубайұлы**

Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан.

Сайлаубайұлы Самат — PhD-докторант, образовательная программа 8D06102 – «Информационные системы», Казахский национальный педагогический университет имени Абая, пр. Достык, 13, 050010, Алматы, Казахстан

E-mail: sailaubaiuly@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0458-3242>.

© Сайлаубайұлы С.



Аннотация. Плановое техническое обслуживание не всегда учитывает фактическое состояние оборудования, а штатные пороговые сигналы срабатывают уже после начала отказа. Цель исследования – оценить на уровне событий, позволяют ли модели обнаружения аномалий по телеметрии ПоТ выявлять отказ раньше штатного порогового метода или с меньшим числом ложных тревог. Данные – открытый набор MetroPT-3 по воздухоприготовительному агрегату (APU) поезда метро (февраль–август 2020 г., 1 516 948 записей, 15 сигналов, лицензия CC BY 4.0, 4 отказа по отчётам предприятия) и набор MetroPT2 (2022 г., 2 отказа) для проверки переносимости. Методы: 38 признаков в 10-минутных окнах, строго хронологическое разбиение, Isolation Forest, One-Class SVM, полносвязный автокодировщик, контрольная карта EWMA и штатное правило LPS; порог выбирался на валидации по заданному числу ложных тревог в сутки; каждая модель запускалась с пятью значениями random seed. Результаты: при заранее заданной рабочей точке 0,1 ложной тревоги в сутки модели обнаружили в среднем 0–0,6 из 4 отказов, EWMA – 1, и ни один метод не дал тревоги раньше начала отказа по отчёту. При калибровке на 0,5 ложной тревоги в сутки модели и EWMA обнаружили в среднем 3,8–4,0 из 4 отказов при 0,15–0,19 ложной тревоги в сутки, а штатное правило – 3 отказа при 0,66 ложной тревоги в сутки; медиана упреждения у всех методов отрицательна. Модели лучше EWMA ранжировали окна вблизи отказов (PR-AUC 0,40–0,45 против 0,24). Модели, обученные на данных 2020 г., сохранили ранжирующую способность на данных 2022 г. (PR-AUC 0,69–0,73), но порог 2020 г. оказался слишком высоким. Научная новизна – событийное сравнение моделей со штатным правилом на реальных эксплуатационных данных компрессора метро при хронологическом протоколе и проверке переноса между периодами. Практическое значение – методика выбора порога тревоги по допустимому для службы обслуживания числу ложных тревог. Вывод: раннее предупреждение не подтверждено, а порог необходимо калибровать на данных конкретного объекта.

Ключевые слова: ПоТ, обнаружение аномалий, обслуживание по состоянию, компрессорный агрегат, событийная оценка, ложные тревоги

Для цитирования: Сайлаубайұлы С. (2026). Обнаружение отказов компрессора рельсового транспорта по данным ПоТ // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 78–89. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.007> (На каз.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Кіріспе.

Өнеркәсіптік және қалалық рельстік көліктің жылжымалы құрамында пневматикалық жүйелер тежеу мен көмекші жетектерді сығылған ауамен қамтамасыз етеді, ал ауа өндіру агрегатының (компрессордың) істен шығуы пойыздың желіден алынуына әкелуі мүмкін. Мұндай жабдыққа техникалық қызмет көрсету көбіне жоспарлы кесте бойынша жүргізіледі және агрегаттың нақты күйін ескермейді, сондықтан ақау қызмет көрсету аралығында пайда болуы мүмкін. Күйі бойынша қызмет көрсету мен болжамды қызмет көрсетудің мақсаты – бұл олқылықты датчик деректері арқылы жою (Zio, 2022: 108119; Carvalho және т.б., 2019: 106024).

Қазіргі жылжымалы құрамда датчиктер деректерін борттық ПоТ құрылғылары жинайды, бірақ олармен қатар штаттық шекті сигналдар да жұмыс істейді: мысалы, қысым белгіленген деңгейден төмен түскенде іске қосылатын сигнал. Мұндай сигнал ақау басталғаннан кейін ғана дабыл береді. Машиналық оқыту модельдерінен көбіне ерте анықтау күтіледі (Zio, 2022: 108119), алайда қаралған жұмыстарда бұл күту штаттық ережемен салыстырылып, жалған дабылдар құнымен бірге тексерілмеген (төменде қараңыз).

Мұндай салыстырудың нәтижесі бағалау әдістемесіне қатты тәуелді. Уақыттық қатарлардағы аномалияларды анықтау бойынша жарияланған көптеген нәтижелер нүктелік түзету сияқты тәсілдердің есебінен асыра бағаланатыны көрсетілген (Kim және т.б., 2022:

7194–7201), ал кең тараған эталондық жиындардың өзі сынға ұшыраған (Wu, Keogh, 2021). Техникалық қызмет көрсету қызметі үшін маңыздысы – терезелер деңгейіндегі метрикалар емес, нақты ақаудың қаншалықты ерте анықталатыны және тәулігіне қанша жалған дабыл берілетіні. Сондықтан модельдерді оқиғалар деңгейінде, шекті мәнді тест кезеңіне дейін бекітіп, уақыт бойынша бөлінген деректерде бағалау қажет.

Ашық MetroPT деректер жиындары мұндай бағалауды қайталанатын түрде жүргізуге мүмкіндік береді: оларда метро пойызының ауа өндіру агрегатының пайдалану кезеңіндегі телеметриясы және кәсіпорын есептерінде тіркелген ақаулар бар (Veloso және т.б., 2022a). Бұл деректер Қазақстанның өнеркәсіптік көлігіне тікелей қатысты емес, бірақ ұсынылған бағалау хаттамасы жабдық түріне тәуелсіз, сондықтан оны кейін өнеркәсіптік локомотивтер мен вагондардың пневматикалық жүйелерінің деректерінде қолдануға болады; мұндай көшірудің нәтижесі бөлек тексеруді қажет етеді.

Зерттеу нысаны – метро пойызы ауа өндіру агрегатының IoT телеметриясы. Зерттеу пәні – уақыттық қатарлардағы аномалияларды анықтау әдістері және дабыл шегін таңдау ережесі. Мақсат – аномалияларды анықтау модельдері ақауды штаттық шекті әдіске қарағанда ертерек немесе азырақ жалған дабылмен анықтай ала ма – осыны оқиғалар деңгейінде бағалау. Міндеттер: ашық деректерге аудит жүргізу; хронологиялық бағалау хаттамасын құру; модельдерді штаттық ережемен және статистикалық бақылау картасымен салыстыру; модельдердің 2020 жылдан 2022 жылға ауыстырылуын тексеру. Мақалада агрегаттың қалдық ресурсын (RUL) болжау қарастырылмайды: қолжетімді деректерде агрегаттың «істен шыққанға дейінгі» толық циклдері жоқ.

Жұмыста екі болжам тексеріледі. Біріншісі – кем дегенде бір модель штаттық ережеге қарағанда ақауды ертерек ескертеді және бұл ретте тәулігіне жалған дабылдар саны одан көп болмайды. Екіншісі – 2020 жылғы деректерде оқытылған модель 2022 жылғы ақауларды анықтау қабілетін сақтайды. Бірінші болжам ерте ескерту туралы кең тараған күтуді тексереді, ал екіншісі модельді жабдықтың басқа пайдалану кезеңіне қайта оқытусыз қолдануға бола ма деген практикалық сұраққа жауап береді.

Мақала келесі түрде құрылған: әдебиетке шолу бөлімінде MetroPT деректері бойынша бұрынғы жұмыстар мен бағалау әдістемесіне қатысты сын талданып, зерттеу сұрақтары тұжырымдалады; «Материалдар мен әдістер» бөлімінде деректер аудиті, белгілер, модельдер, шекті мәнді калибрлеу және оқиғалар деңгейіндегі көрсеткіштер сипатталады; «Нәтижелер» бөлімінде 2020 жылғы тест кезеңі мен 2022 жылғы деректердегі нәтижелер келтіріледі; «Талқылау» және «Қорытынды» бөлімдерінде практикалық салдары мен шектеулері қарастырылады.

MetroPT деректері Порту қаласының метро операторымен бірлескен жобада жинақталған. Veloso және әріптестері деректер жиынының құрылымын, сигналдарын және ақаулар туралы есептерді сипаттады (Veloso және т.б., 2022a). Осы агрегаттың 2020 жылғы деректерін Davari және әріптестері терең оқытуға негізделген аномалияларды анықтау үшін пайдаланды (Davari және т.б., 2021: 1–10), кейін аномалияларды анықтау мен түсіндіру тәсілі ұсынылды (Davari және т.б., 2024: 358–364). Агрегаттың ақауын пайдалану жағдайында анықтау бойынша ертерек жұмыс та бар (Bartos және т.б., 2020: 61–74).

Кейінгі жұмыстар ағындық оқытуға бағытталған. Meira және әріптестері теміржол жүйелері үшін ағындық деректерге негізделген болжамды қызмет көрсету шеңберін ұсынды (Meira және т.б., 2023: 1087–1102); Zafra және әріптестері MetroPT-3 деректерінде болжау, автокодтаушы және бірнеше сигналдың бір мезгілде ауытқуын талап ететін ережені біріктірді (Zafra және т.б., 2024: 339–351); García-Méndez және әріптестері 2022 жылғы деректерде түсіндірмелі инкременттік жіктеуіштерді қолданды (García-Méndez және т.б., 2025). Соңғы жұмыста ақаудың алдындағы 2 сағат ақау ретінде белгіленеді және тек ақаулар маңындағы аралықтар сақталады, гиперпараметрлер кездейсоқ ішкі іріктемеде таңдалады; нәтижелер нүктелік F-өлшеммен беріледі.

Уақыттық қатарлардағы аномалияларды анықтау әдістерін бағалау әдістемесінің өзі де сынға ұшырап отыр. Kim және әріптестері нүктелік түзету (point adjustment) нәтижелерді асыра бағалайтынын көрсетті (Kim және т.б., 2022: 7194–7201), ал Wu мен Keogh кең таралған эталондық жиындардың кемшіліктері прогресс елесін тудыратынын атап өтті (Wu, Keogh, 2021). Hundman және әріптестері ғарыш аппараттары телеметриясы үшін оқиғалар деңгейіндегі бағалау мен динамикалық шекті мәнді қолданды (Hundman және т.б., 2018: 387–395). Теңгерімсіз деректерде дәлдік–толықтық қисығы ROC қисығына қарағанда көбірек ақпарат береді (Davis, Goadrich, 2006: 233–240; Saito, Rehmsmeier, 2015).

Қаралған әдебиетте MetroPT деректері бойынша (1) модельдерді агрегаттың штаттық шекті ережесімен салыстыру, (2) ақауға дейінгі ескерту уақыты мен тәулігіне жалған дабылдар саны сияқты оқиғалар деңгейіндегі көрсеткіштер, (3) қатаң хронологиялық хаттама және (4) модельді бір пайдалану кезеңінен екіншісіне ауыстыру бір жұмыста кездеспеді. Осыған байланысты зерттеу сұрағы: IoT телеметриясы бойынша аномалияларды анықтау модельдері компрессор ақауын штаттық шекті әдіске қарағанда ертерек немесе азырақ жалған дабылмен анықтай ала ма және бұл артықшылық басқа пайдалану кезеңінде сақтала ма?

Материалдар мен әдістер.

Зерттеу бес кезеңнен тұрады: деректер аудиті; белгілерді құру; модельдерді оқыту және шекті мәнді калибрлеу; оқиғалар деңгейінде бағалау; модельді басқа кезеңге ауыстыруды тексеру. Екі болжам тексерілді. H1: кем дегенде бір модель штаттық ережеге қарағанда ертерек ескертеді және тәулігіне жалған дабылдар саны одан көп емес. H2: 2020 жылғы деректерде оқытылған модель 2022 жылғы ақауларды анықтауды сақтайды.

Деректер. Негізгі жиын – MetroPT-3 (Davari және т.б., 2023; CC BY 4.0 лицензиясы). Аудит көрсеткендей, CSV файлы 1 516 948 жазбадан тұрады және 10 с қадаммен жазылған (0,1 Гц), ал сипаттамада 1 Гц жиілігі және 15 169 480 нүкте көрсетілген; жазбалар саны сипаттамадағы нүктелер санының оннан біріне тең. Өткізіп алынған мәндер жоқ, бірақ 60 с-тан ұзақ 331 үзіліс бар, олардың жалпы ұзақтығы 909,5 сағ; ең ұзағы – 2020 жылғы 25–27 сәуірдегі 48 сағаттық үзіліс. Деректер 2020 жылғы 1 ақпаннан 1 қыркүйекке дейінгі кезеңді қамтиды. Жеті аналогтық сигнал (TP2, TP3, H1, DV_pressure, Reservoirs, Oil_temperature, Motor_current) және сегіз дискретті сигнал (COMP, DV_electric, Towers, MPG, LPS, Pressure_switch, Oil_level, Caudal_impulses) бар; файлдағы баған атаулары осылай жазылған. Ақаулар туралы кәсіпорын есептері деректер бетінде берілген: 4 ақау, барлығы «ауаның ағуы» түрінде (1-кесте).

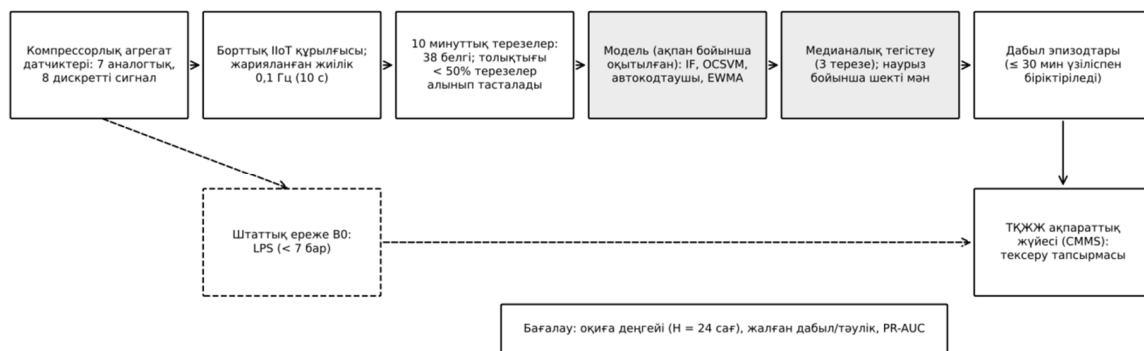
Кесте 1 — Деректер жиыны, бөлу және ақаулар

Көрсеткіш	Мәні	Ескертпе
Кезең; жазбалар саны	01.02–01.09.2020; 1 516 948	қадамы 10 с (0,1 Гц)
Үзілістер > 60 с; жалпы ұзақтығы	331; 909,5 сағ	ең ұзағы 48 сағ
Оқыту (ақпан) / валидация (наурыз) / тест (сәуір–тамыз), терезе	3552 / 3809 / 17895	24,7 / 26,5 / 124,3 тәулік
Ақау 1	18.04.2020 00:00 – 23:59	ауаның ағуы
Ақау 2	29.05.2020 23:30 – 30.05.2020 06:00	ауаның ағуы; есепте қызмет көрсету күні «30 Apr» деп кате берілген
Ақау 3	05.06.2020 10:00 – 07.06.2020 14:30	ауаның ағуы; деректермен қамтылуы 92%
Ақау 4	15.07.2020 14:30 – 19:00	ауаның ағуы
MetroPT2 (ауыстыруды тексеру)	28.04–28.07.2022; 7 116 940 жазба, 1 Гц	0,1 Гц-ке келтірілді; 2 ақау (ауа, май ағуы)

Дереккөз: MetroPT-3 және MetroPT2 деректері мен беттері негізінде автордың аудиті. Терезе – 10 минуттық аралық; тәулік – деректермен қамтылған уақыт.

Сигналдар аяқталу уақытымен белгіленетін 10 минуттық қабаттаспайтын терезелерге топтастырылды; әр терезе тек өз ішіндегі мәндерді пайдаланады, сондықтан болашақтан ақпарат кірмейді. Әр аналогтық сигнал үшін орташа мән, стандартты ауытқу, минимум және максимум, әр дискретті сигнал үшін белсенді күйдің үлесі есептелді. Сонымен қатар қозғалтқыш тогы 5,5 А-дан жоғары болған уақыт үлесі (жүктемедегі жұмыс үлесі; сипаттамада бос жүріс шамамен 4 А, жүктеме шамамен 7 А деп берілген) және СОМР сигналының ауысу саны қосылды. Барлығы 38 белгі. Өлшеулердің 50 %-ынан азы бар терезелер алынып тасталды.

Бөлу және деректердің ағып кетуін (data leakage) болдырмау. Бөлу қатаң хронологиялық: оқыту – 2020 жылғы ақпан (деректер бетінде ұсынылғандай, бірінші ай), валидация – наурыз (ақаулар жоқ, тек шекті мәнді таңдау үшін), тест – сәуір–тамыз. Масштабтау параметрлері (медиана мен квантиль аралығы; стандартталған мәндер ± 50 -пен шектеледі) бағаланып, модельдер тек оқыту іріктемесінде оқытылды. В0-ден басқа барлық әдістерге себептік өңдеу қолданылды: соңғы 3 терезе бойынша медианалық тегістеу; 30 минуттан аз үзілісі бар дабылдарды бір эпизодқа біріктіру барлық әдістерге ортақ (1-сурет).



Сур. 1. IoT деректерін өңдеу және дабыл қалыптастыру схемасы

Дереккөз: автор құрастырған. IF – Isolation Forest; OCSVM – One-Class SVM; EWMA – экспоненциалды өлшенген жылжымалы орташа; ТҚЖЖ – техникалық қызмет көрсету және жөндеу; CMMS – техникалық қызмет көрсетуді басқару жүйесі.

Модельдер мен салыстыру негіздері. В0 – агрегаттың штаттық ережесі: терезеде LPS сигналы (қысым 7 бардан төмен) белсенді болса, дабыл беріледі; бұл ереже калибрленбейді. В1 – жүктемедегі жұмыс үлесі бойынша бір жақты EWMA бақылау картасы ($\alpha = 0,1$), мәндері оқыту кезеңінің орташа мәні мен стандартты ауытқуы бойынша стандартталады (Roberts, 1959: 239–250); $L \cdot \sigma$ бақылау шектерінің орнына оның шекті мәні модельдердікі сияқты калибрленеді. Модельдер: Isolation Forest (200 ағаш; аномалия бағасы – score_samples мәнінің теріс таңбалысы) (Liu және т.б., 2008: 413–422); One-Class SVM ($\nu = 0,01$, RBF ядросы, $\gamma = \text{scale}$, оқыту іріктемесінен 3000 терезелік ішкі іріктеме; баға – decision_function мәнінің теріс таңбалысы) (Schölkopf және т.б., 2001: 1443–1471); 16–4–16 құрылымды толық байланысты автокодтаушы (ReLU, Adam, ең көбі 400 итерация, ерте тоқтату; баға – қалпына келтірудің орташа квадраттық қатесі). Әр модель 0–4 кездейсоқ бастапқы мәндермен (random seed) бес рет оқытылды.

Шекті мәнді калибрлеу. Шекті мән валидация кезеңінде таңдалады: тегістелген бағалардың 90–100 % квантильдері ішінен валидациядағы дабыл эпизодтарының тәуліктік саны берілген деңгейден (0,05; 0,1; 0,2; 0,5 тәулігіне) аспайтын ең кіші мән алынады. Тест кезеңінде шекті мән өзгертілмейді. Осылайша, жалған дабылдардың рұқсат етілген саны инженерлік талап ретінде алдын ала белгіленеді, ал оның нақты деңгейін техникалық қызмет көрсету қызметі анықтауы тиіс.

Көрсеткіштер. Егер [басталуы – Н; аяқталуы] аралығында кемінде бір дабыл болса, ақау анықталды деп саналады; негізгі көкжиек $H = 24$ сағ, сезімталдық үшін 6, 12 және 48 сағ қарастырылды. Ескерту уақыты – есептегі басталу уақыты мен алғашқы дабыл арасындағы айырма (оң мән – ақаудан бұрын). Жалған дабыл – [басталуы – Н; аяқталуы + 24 сағ] аймақтарынан тыс басталған эпизод; олардың саны осы аймақтардан тыс деректермен қамтылған уақыттың тәулігіне келтіріледі. Терезелер деңгейінде дәлдік–толықтық қисығы бойынша орташа дәлдік (average precision, мақалада PR-AUC) есептелді: оң класс – [басталуы – Н; аяқталуы] аралығындағы терезелер, ақаудан кейінгі 24 сағаттық терезелер есептен алынып тасталды; оң кластың үлесі тестте 0,056, бұл кездейсоқ PR-AUC деңгейі. Есептеу кідірісі белгілерді есептемей, тест іріктемесін бағалау уақытын терезелер санына бөлу арқылы өлшенді.

Басқа кезеңге ауыстыруды тексеру (H2). MetroPT2 жиыны (Veloso және т.б., 2022b; CC BY 4.0; 2022 жылғы 28 сәуір – 28 шілде, 1 Гц; MD5 бақылау сомасы көрсетілгенмен сәйкес келді) әр 10 секундтық аралықтағы бірінші өлшемді алу арқылы 0,1 Гц-ке келтірілді. Екі баптау салыстырылды: (а) 2020 жылғы модельдер мен шекті мәндер өзгеріссіз қолданылды; (б) модельдер сол хаттама бойынша 2022 жылғы деректерде қайта оқытылды (оқыту 28.04–15.05, валидация 15.05–01.06). Екі жағдайда да тест кезеңі бірдей – 2022 жылғы 1 маусым – 28 шілде, 2 ақау: ауаның ағуы (04.06) және майдың ағуы (11.07–14.07).

Қайталанушылық. Есептеулер Python 3.13.16, numpy 2.5.3, pandas 3.0.5, scikit-learn 1.9.1 кітапханаларымен Intel Xeon 2,80 ГГц процессорында (2 виртуалды ядро, 7 ГБ жад, GPU жоқ) орындалды; белгілер есептелгеннен кейін негізгі эксперимент 28 с алды. Код, конфигурация, деректер мұрағатының SHA-256 бақылау сомасы, MetroPT2 файлының MD5 бақылау сомасы және барлық іске қосулардың нәтижелері сақталды; кодты құрылымдық өзгертуден кейін қайта жүргізгенде 580 нәтиже жазбасының бірде-бір мәні өзгермеді.

Нәтижелер.

Негізгі нәтижелер 2-кестеде келтірілген. Алдын ала негізгі деп белгіленген тәулігіне 0,1 жалған дабыл деңгейінде модельдер 4 ақаудың орта есеппен тек 0–0,6-сын анықтады: One-Class SVM бірде-бірін, Isolation Forest 0,4-ін, автокодтаушы 0,6-сын, ал EWMA 1-ін; 0,1 және 0,2 деңгейлерінде ешбір әдістің бірде-бір іске қосылуында дабыл ақаудың есептегі басталуынан бұрын берілмеді. Деңгей тәулігіне 0,5-ке дейін жұмсартылғанда модельдер мен EWMA орта есеппен 3,8–4,0 ақауды анықтады, ал тесттегі нақты жалған дабылдар деңгейі тәулігіне 0,15–0,19 болды. Штаттық ереже 3 ақауды анықтады, бірақ 114,5 тәулік ішінде 75 жалған дабыл эпизоды берді (тәулігіне 0,655); бұл көрсеткіш жеке тексеру скриптімен қайта есептеліп, сәйкес келді.

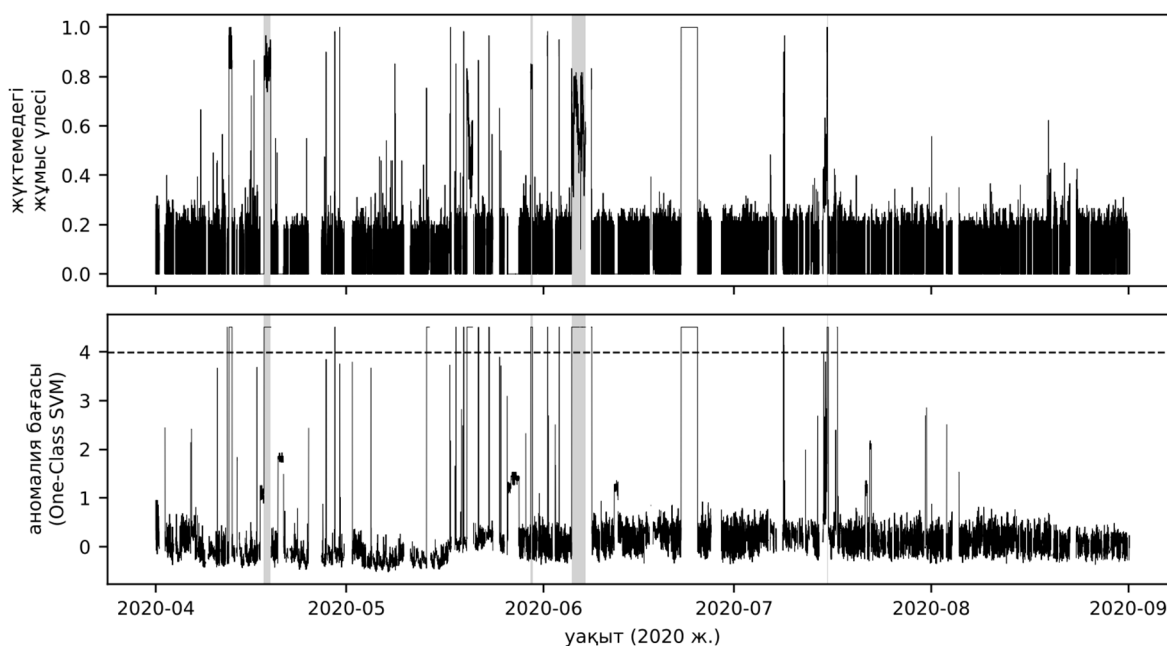
Кесте 2 — Ақауларды анықтау нәтижелері, MetroPT-3, $H = 24$ сағ

Әдіс	Ақау (4-тен), 0,1/тәул.	Ақау (4-тен), 0,5/тәул.	Ескерту медианасы, сағ (0,5)	Жалған дабыл/тәул. (0,5)	PR-AUC
B0: штаттық LPS ережесі	3 (калибренбейді)	3	-3,00	0,655	0,059
B1: EWMA	1,0	4,0	-0,33	0,183	0,235
Isolation Forest	$0,4 \pm 0,5$	$3,8 \pm 0,4$	-0,25	$0,150 \pm 0,018$	$0,400 \pm 0,036$
One-Class SVM	0,0	4,0	-0,25	$0,169 \pm 0,004$	$0,446 \pm 0,005$
Автокодтаушы	$0,6 \pm 0,8$	$3,8 \pm 0,4$	-0,17	$0,194 \pm 0,052$	$0,432 \pm 0,039$

Дереккөз: автордың ашық деректерді талдау нәтижелері. Мәндер – 5 іске қосу бойынша орташа $\pm$ стандартты ауытқу (ауытқу нөлге тең болса көрсетілмейді); 0,1 және 0,5 – валидацияда берілген тәуліктік жалған дабыл деңгейі. Ескерту медианасы – іске қосулардағы медианалардың медианасы; теріс мән дабыл ақау басталғаннан кейін берілгенін білдіреді.

Ескерту уақытының медианасы барлық әдістерде теріс: тәулігіне 0,5 деңгейде дабыл ақау басталғаннан кейін 10–20 минутта беріледі, бұл терезенің аяқталу уақытымен белгіленуі мен үш терезелік тегістеудің құрылымдық кешігуімен шамалас. Жекелеген он мәндер (0,8–13,7 сағ) тек 4-ақауға қатысты: автокодтаушының 4 іске қосылуында, One-Class SVM-нің 2 іске қосылуында және EWMA-да. Штаттық ереже 1-ақауды басталуынан 19,2 сағ бұрын белгіледі, бірақ тәулігіне 0,66 жалған дабыл жиілігінде кез келген 24 сағаттық терезеде кемінде бір дабылдың болу ықтималдығы шамамен 0,48 ($1 - e^{(-0,655)}$), сондықтан бұл сәйкестік кездейсоқ болуы мүмкін. Н1 болжамы (ертерек және жалған дабылдар көп емес) расталмады. Жалған дабылдар бойынша артықшылық жеке нәтиже ретінде байқалды: тәулігіне 0,15–0,19 жалған дабылмен 3,8–4 ақау, штаттық ережеде 0,66 жалған дабылмен 3 ақау. Тәулігіне 0,1 және 0,2 деңгейлерде EWMA модельдерден де жақсы болды (1 және 4 ақау, модельдерде 0–0,6 және 1,4–3,0).

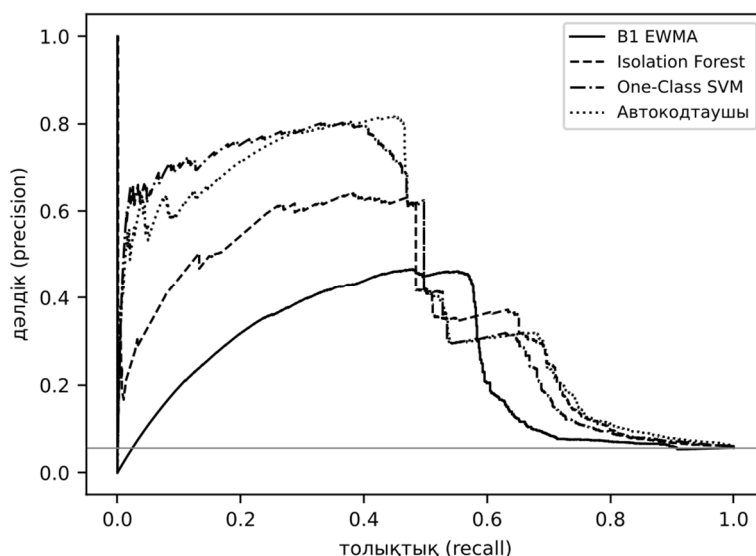
Терезелер деңгейінде модельдер ақаулар маңындағы аралықтарды EWMA-ға қарағанда әлдеқайда жақсы ажыратты (PR-AUC 0,40–0,45, EWMA үшін 0,24; кездейсоқ деңгей 0,056; 2-сурет, 3-сурет). Абляция көрсеткендей, дискретті сигналдарды алып тастау қатаң шекті мәнде анықтауды арттырады (Isolation Forest: 1,4 және 0,4 ақау; автокодтаушы: 1,0 және 0,6), бірақ PR-AUC мәнін төмендетеді (Isolation Forest: 0,382 және 0,400). Белгілерді есептемегенде бір терезені бағалау уақыты 0,001–0,008 мс, яғни бағалаудың өзі шектеуші фактор емес.



Сур.2. Жүктемедегі жұмыс үлесі және One-Class SVM аномалия бағасы, тест кезеңі 2020 ж.

Дереккөз: автордың есептеулері (random seed 0). Сұр жолақтар – есептердегі ақау аралықтары; үзік сызық – тәулігіне 0,5 жалған дабыл деңгейіне калибрленген шекті мән; баға мәндері шекті мәнің үш еселенген деңгейінде қиылған.

2-суретте 2020 жылғы 22–25 маусымда шамамен 62 сағат бойы агрегаттың үздіксіз жүктемеде жұмыс істегені көрінеді; бұл аралық ақаулар туралы есептерде жоқ, бірақ One-Class SVM, автокодтаушы және EWMA оны аномалия ретінде белгілейді (Isolation Forest, seed 0 – белгілемейді). Мұндай эпизодтар есептеуде жалған дабыл болып саналады, дегенмен олар есепке алынбаған нақты ауытқулар болуы мүмкін; бұл ақау таңбаларының (labels) сапасына қатысты шектеу.



Сур.3. Тест кезеңіндегі дәлдік–толықтық қисықтары, $N = 24$ сағ

Дереккөз: автордың есептеулері (random seed 0). Көлденең сұр сызық – кездейсоқ деңгей (0,056).

Басқа кезеңге ауыстыру нәтижелері 3-кестеде берілген. 2020 жылғы модельдер 2022 жылғы деректерде терезелерді жақсы ажыратты (PR-AUC 0,69–0,73; 2022 жылғы кездейсоқ деңгей 0,063; 2022 жылғы деректерде оқытылған модельдерде 0,64–0,74), бірақ 2020 жылғы шекті мән тым жоғары болды: тәулігіне 0,1 деңгейде бірде-бір ақау анықталмады, ал 0,5 деңгейде ақаулар басталғаннан 15–21 сағ кейін ғана анықталды. H2 ішінара расталды: ажырату қабілеті сақталды, бекітілген шекті мәнмен анықтау сақталмады. 2022 жылғы деректерде қайта оқыту екі ақауды да анықтауға мүмкіндік берді; One-Class SVM 0,1 деңгейде екі ақауды да басталуынан 1,7 сағат бұрын анықтады (тәулігіне 0,13 жалған дабыл). Бұл нәтиже тек екі оқиғаға негізделгендіктен, оны дәлел ретінде қарастыруға болмайды. Штаттық ереже 2022 жылы 2020 жылмен салыстырғанда тәулігіне шамамен 10 есе аз жалған дабыл берді (0,066 және 0,655), бұл кезеңдер арасында пайдалану режимі өзгеруі мүмкін екенін меңзейді.

Кесте 3 — 2022 жылғы деректерде басқа кезеңге ауыстыруды тексеру, $N = 24$ сағ

Баптау	Әдіс	Ақау (2-ден), 0,1 / 0,5	Жалған дабыл/тәул. (0,5)	PR-AUC
Ереже	B0: LPS	2	0,066	0,116
2020 → 2022	EWMA	0,0 / 1,0	0,000	0,247
2020 → 2022	Isolation Forest	0,0 / 1,2 ± 0,7	0,000	0,707 ± 0,003
2020 → 2022	One-Class SVM	0,0 / 2,0	0,000	0,734 ± 0,001
2020 → 2022	Автокодтаушы	0,0 / 1,6 ± 0,8	0,000	0,689 ± 0,048
2022 деректерінде оқыту	EWMA	1,0 / 2,0	0,154	0,247
2022 деректерінде оқыту	Isolation Forest	2,0 / 2,0	0,145 ± 0,036	0,681 ± 0,005
2022 деректерінде оқыту	One-Class SVM	2,0 / 2,0	0,374	0,739
2022 деректерінде оқыту	Автокодтаушы	1,2 ± 1,0 / 1,8 ± 0,4	0,361 ± 0,074	0,639 ± 0,053

Дереккөз: автордың ашық деректерді талдау нәтижелері (MetroPT2; тест 01.06–28.07.2022, 51,2 тәулік). Мәндер – 5 іске қосу бойынша орташа ± стандартты ауытқу.

Талқылау.

Нәтижелер ерте ескерту туралы күтуді бұл деректерде растамайды. MetroPT-3 деректерінде ауаның ағуы агрегат жұмысында есепте белгіленген уақытқа жақын байқалады, ал жалған дабылдар аз болуы талап етілгенде модельдер бұл ауытқуды кешігіп анықтайды немесе мүлде анықтамайды. Біздің хаттама нүктелік бағалау нәтижелерді асыра

көрсетуі мүмкін деген ескертулерді ескеріп құрылды (Kim және т.б., 2022: 7194–7201; Wu, Keogh, 2021): бүкіл тест кезеңі бағаланады, ал шекті мән алдын ала белгіленеді. Сонымен қатар есептегі басталу уақыты шартты екенін ескеру керек (мысалы, 1-ақау 00:00-ден басталады), сондықтан ондаған минуттық айырмалар нақты физикалық кешігуді білдірмеуі мүмкін.

Практикалық тұрғыдан маңызды нәтиже – жалған дабылдар құнының төмендеуі. Штаттық LPS ережесімен салыстырғанда модельдер мен EWMA картасы тәулігіне 0,5 деңгейде сол немесе одан да көп ақауды шамамен 3,4–4,4 есе аз жалған дабылмен анықтайды. Бұл ретте қарапайым EWMA картасы оқиғалар деңгейінде күрделі модельдерден кем түспейді, ал қатаң деңгейлерде олардан жақсы, демек кәсіпорында күйі бойынша қызмет көрсетуді енгізуді түсіндірілетін статистикалық бақылаудан бастауға болады, ал модельдерді терезелерді ажырату маңызды болған жерде қосуға болады.

Басқа кезеңге ауыстыру нәтижесі модель мен шекті мәнді бөлек қарастыру қажеттігін көрсетеді. Аномалиялардың реті басқа пайдалану кезеңінде сақталады, бірақ бағалардың абсолюттік деңгейі өзгереді, сондықтан шекті мәнді нақты нысанның деректерінде қайта калибрлеу керек. Бұл, әсіресе, нәтижелерді басқа өндірушінің немесе басқа пайдалану жағдайындағы өнеркәсіптік локомотивтер мен вагондардың пневматикалық жүйелеріне қолдану кезінде маңызды.

Зерттеудің шектеулері. Біріншіден, ақаулар саны аз (2020 жылы 4, 2022 жылы 2), сондықтан әдістер арасындағы оқиғалар деңгейіндегі айырмашылықтарды статистикалық тұрғыдан тексеру мүмкін емес; ең тұрақты нәтиже – жалған дабылдар санындағы айырмашылық (B0 үшін 75 эпизод). Екіншіден, ақау таңбалары (labels) – кәсіпорын есептеріндегі уақыт аралықтары, олар өлшенген эталон (ground truth) емес. Үшіншіден, нысан – метро пойызының агрегаты; нәтижелердің қазақстандық өнеркәсіптік көлік жабдығына жарамдылығы тексерілмеді. Төртіншіден, жарияланған деректер 0,1 Гц жиілікпен берілген, бастапқы 1 Гц жиілікте нәтиже өзгеше болуы мүмкін. Бесіншіден, LSTM сияқты рекуррентті модельдер қарастырылмады. Апаттылықтың азаюы туралы тұжырым жасалмайды: нақты пайдалану нәтижелері жоқ.

Қорытынды.

Зерттеу мақсатына қол жеткізілді: метро пойызының ауа өндіру агрегатының ашық IoT деректерінде аномалияларды анықтау модельдері (Isolation Forest, One-Class SVM, автокодтаушы) агрегаттың штаттық шекті ережесімен және EWMA бақылау картасымен оқиғалар деңгейінде салыстырылды. Салыстыру хронологиялық хаттама бойынша жүргізілді: модельдер ақпан айының деректерінде оқытылды, шекті мән наурыз айында берілген тәуліктік жалған дабыл деңгейіне калибрленді, ал сапа сәуір–тамыз аралығында ақау есептерімен салыстырылып бағаланды. Нәтиженің тұрақтылығы басқа пайдалану кезеңінің (2022 ж.) деректерінде тексерілді.

Алынған нәтижелер (ашық деректерді талдау). Біріншіден, алдын ала белгіленген тәулігіне 0,1 және 0,2 жалған дабыл деңгейлерінде ешбір әдіс ақауды есептегі басталу уақытынан бұрын анықтаған жоқ, ескерту уақытының медианасы барлық деңгейлерде теріс болды; сондықтан H1 болжамы расталмады. Екіншіден, тәулігіне 0,5 деңгейге калибрленгенде модельдер мен EWMA орта есеппен 4 ақаудың 3,8–4-ін тестте тәулігіне 0,15–0,19 жалған дабылмен анықтады, ал штаттық ереже 3 ақауды тәулігіне 0,66 жалған дабылмен анықтады; яғни жалған дабылдар 3,4–4,4 есе аз. Үшіншіден, модельдер ақаулар маңындағы терезелерді EWMA картасына қарағанда жақсырақ ажыратады (PR-AUC 0,40–0,45 және 0,24, кездейсоқ деңгей 0,056), бірақ оқиғалар деңгейінде одан озбайды, ал қатаң шекті мәндерде EWMA модельдерден де жақсы болды. Төртіншіден, 2020 жылғы модельдердің ажырату қабілеті 2022 жылғы деректерде сақталды (PR-AUC 0,69–0,73), бірақ 2020 жылғы шекті мән жарамсыз болды: тәулігіне 0,1 деңгейде бірде-бір ақау анықталмады, ал 0,5 деңгейде ақаулар басталғаннан 15–21 сағ кейін ғана анықталды; сондықтан H2

ішінара расталды. 2022 жылғы деректерде қайта оқыту екі ақауды да анықтауға мүмкіндік берді, бірақ бұл нәтиже тек екі оқиғаға негізделген және дәлел ретінде қарастырылмайды.

Ғылыми жаңалығы – метро компрессорының нақты деректерінде аномалияларды анықтау модельдерін агрегаттың өзінің штаттық ережесімен және қарапайым статистикалық картамен бірдей хаттама бойынша, оқиғалар деңгейінде (ақауды анықтау, ескерту уақыты, тәулігіне жалған дабылдар) салыстыру және модель мен шекті мәннің басқа кезеңге ауысуын бөлек бағалау. Бұл нәтижелер терезелер деңгейіндегі жоғары метрикалар оқиғалар деңгейіндегі ерте ескертуге автоматты түрде айналмайтынын көрсетеді.

Әдістемелік қорытынды. Мұндай жүйелерді бағалау кезінде (1) деректерді уақыт бойынша бөлу және шекті мәнді тест кезеңіне дейін бекіту, (2) нәтижелерді терезелер деңгейінде ғана емес, оқиғалар деңгейінде – анықталған ақаулар саны, ескерту уақыты және тәулігіне жалған дабылдар саны бойынша – көрсету, (3) модельдерді жабдықтың штаттық ережесімен және қарапайым статистикалық бақылау картасымен міндетті түрде салыстыру қажет. Сонымен қатар ақау таңбаларының сапасын тексеру керек: тест кезеңінде есептерде жоқ, шамамен 62 сағатқа созылған үздіксіз жүктеме эпизоды анықталды, оны модельдер аномалия ретінде белгіледі, ал бағалауда ол жалған дабыл болып есептелді.

Практикалық маңызы. Өнеркәсіптік көлік кәсіпорнында күйі бойынша техникалық қызмет көрсетуді енгізу кезінде дабыл шегін техникалық қызмет көрсету қызметі қабылдай алатын тәуліктік жалған дабылдар санына сүйеніп таңдау және оны әр нысан мен әр пайдалану кезеңі үшін қайта калибрлеу ұсынылады. Енгізуді түсіндірілетін EWMA картасынан бастауға, ал модельдерді ақаулар маңындағы аралықтарды ажырату маңызды болған жерде қосуға болады. Нәтижелерді өнеркәсіптік локомотивтер мен вагондардың пневматикалық жүйелеріне қолдану үшін кәсіпорында қысым, температура, қозғалтқыш тогы және компрессордың жұмыс күйі сигналдарын тұрақты жиілікпен жинайтын телеметрия, сондай-ақ ақаулар мен жөндеулердің уақыт белгісі бар журналы болуы қажет; онсыз шекті мәнді калибрлеу мен тексеру мүмкін емес. Дабылдар CMMS жүйесіне тексеру тапсырмасы ретінде берілуі мүмкін; бұл ретте нәтижелер апаттылықтың азаюы туралы тұжырым жасауға негіз бермейді, себебі нақты пайдалану нәтижелері жоқ.

Шектеулер мен болашақ жұмыс. Ақаулар саны аз (2020 жылы 4, 2022 жылы 2), ақау таңбалары кәсіпорын есептеріндегі уақыт аралықтары ғана, ал нысан – метро пойызының агрегаты. Сондықтан келесі кезеңде қазақстандық өнеркәсіптік көлік кәсіпорнының жабдығы бойынша деректер мен ақаулар журналын алу, бастапқы 1 Гц жиіліктегі деректермен тексеру, рекуррентті модельдерді қосу және дабылдардың техникалық қызмет көрсету шешімдеріне әсерін нақты пайдалануда бағалау жоспарланады.

REFERENCES

- Barros M., Veloso B., Pereira P.M., Ribeiro R.P., Gama J. (2020). Failure Detection of an Air Production Unit in Operational Context // *Communications in Computer and Information Science*. Pp. 61–74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66770-2_5
- Carvalho T.P., Soares F.A.A.M.N., Vita R., Francisco R. da P., Basto J.P., Alcalá S.G.S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance // *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 137. — Art. 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- Davari N., Veloso B., Ribeiro R.P., Pereira P.M., Gama J. (2021). Predictive maintenance based on anomaly detection using deep learning for air production unit in the railway industry // 2021 IEEE 8th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). Pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/DSAA53316.2021.9564181>
- Davari N., Veloso B., Ribeiro R., Gama J. (2023). MetroPT-3 Dataset [Dataset] // UCI Machine Learning Repository. <https://doi.org/10.24432/C5VW3R>
- Davari N., Veloso B., Ribeiro R.P., Gama J. (2024). Detecting and Explaining Anomalies in the Air Production Unit of a Train // *Proceedings of the 39th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. — Pp. 358–364. <https://doi.org/10.1145/3605098.3635906>
- Davis J., Goadrich M. (2006). The relationship between Precision-Recall and ROC curves // *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. Pp. 233–240. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143874>

- García-Méndez S., de Arriba-Pérez F., Leal F., Veloso B., Malheiro B., Burguillo-Rial J.C. (2025). An explainable machine learning framework for railway predictive maintenance using data streams from the metro operator of Portugal // *Scientific Reports*. Vol. 15. — Art. 27495. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08084-1>
- Hundman K., Constantinou V., Laporte C., Colwell I., Soderstrom T. (2018). Detecting Spacecraft Anomalies Using LSTMs and Nonparametric Dynamic Thresholding // *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. Pp. 387–395. <https://doi.org/10.1145/3219819.3219845>
- Kim S., Choi K., Choi H.-S., Lee B., Yoon S. (2022). Towards a Rigorous Evaluation of Time-Series Anomaly Detection // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Vol. 36, No. 7. — Pp. 7194–7201. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i7.20680>
- Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.-H. (2008). Isolation Forest // *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*. Pp. 413–422. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17>
- Meira J., Veloso B., Bolón-Canedo V., Marreiros G., Alonso-Betanzos A., Gama J. (2023). Data-driven predictive maintenance framework for railway systems // *Intelligent Data Analysis*. Vol. 27. No. 4. — Pp. 1087–1102. <https://doi.org/10.3233/IDA-226811>
- Roberts S.W. (1959). Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages // *Technometrics*. Vol. 1, No. 3. — Pp. 239–250. <https://doi.org/10.1080/00401706.1959.10489860>
- Saito T., Rehmsmeier M. (2015). The Precision-Recall Plot Is More Informative than the ROC Plot When Evaluating Binary Classifiers on Imbalanced Datasets // *PLOS ONE*. Vol. 10. No. 3. — Art. e0118432. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118432>
- Schölkopf B., Platt J.C., Shawe-Taylor J., Smola A.J., Williamson R.C. (2001). Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution // *Neural Computation*. Vol. 13. No. 7. — Pp. 1443–1471. <https://doi.org/10.1162/089976601750264965>
- Veloso B., Ribeiro R.P., Gama J., Pereira P.M. (2022). The MetroPT dataset for predictive maintenance // *Scientific Data*. Vol. 9. — Art. 764. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01877-3>
- Veloso B., Gama J., Ribeiro R., Pereira P. (2022). MetroPT2: A Benchmark dataset for predictive maintenance [Dataset], Version V2 // *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7766691>
- Wu R., Keogh E. (2021). Current Time Series Anomaly Detection Benchmarks are Flawed and are Creating the Illusion of Progress // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. (early access). <https://doi.org/10.1109/TKDE.2021.3112126>
- Zafra A., Veloso B., Gama J. (2024). Early Failure Detection for Air Production Unit in Metro Trains // *Lecture Notes in Computer Science*. Pp. 339–351. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74183-8_28
- Zio E. (2022). Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice // *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 218. — Art. 108119. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108119>

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 90–101
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.008>
IRSTI 67.01.85

A BIM–DIGITAL TWIN ARCHITECTURE FOR CONSTRUCTION AND INDUSTRIAL TRANSPORT LOGISTICS: TRANSFERABILITY FROM SPAIN TO KAZAKHSTAN

*Fernández I. Plazaola**

Departamento de Organización de Empresas, School of Building Engineering (ETSIE),
Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.
E-mail: iplazaola@doe.upv.es

Igor Fernández Plazaola — lecturer (Profesor Permanente Laboral), Departamento de Organización de Empresas, School of Building Engineering (ETSIE), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain.
E-mail: iplazaola@doe.upv.es, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5075>.

© I. Fernández Plazaola

Abstract. Construction and industrial transport logistics depend on information held in separate systems: models, schedules, transport management, supplier and sensor systems. The study aims to design an architecture linking these sources at model-element level, to test whether open models carry the information logistics needs, and to assess which elements of Spain's public BIM framework can transfer to Kazakhstan. A design science research methodology was followed. Requirements were derived from ISO 19650, ISO 16739-1:2024 (IFC 4.3), ISO 7817-1 and published studies of BIM-based logistics; the artefact is a reference architecture with a common data environment, an event-driven integration service and an enrichment service. The evaluation material comprised ten IFC 4.3 reference models published by buildingSMART International (348 physical elements), Spain's BIM Plan for public procurement (Orden PCM/818/2023) and Kazakhstan's Construction Code of 2026. Every element carried a persistent identifier and a spatial containment or aggregation relation, and 94 % had a material, but, pooled over all models, only 9 % had quantity sets and 16 % a classification reference; none had a weight or a link to a schedule task, and none of the materials carried a density. Volumes could be computed from geometry for all elements with a representation and matched stored values where present, so volume enrichment can be automated; weights need an external material catalogue. Neither regulatory framework addresses logistics data. In the author's assessment, Spain's explicit IFC requirement and its staging by contract value and date are the primary candidates for transfer, followed by the common data environment definition, maturity levels and model submission to geoinformation bases; Kazakhstan could introduce them through the normative documents to which its Construction Code delegates information requirements. The contribution is an architecture traced to explicit requirements and a measured gap between model content and logistics needs. Field validation remains to be done.

Keywords: building information modelling, digital twin, construction logistics, common data environment, IFC 4.3, design science, Kazakhstan

For citation: Fernández I. Plazaola (2026). A BIM–Digital Twin Architecture for Construction and Industrial Transport Logistics: Transferability from Spain to Kazakhstan // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 91–101. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.008> (In Eng.).

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

ҚҰРЫЛЫС ЖӘНЕ ӨНЕРКӘСІПТІК КӨЛІК ЛОГИСТИКАСЫНА АРНАЛҒАН BIM МЕН ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ АРХИТЕКТУРАСЫ: ИСПАНИЯ ТӘЖІРИБЕСІН ҚАЗАҚСТАНҒА КӨШІРУ

*И. Фернандес Плазаола**

Кәсіпорындарды ұйымдастыру кафедрасы, Құрылыс инженериясы мектебі (ETSIE),
Валенсия политехникалық университеті, Валенсия, Испания.

E-mail: iplazaola@doe.upv.es

Игорь Фернандес Плазаола — оқытушы (Profesor Permanente Laboral), Валенсия политехникалық университеті, Camino de Vera s/n, 46022 Валенсия, Испания
E-mail: iplazaola@doe.upv.es, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5075>

© Фернандес Плазаола И.

Аннотация. Құрылыс және өнеркәсіптік көлік логистикасы әртүрлі жүйелерде сақталған деректерге сүйенеді: ақпараттық модельдер, күнтізбелік кестелер, тасымалды басқару жүйелері, жеткізушілер жүйелері және құрылыс алаңындағы датчиктер. Зерттеудің мақсаты – осы көздерді модельдің жекелеген элементтері деңгейінде байланыстыратын ақпараттық архитектураны жобалау, ашық модельдерде логистикаға қажет деректердің бар-жоғын тексеру және Испанияның мемлекеттік сатып алудағы BIM жүйесінің қандай элементтерін Қазақстанға көшіруге болатынын бағалау. Жобалау ғылымы (design science research) әдіснамасы қолданылды. Талаптар ISO 19650, ISO 16739-1:2024 (IFC 4.3), ISO 7817-1 стандарттарынан және BIM-логистика бойынша жарияланған зерттеулерден алынды; артефакт – ортақ деректер ортасы, оқиғаларға негізделген интеграция қызметі және деректерді байыту қызметі бар эталондық архитектура. Бағалау материалы – buildingSMART International жариялаған IFC 4.3 он эталондық моделі (348 физикалық элемент), Испанияның мемлекеттік сатып алудағы BIM жоспары (Orden PCM/818/2023) және Қазақстан Республикасының 2026 жылғы Құрылыс кодексі. Барлық элементтің тұрақты идентификаторы мен кеңістіктік байланысы болды, 94 % элементте материал көрсетілген, бірақ барлық модель бойынша жиынтығында тек 9 % элементте сандық көрсеткіштер жиыны (Quantity Sets), 16 % элементте жіктеуішке сілтеме болды; массасы немесе күнтізбелік кесте тапсырмасымен байланысы бар элемент, тығыздығы көрсетілген материал болмады. Геометриялық көрінісі бар барлық элементтің көлемін геометрия бойынша есептеуге болды және ол модельде сақталған көлеммен (бар жерінде) сәйкес келді; бұл көлемді автоматты түрде толықтыруға болатынын көрсетеді, ал массаны сыртқы материалдар каталогынсыз анықтау мүмкін емес. Екі нормативтік жүйенің ешқайсысы логистикалық деректерді реттемейді. Автордың бағалауы бойынша көшірудің негізгі үміткерлері – IFC-ке қойылатын нақты талап пен BIM-ді келісімшарт құны мен мерзімдер бойынша кезең-кезеңімен енгізу, одан кейін – ортақ деректер ортасының анықтамасы, жетілу деңгейлері және модельдерді геоақпараттық базаларға беру; Қазақстанда оларды Құрылыс кодексі ақпаратқа қойылатын талаптарды жүктейтін мемлекеттік нормативтік құжаттар арқылы енгізуге болады. Жұмыстың үлесі – нақты талаптармен байланысы көрсетілген архитектура және модельдер мазмұны мен логистика қажеттілігі арасындағы өлшенген алшақтық. Зерттеу жобалық және құжаттық сипатта; нақты жобада сынақтан өткізілген жоқ.

Түйін сөздер: ақпараттық модельдеу, цифрлық егіз, құрылыс логистикасы, ортақ деректер ортасы, IFC 4.3, жобалау ғылымы, Қазақстан

Дәйексөз үшін: Фернандес Плазаола И. (2026). Құрылыс және өнеркәсіптік көлік логистикасына арналған BIM мен цифрлық егіз архитектурасы: Испания тәжірибесін Қазақстанға көшіру // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 90–101 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.008> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АРХИТЕКТУРА BIM И ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ И ПРОМЫШЛЕННО-ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ: ПЕРЕНОС ОПЫТА ИСПАНИИ В КАЗАХСТАН

И. Фернандес Плазаола*

Кафедра организации предприятий, Школа строительной инженерии (ETSIE),
Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания.

Игорь Фернандес Плазаола — преподаватель (Profesor Permanente Laboral), Политехнический университет Валенсии, Camino de Vera s/n, 46022 Валенсия, Испания
E-mail: iplazaola@doe.upv.es, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5075>.

© Фернандес Плазаола И.

Аннотация. Строительная и промышленно-транспортная логистика опирается на данные из разных систем: информационных моделей, графиков, систем управления перевозками, систем поставщиков и датчиков на строительной площадке. Цель исследования – спроектировать информационную архитектуру, связывающую эти источники на уровне отдельных элементов модели, проверить, содержат ли открытые модели данные, нужные логистике, и оценить, какие элементы испанской системы BIM в госзакупках переносимы в Казахстан. Использована методология проектной науки (design science research). Требования выведены из ISO 19650, ISO 16739-1:2024 (IFC 4.3), ISO 7817-1 и опубликованных исследований BIM-логистики; артефакт – эталонная архитектура со средой общих данных, событийно-ориентированным сервисом интеграции и сервисом обогащения данных. Материалы для оценки – десять эталонных моделей IFC 4.3 buildingSMART International (348 физических элементов), испанский План BIM для госзакупок (Orden PCM/818/2023) и Строительный кодекс Республики Казахстан 2026 г. Все элементы имели постоянный идентификатор и пространственную привязку, 94% – материал, но в совокупности по всем моделям лишь 9 % – наборы количественных характеристик (Quantity Sets) и 16 % – ссылку на классификатор; ни один элемент не имел массы или связи с задачей графика, ни один материал – плотности. Объём удалось вычислить по геометрии для всех элементов с геометрическим представлением, и он совпал с хранимыми в моделях объёмами там, где они были, что указывает на возможность автоматического обогащения объёмами; массу без внешнего каталога материалов получить нельзя. Ни одна из нормативных систем не регулирует логистические данные. По оценке автора, основные кандидаты на перенос – явное требование IFC и поэтапное введение BIM по стоимости контракта и датам, далее – определение среды общих данных, уровни зрелости и передача моделей в базы геоинформации; в Казахстане их можно ввести через государственные нормативные документы, к которым Строительный кодекс отсылает требования к информации. Вклад работы – архитектура с прослеживаемостью к явно сформулированным требованиям и измеренный разрыв между содержанием моделей и потребностями логистики. Исследование носит проектный и документальный характер; апробация на реальном объекте не проводилась.

Ключевые слова: информационное моделирование, цифровой двойник, строительная логистика, среда общих данных, IFC 4.3, проектная наука, Казахстан

Для цитирования: Фернандес Плазаола И. (2026). Архитектура BIM и цифрового двойника для строительной и промышленно-транспортной логистики: перенос опыта Испании в Казахстан // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 90–101. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.008> (На англ.).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

Construction sites and the transport systems that serve them – industrial sidings, haul roads, loading fronts and the vehicles that use them – are coordinated through information. The building information model describes what is to be built, the schedule says when, transport and fleet systems say where vehicles and materials are, and site sensors record what has actually arrived. In practice these sources sit in separate systems owned by different parties, so a late delivery is often discovered on site and propagated to the schedule by telephone or spreadsheet.

Public clients are pushing building information modelling (BIM) into procurement. Spain has adopted a staged plan that makes BIM mandatory in central government contracts above set value thresholds from April 2024 (Orden PCM/818/2023, 2023), and Kazakhstan's Construction Code, in force from 1 July 2026 (art. 148), makes information modelling mandatory for the types of construction objects listed by the authorised body (art. 62) (Construction Code of the Republic of Kazakhstan, 2026). Both frameworks concern the information about the built asset. Whether that information can also serve logistics – the movement of materials and vehicles that the asset depends on – is a separate question.

Two developments make the question timely. First, the open exchange schema has been extended beyond buildings: IFC 4.3, published as ISO 16739-1:2024, adds entities for rail, road, ports and bridges (ISO 16739-1, 2024), so the infrastructure that industrial transport runs on can now be described in the same open format as the buildings it serves. Second, information management under ISO 19650 organises the exchange of this information between parties through a common data environment (ISO 19650-1, 2018; ISO 19650-2, 2018). Neither development is aimed at logistics, yet both determine what information a logistics system could obtain from the model and in what form. For industrial transport, where sidings, haul roads and loading fronts are themselves infrastructure assets, this means that the same model could in principle describe both the asset and the place where materials and vehicles move.

Studies of construction logistics show why this matters. 4D BIM can expose logistics conflicts, but its use is limited by the late involvement of trades and the continued reliance on two-dimensional plans (Whitlock et al., 2021: 325–348), and logistics digital twins that fuse the model with schedules and quantities still leave supplier and vehicle data for future work (Gehring, Rüppel, 2023). For an owner who introduces BIM through procurement rules, the practical question is therefore not whether a digital twin is possible, but which information has to be required in contracts so that the delivered models can serve logistics.

The object of this study is the information flow of construction and industrial transport logistics: models, schedules, transport, supply and sensor data. The subject is a reference architecture that integrates these flows and the conditions under which it could be adopted in Kazakhstan. The study has three aims: to derive explicit requirements and design an architecture that meets them; to test whether openly available reference models contain the information that logistics requires; and to compare the Spanish and Kazakh frameworks to identify transferable elements.

Three research questions follow from this framing and from the gaps identified in the literature review below: which requirements an integration architecture must meet to support

construction and industrial transport logistics, and how it can meet them (RQ1); to what extent openly available IFC 4.3 models satisfy the element-level information requirements of logistics (RQ2); and which elements of Spain's public BIM framework are transferable to Kazakhstan, and under what conditions (RQ3). The questions are answered with a design science approach, in which the proposed artefact is kept separate from the observed evidence – the content of public models and the text of the regulations – so that each claim can be traced to its source.

The study contributes a reference architecture traced to explicit requirements, a reproducible audit of what openly available IFC 4.3 models contain at element level, and a structured comparison of two public BIM frameworks with an assessment of what could be transferred. The remainder of the paper is organised as follows: the literature review identifies the gaps and states the research questions; the materials and methods section describes the design science process, the requirements, the model audit and the documentary comparison; the results section answers the research questions; the discussion and conclusion interpret the findings, state the limitations and outline further work.

Digital twin research in construction has moved from concept to taxonomy. Boje and colleagues argued that a construction digital twin requires semantic integration of BIM with sensor data and set directions for research (Boje et al., 2020). Sacks and colleagues framed construction with digital twin information systems as a closed control loop over planning and execution (Sacks et al., 2020). Reviews describe a progression of maturity in which most reported twins remain at early levels (Deng et al., 2021: 58–83) and map applications across the life cycle (Opoku et al., 2021).

Studies that address logistics directly link parts of the problem. Whitlock and colleagues showed that 4D BIM exposes logistics conflicts but is limited by late involvement of trades and continued reliance on two-dimensional plans (Whitlock et al., 2021: 325–348). Greif and colleagues examined digital twins for construction site logistics (Greif et al., 2020). Karmakar and colleagues automated route planning on site from BIM, explicitly limited to internal movements (Karmakar et al., 2022: 827–844). Gehring and Rüppel fused the model, the 4D schedule and bills of quantities into a logistics twin and left supplier and vehicle telemetry for future work (Gehring, Rüppel, 2023). Internet of things platforms linked to BIM track components and materials within single projects (Zhou et al., 2021; Yang et al., 2024), and a review of supply chain twins maps challenges to solutions largely borrowed from other industries (Bakhshi et al., 2024).

Research on the common data environment (CDE) treats it as an information management tool. Seyis and Özkan analysed the added value of CDEs for project performance (Seyis, Özkan, 2024: 247–263), and Jaskula and colleagues showed that running several CDEs at once undermines accountability and reliability of data (Jaskula et al., 2025: 1522–1541). Neither line of work connects the CDE to logistics data flows. Spanish published cases of BIM-based twins concern operation rather than logistics: a railway station on the Bilbao–Orduña line (Pavón et al., 2025: 747–762), port asset management (González-Cancelas et al., 2025) and BIM–GIS integration for an urban ring road (Cepa et al., 2024).

Three gaps follow from the reviewed literature. No study found links an ISO 19650 CDE, open IFC models, a transport management system and sensor data in one architecture evaluated against explicit requirements. No study measures whether the models that clients will receive contain the element-level information logistics needs. No study compares the Spanish and Kazakh BIM frameworks with a view to transfer. The research questions are therefore: RQ1 – which requirements must an integration architecture meet to support construction and industrial transport logistics, and how can it meet them? RQ2 – to what extent do openly available IFC 4.3 models satisfy the element-level information requirements of logistics? RQ3 – which elements of Spain's public BIM framework are transferable to Kazakhstan, and under what conditions?

Materials and Methods.

The study follows design science research, which builds and evaluates artefacts against stated problems (Hevner et al., 2004: 75–106), using the process of problem identification, objectives, design, demonstration, evaluation and communication (Peffer et al., 2007: 45–77). The observed evidence (model content, regulatory text) is kept separate from the proposed artefact throughout. The working hypothesis for RQ2 is that reference models satisfy identity and location requirements but not quantity, weight and schedule requirements; it is tested on public models rather than assumed. Each result is labelled by type: the model audit and the geometry test are computed from open data; the framework comparison is documentary; the architecture and the scenario walk-through are design artefacts. Results are reported in the order RQ2, RQ3, RQ1, because the assessment of requirement coverage (RQ1) draws on the audit and the comparison.

Requirements. Eight architecture requirements were derived (Table 1). Sources are the information management principles of ISO 19650-1 and -2 (ISO 19650-1, 2018; ISO 19650-2, 2018), the IFC data schema including the IFC 4.3 extensions for rail, road, ports and bridges (ISO 16739-1, 2024), the level of information need concept (ISO 7817-1, 2024) and the logistics gaps identified in the review. Each requirement is traced to architecture components and to the evaluation used.

Table 1 – Architecture requirements and their traceability

ID	Requirement	Source	Component	Evaluation
AR1	One governed source of asset information with status control	ISO 19650-1, -2	CDE	Analytical
AR2	Vendor-neutral exchange of models and issues	ISO 16739-1; Spanish Plan	CDE (IFC, BCF)	Documentary
AR3	Element-level link between logistics objects and model elements	Gehring, Rüppel, 2023	Integration service	IFC audit (L1, L7)
AR4	Event-driven propagation of transport and sensor events to schedule and model	Karmakar et al., 2022; Sacks et al., 2020	Integration service, adapters	Scenario walk-through
AR5	Supply of quantities and weights missing from models	ISO 7817-1	Enrichment service	IFC audit (L3–L5), geometry test
AR6	Georeferencing for GIS and route data	Spanish Plan, section 4.8	CDE, GIS adapter	IFC audit (project level)
AR7	Roles, access control and audit trail across parties	ISO 19650-1; Jaskula et al., 2025	Governance service	Analytical
AR8	Information delivered at the level needed by each logistics use	ISO 7817-1	Governance, enrichment	Analytical

Source: compiled by the author. CDE – common data environment; BCF – BIM Collaboration Format; L1–L10 – element-level information requirements (see Materials and methods and Table 2).

The architecture (Figure 1) has three layers. Existing systems remain the sources: authoring tools, the 4D schedule, the transport or fleet management system (TMS), sensors, supplier systems and geoinformation. The integration layer adds three components: a CDE following ISO 19650 with IFC 4.3 and BCF as exchange formats; an integration service with an event bus and adapters that maintains canonical logistics objects (delivery, trip, slot) linked to IFC GlobalIds and schedule tasks; and an enrichment service that derives missing quantities from geometry and weights from a material catalogue. Services on top provide a logistics twin view, decision support, governance and reporting to the client.

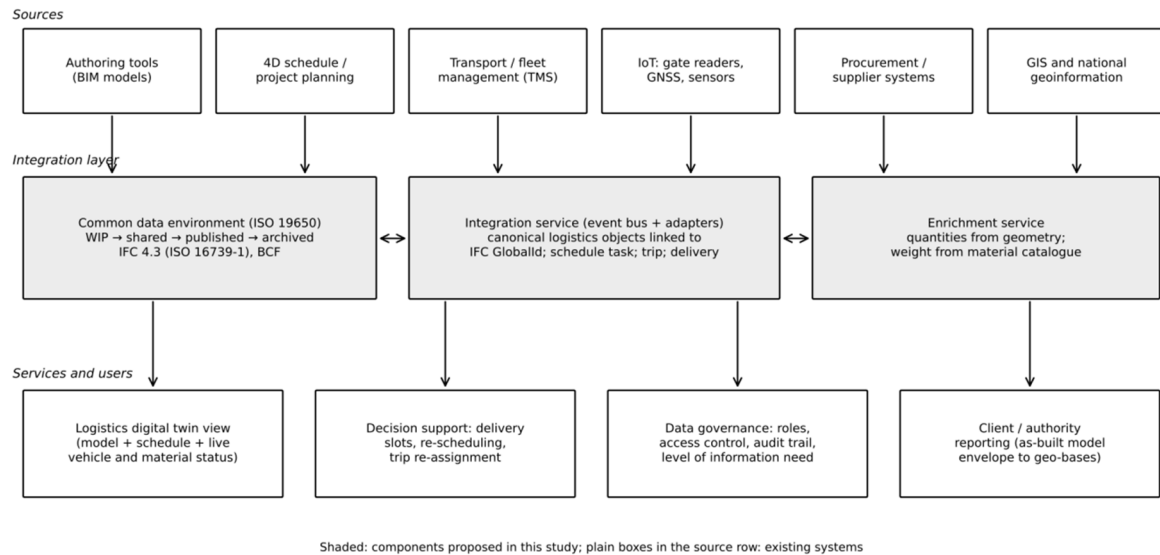


Fig. 1. Reference architecture for BIM-enabled logistics integration

Source: designed by the author. TMS – transport management system; GNSS – global navigation satellite system; WIP – work in progress.

The architecture was walked through for one scenario: a supplier reports a later arrival for a delivery of structural elements (Figure 2). The integration service resolves the delivery to model elements by GlobalId, retrieves location and quantities, identifies the affected schedule tasks, presents the site logistics manager with options, returns the decision to the TMS and records the status on the elements. The scenario was used to check that every message has a defined source, identifier and receiver.

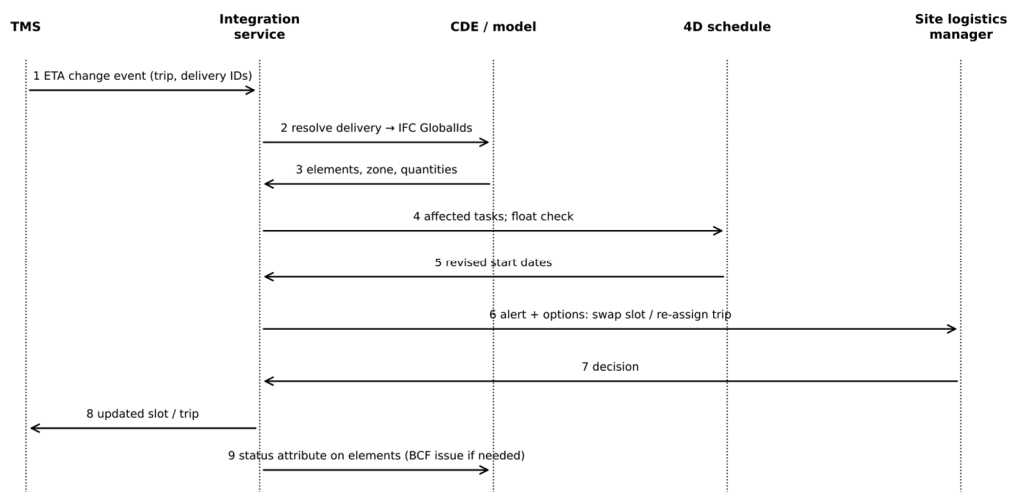


Fig. 2. Information exchange sequence for a delayed delivery

Source: designed by the author. ETA – estimated time of arrival.

Model audit (RQ2). Ten IFC 4.3 ADD2 models from the buildingSMART International certification datasets were analysed: Building-Architecture, -Hvac, -Landscaping and -Structural, and Infra-Bridge, -Electrical, -Landscaping, -Plumbing, -Rail and -Road (buildingSMART International, 2026). The files are published under the CC BY 4.0 licence; the repository state used is commit 80d976a of 4 September 2026. All instances of IfcElement except feature elements

(openings) were counted as physical elements. The count includes 80 geographic elements (terrain and vegetation), 18 element assemblies, whose parts are also counted, and 18 proxy elements; a sensitivity count without geographic elements and assemblies is reported. For each element ten information requirements were tested: L1 persistent identifier; L2 classification reference on the element or its type; L3 element quantity set; L4 weight quantity; L5 weight derivable, that is, a volume quantity together with a material density; L6 material association on the element or its type; L7 spatial containment or aggregation; L8 type object; L9 property set; L10 assignment to a process (task). In addition, every material defined in the models was checked for a density property. Georeferencing (IfcMapConversion) was tested per model. As a check on enrichment, element volumes were computed from the triangulated geometry; each mesh was tested for closure (every edge shared by exactly two triangles), and computed volumes were compared with stored volume quantities where both existed. The audit was implemented in Python 3.13 with IfcOpenShell 0.9.0; scripts and outputs are retained.

Documentary comparison (RQ3). The Spanish BIM Plan for public procurement (Orden PCM/818/2023, 2023), the Spanish public procurement law (Ley 9/2017, 2017: additional provision 15, para. 6), Royal Decree 1515/2018 establishing the interministerial BIM commission (Real Decreto 1515/2018, 2018) and the Kazakh Construction Code (Construction Code of the Republic of Kazakhstan, 2026) were compared on seven criteria fixed in advance: legal basis, trigger, maturity levels, standards, data environment, geoinformation and governance body. Full texts were read on the official portals; statements are limited to what the texts contain.

Results.

RQ2 – model content (computed from open data). The ten models contain 348 physical elements (Table 2). All of them have a GlobalId (L1) and a spatial containment or aggregation relation (L7), and all ten models are georeferenced through IfcMapConversion. Materials (L6) are assigned to 94 % of elements and type objects (L8) to 93 %. The information that logistics needs most is largely absent: pooled over all models, quantity sets are present for 9 % of elements, classification references for 16% and property sets for 14 %; no element carries a weight or an assignment to a schedule task. None of the 62 materials defined in the models carries a density property, so weight cannot be derived from the models alone (L5). The pooled shares are dominated by Infra-Landscaping (111 of 348 elements), which holds 55 of the 56 classified elements and 48 of the 49 elements with property sets; the unweighted means across models are 6.6 % for classification, 14.3 % for quantity sets and 5.1 % for property sets. Without geographic elements and assemblies (250 elements), the shares are 0 % for classification, 13 % for quantity sets, 0 % for property sets, 99 % for materials and 90 % for type objects. The working hypothesis for RQ2 is therefore supported for these models.

Table 2 – Share of physical elements meeting logistics information requirements in IFC 4.3 reference models

Model	Elements	L2 class.	L3 qty set	L4 weight	L5 weight deriv.	L6 mat.	L8 type	L9 Pset	L10 task
Building-Architecture	13	0%	54%	0%	0%	92%	92%	8%	0%
Building-Hvac	6	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%
Building-Landscaping	6	17%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%
Building-Structural	17	0%	59%	0%	0%	94%	100%	0%	0%
Infra-Bridge	50	0%	30%	0%	0%	96%	92%	0%	0%
Infra-Electrical	6	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%
Infra-Landscaping	111	50%	0%	0%	0%	91%	96%	43%	0%
Infra-Plumbing	29	0%	0%	0%	0%	93%	100%	0%	0%
Infra-Rail	75	0%	0%	0%	0%	97%	100%	0%	0%
Infra-Road	35	0%	0%	0%	0%	94%	54%	0%	0%
All models	348	16%	9%	0%	0%	94%	93%	14%	0%

Source: author's analysis of buildingSMART International IFC 4.3 ADD2 certification models (CC BY 4.0). L1 (identifier) and L7 (spatial containment or aggregation) were met by 100% of elements in all models and are omitted. Shares are pooled over elements. class. – classification; qty – quantity; deriv. – derivable from volume and density; mat. – material; Pset – property set.

Of the 348 elements, 324 have a geometric representation, and a positive volume could be computed from the triangulated geometry for all 324 of them; 294 of these meshes are closed. For the 32 elements that also carry a stored volume quantity, the computed and stored volumes agree to within 0.0001%. Volumes, though not other quantity types, can therefore be derived by the enrichment service; the volumes of the 30 open meshes, mostly terrain and landscape surfaces, should not be used without inspection. Weight cannot be derived, because no material in the models carries a density. This splits AR5 into a part that can be automated from the model and a part that requires an external material catalogue.

RQ3 – documentary comparison. Table 3 summarises the comparison. Spain combines a general legal permission in procurement law, under which contracting authorities may require BIM tools for works and related contracts (Ley 9/2017, 2017: additional provision 15, para. 6), with a plan that makes BIM mandatory by contract value and date (Plan, section 4.3): for contracts of €5,382,000 or more, from 1 April 2024 at the initial level, 1 October 2025 at the medium level, 1 October 2027 at the advanced level and 1 April 2030 at the integrated level; for contracts from €2,000,000 to below €5,382,000, the initial level is recommended from 1 April 2024 and the initial, medium and advanced levels become mandatory on the three later dates. The Plan defines five BIM levels – pre-BIM, initial, medium, advanced and integrated – across four categories (strategy, processes, technology support, people) and defines the CDE (section 4.9), lists the applicable standards, including IFC under the UNE-EN ISO 16739 series (section 4.6), and provides for the submission of models to national digital geoinformation bases (section 4.8). Kazakhstan's Code makes information modelling technology mandatory for the types of construction objects listed by the authorised body (art. 62, para. 1), delegates requirements for information management, including the composition of digital models at life-cycle stages, to state normative documents (art. 62, para. 2), and declares the data of the state urban planning cadastre a state digital resource (art. 63, para. 3). Neither text contains provisions on logistics data: the Spanish Plan does not mention logistics, and the term does not occur in the Russian-language text of the Kazakh Code.

Table 3 – Comparison of Spanish and Kazakh BIM frameworks and assessed transferability

Criterion	Spain	Kazakhstan	Transferability
Legal basis	Ley 9/2017 (add. provision 15.6) permits requiring BIM; Orden PCM/818/2023 approves the BIM Plan	Construction Code 2026, art. 62	Equivalent basis exists
Trigger	Contract value thresholds with dates, 2024–2030 (section 4.3)	List of object types approved by the authorised body (art. 62.1)	Primary: value-and-date staging as a complement
Maturity levels	Five levels across four categories (section 4.9)	Not established in the Code	Secondary: through a normative document
Standards	IFC (UNE-EN ISO 16739) and other standards listed (section 4.6)	Delegated to state normative documents (art. 62.2)	Primary: explicit IFC requirement
Data environment	CDE defined in the Plan (section 4.9)	Not defined in the Code	Secondary: through normative documents
Geoinformation	Submission of models to national digital geoinformation bases (section 4.8)	Urban planning cadastre data as a state digital resource (art. 63.3)	Secondary: via the cadastre
Governance body	Interministerial BIM Commission (RD 1515/2018)	Authorised body for architecture, urban planning and construction	Equivalent body exists
Logistics data	Not addressed	Not addressed	Gap in both; contractual requirements needed

Source: compiled by the author from Orden PCM/818/2023 (BOE-A-2023-16784), Royal Decree 1515/2018 and the Construction Code of the Republic of Kazakhstan of 9 January 2026 No. 253-VIII. The transferability column is the author's assessment, not a legal opinion.

RQ1 – requirement coverage (design artefact). In a single-scenario walk-through every message had a defined source, identifier and receiver, so AR3 and AR4 are addressed by the design on the condition that GlobalIds are kept stable between model versions. AR1, AR2 and AR7 are addressed by the CDE and governance components by design; this rests on analytical and documentary assessment only and has not been tested. AR6 is met at project level by all audited models. AR5 is met only partly: volumes can be derived, weights cannot without an external catalogue. AR8 depends on the client stating the level of information need for logistics uses, which neither framework requires. Compared with point-to-point links among the six source systems, which would need up to fifteen interfaces, the hub design needs six adapters; this is an arithmetic property of the design, not a measured saving.

Discussion.

The audit shows where the information gap lies. Identity, location and georeferencing – the elements that allow a delivery to be linked to the right place in the model – are present. Quantities, weights, classifications and links to the schedule – the elements that allow a delivery to be planned and loaded – are not. This is consistent with the finding by Whitlock and colleagues that logistics planning still relies on information outside the model (Whitlock et al., 2021: 325–348) and with the scope limits reported by Gehring and Rüppel, whose logistics twin left supplier and vehicle data for future work (Gehring, Rüppel, 2023). The practical implication is that clients who want logistics to use the model must state logistics information requirements in their exchange requirements, and that an enrichment step is needed regardless.

The reference models are certification datasets, built to test software rather than to represent delivered projects. Their results indicate what the schema permits and what a minimal model contains; production models may carry more quantities and classifications. The audit is reproducible and can be repeated on any client model, which makes it useful as an acceptance check rather than as a statement about the industry.

On transfer, the Spanish framework offers two primary elements that Kazakhstan's Code leaves to secondary documents: an explicit requirement for open IFC exchange and a staged schedule tied to contract value and date. Since article 62 delegates information management requirements and the composition of digital models to state normative documents, both appear transferable without changing the Code; this is the author's reading of the text, not a legal opinion. Kazakhstan's object-type list and Spain's value thresholds are different triggers but not incompatible. The CDE definition, the maturity levels and the submission of models to geoinformation bases are secondary candidates that could follow through the same documents. Logistics data are a gap in both frameworks, so transfer from Spain does not close it; it must be addressed in contract-level information requirements, which the architecture is designed to receive.

The study has limitations. The architecture has been demonstrated by walk-through, not implemented and measured on a project. The audit covers ten small reference models. The documentary comparison is limited to the texts read; secondary normative documents in Kazakhstan, including the list of object types, were not analysed. No Spanish project data were used, and no claim is made about Spanish practice beyond the published regulatory text.

Conclusion.

The study designed a reference architecture for BIM-enabled construction and industrial transport logistics, traced to eight explicit requirements; tested ten IFC 4.3 reference models against ten element-level information requirements; and compared the Spanish and Kazakh public BIM frameworks on seven criteria fixed in advance. The results are of three types: a design artefact (the architecture and the scenario walk-through), computations on open data (the model audit and the geometry test) and a documentary analysis (the framework comparison).

The model audit answered RQ2. The models met identity, location and georeferencing requirements fully: every element had a persistent identifier and a spatial containment or aggregation relation, and every model was georeferenced. The information that logistics needs most was largely absent: pooled over all elements, quantity sets were present for 9 % and classification references for 16 %, and no element carried a weight or a link to a schedule task; none of the 62 materials defined in the models carried a density. Volumes could be computed from geometry for all elements with a representation and agreed with the stored volume quantities where these existed, which suggests that an automated enrichment step for volumes is feasible, whereas weights require an external material catalogue. Because the pooled shares are dominated by one model, the unweighted model means (6.6 % for classification, 14.3 % for quantity sets, 5.1 % for property sets) and a sensitivity count without geographic elements and assemblies (13 % with quantity sets, 0 % with classification) were also reported; they do not change the conclusion.

The documentary comparison answered RQ3. Spain combines a general permission in procurement law with a plan that makes BIM mandatory by contract value and date – for contracts of €5,382,000 or more from 1 April 2024 at the initial level up to the integrated level from 1 April 2030 – while Kazakhstan makes information modelling mandatory for the types of construction objects listed by the authorised body. Neither framework regulates logistics data. In the author's assessment, Spain's explicit IFC requirement and its staging by contract value and date are the primary candidates for transfer to Kazakhstan, followed by the CDE definition, the maturity levels and the submission of models to geoinformation bases. Since article 62 of the Kazakh Construction Code delegates requirements for information management and the composition of digital models to state normative documents, these elements could be introduced through such documents; this is a reading of the published texts, not a legal opinion.

For RQ1, the scenario walk-through showed that every message in a delayed-delivery scenario had a defined source, identifier and receiver, provided that GlobalIds remain stable between model versions; the requirements on the common data environment, exchange formats and governance are addressed by design but were assessed only analytically. The requirement to supply missing quantities and weights is met only in part.

The novelty of the work lies in combining three elements that the reviewed studies treat separately: an integration architecture evaluated against explicit, traceable requirements; a measured, reproducible gap between the content of openly available models and the information that logistics needs; and a comparison of two public BIM frameworks aimed at transfer. The audit procedure and the requirement set L1–L10 are not tied to the reference models and can be applied to any model a client receives.

For practice, the findings suggest that clients who want models to serve logistics should state logistics information requirements – quantities, weights or material densities, classification and links to schedule tasks – in their exchange requirements, and should plan an enrichment step regardless. The audit scripts can be used as an acceptance check on delivered models.

The study has limitations: the architecture was demonstrated by a walk-through rather than implemented, the audit covers ten small certification models rather than production models, and the secondary normative documents in Kazakhstan were not analysed. Further work should implement the integration and enrichment services on a live project, measure information latency and manual handovers against current practice, extend the audit to production models from Kazakh projects, and analyse the secondary normative documents in Kazakhstan once published.

REFERENCES

Bakhshi S., Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Najafi M., Rahimian F., Park C., Lee D. (2024). Digital twin applications for overcoming construction supply chain challenges // *Automation in Construction*. Vol. 167. — Art. 105679. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105679>

Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research // *Automation in Construction*. Vol. 114. — Art. 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>

- BuildingSMART International. Sample-Test-Files: certification datasets, IFC 4.3.2.0 (IFC 4.3 ADD2), Simple-Scene [Dataset]. — Commit 80d976a, 04.09.2026. — URL: <https://github.com/buildingSMART/Sample-Test-Files> (accessed: 10.10.2026).
- Cepa J.J., Alberti M.G., Pavón R.M., Calvo J.A. (2024). Integrating BIM and GIS for an Existing Infrastructure // *Applied Sciences*. Vol. 14, No. 23. — Art. 10962. <https://doi.org/10.3390/app142310962>
- Stroitel'nyi kodeks Respubliki Kazakhstan ot 9 yanvarya 2026 goda № 253-VIII [Construction Code of the Republic of Kazakhstan of 9 January 2026 No. 253-VIII]. — URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2600000253> (accessed: 10.10.2026). [In Russian]
- Deng M., Menassa C.C., Kamat V.R. (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry // *Journal of Information Technology in Construction*. Vol. 26. — Pp. 58–83. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
- Gehring M., Rüppel U. (2023). Data fusion approach for a digital construction logistics twin // *Frontiers in Built Environment*. Vol. 9. — Art. 1145250. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1145250>
- González-Cancelas N., Martínez Martínez P., Vaca-Cabrero J., Camarero-Orive A. (2025). Optimization of Port Asset Management Using Digital Twin and BIM/GIS in the Context of Industry 4.0: A Case Study of Spanish Ports // *Processes*. Vol. 13, No. 3. — Art. 705. <https://doi.org/10.3390/pr13030705>
- Greif T., Stein N., Flath C.M. (2020). Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics // *Computers in Industry*. Vol. 121. — Art. 103264. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103264>
- Hevner A.R., March S.T., Park J., Ram S. (2004). Design Science in Information Systems Research // *MIS Quarterly*. Vol. 28, No. 1. — Pp. 75–106. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- ISO 7817-1:2024. Building information modelling — Level of information need — Part 1: Concepts and principles. — Geneva: ISO, 2024.
- ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema. — Geneva: ISO, 2024.
- ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. — Geneva: ISO, 2018.
- ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets. — Geneva: ISO, 2018.
- Jaskula K., Kifokeris D., Papadonikolaki E., Rovas D. (2025). Common data environments in construction: state-of-the-art and challenges for practical implementation // *Construction Innovation*. Vol. 25, No. 5. — Pp. 1522–1541. <https://doi.org/10.1108/CI-04-2023-0088>
- Karmakar A., Singh A.R., Kumar D.V.S. (2022). Automated route planning for construction site utilizing Building Information Modeling // *Journal of Information Technology in Construction*. Vol. 27. — Pp. 827–844. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.040>
- Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, por la que se transponen al ordenamiento jurídico español las Directivas del Parlamento Europeo y del Consejo 2014/23/UE y 2014/24/UE, de 26 de febrero de 2014. — BOE núm. 272, 09.11.2017. — URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-12902> (accessed: 10.10.2026). [In Spanish]
- Opoku D.-G.J., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review // *Journal of Building Engineering*. Vol. 40. — Art. 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102726>
- Orden PCM/818/2023, de 18 de julio, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 27 de junio de 2023, por el que se aprueba el Plan de Incorporación de la Metodología BIM en la contratación pública de la Administración General del Estado y sus organismos públicos y entidades de derecho público vinculados o dependientes. — BOE núm. 172, 20.07.2023. Pp. 105006–105035. — URL: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-16784 (accessed: 10.10.2026). [In Spanish]
- Pavón R.M., Alberti M.G., Cepa J.J., Ripa Alonso T.L. (2025). BIM-based digital twin for the management of a railway station // *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. 31, No. 7. — Pp. 747–762. <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.24091>
- Peffer K., Tuunanen T., Rothenberger M.A., Chatterjee S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research // *Journal of Management Information Systems*. Vol. 24, No. 3. — Pp. 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Real Decreto 1515/2018, de 28 de diciembre, por el que se crea la Comisión Interministerial para la incorporación de la metodología BIM en la contratación pública. — URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2018/12/28/1515> (accessed: 10.10.2026). [In Spanish]
- Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H.S., Girolami M. (2020). Construction with digital twin information systems // *Data-Centric Engineering*. Vol. 1. — Art. e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Seyis S., Özkan S. (2024). Analyzing the added value of common data environments for organizational and project performance of BIM-based projects // *Journal of Information Technology in Construction*. Vol. 29. — Pp. 247–263. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.012>
- Whitlock K., Abanda F., Manjia M., Pettang C., Nkeng G. (2021). 4D BIM for Construction Logistics Management // *CivilEng*. Vol. 2, No. 2. — Pp. 325–348. <https://doi.org/10.3390/civileng2020018>
- Yang Y., Li M., Yu C., Zhong R.Y. (2024). Digital twin-enabled visibility and traceability for building materials in on-site fit-out construction // *Automation in Construction*. Vol. 166. — Art. 105640. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105640>
- Zhou J.X., Shen G.Q., Yoon S.H., Jin X. (2021). Customization of on-site assembly services by integrating the internet of things and BIM technologies in modular integrated construction // *Automation in Construction*. Vol. 126. — Art. 103663. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103663>

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 16.09.2026. Формат 60x84 1/8. Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс» .
Печать RISO. Объем 12,75 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.