

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

2024 №2(82)

*апрель-июнь*

**РЕДАКЦИЯЛЫҚ КЕҢЕС:**

**БАС РЕДАКТОР:**

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

**РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА:**

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

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

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

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

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

**Лахно Валерий Анатольевич** — (т.ғ.д., проф., Ақпаратты қорғау жүйесі, Ұлттық биоресурстар және табиғатты пайдалану университеті, Украина, Scopus Autor 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, 2024

© Авторлар ұжымы, 2024

---

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

---

**Журнал «Промышленный транспорт Казахстана»**

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

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

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

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

**Периодичность:** 4 раза в год.

**Тираж:** 500 экземпляров.

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

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Сайт журнала: <http://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 Bakhytzhon 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](mailto:info@mtgu.edu.kz)

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

**CONTENTS**  
**ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION**

<b>B. Kangozhin, D. Insepov</b> RISK-ORIENTED PROVISION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY	17
<b>A. Oralbekova, W. Wojcik</b> METHODS AND MODELS OF SELF-LEARNING AUTOMATED DETECTION SYSTEMS STATE OF HIGH-SPEED RAILWAY TRANSPORT HUBS	33
<b>U. Umbetov, D. Isaikin</b> IMPROVEMENT OF AUTOMATION SYSTEMS FOR DESIGNING DEVICE ASSEMBLIES IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION	50

**COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS**

<b>D. Dzumanova, N. Zhakatayeva, I. Karabasov, K. Talaspekov, A. Zhusipbekov</b> IMPROVEMENT OF LOGISTIC INFRASTRUCTURE THROUGH THE APPLICATION OF CONTAINERIZED TRANSPORT TECHNOLOGY IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN	60
<b>K. Igbayev, A. Oralbekova, N. Tulepbek</b> DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR COMPRESSED BIOGAS TRANSPORTATION BASED ON THE ESP32 MICROCONTROLLER	67

**МАЗМҰНЫ**  
**ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ**

<b>Б. Кангожин, Д. Инсепов</b> БҰЗЫЛУ-БАҒДАР ЭЛЕКТРОМАГНЕТТІК ҮЙЛЕСІМДІЛІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ	17
<b>А. Оралбекова, В. Войцик</b> ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫ ПОЙЫЗ КӨЛІК ХАБТАРЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН ӨЗ-ӨЗІН ОҚЫТУ АВТОМАТТЫ ТАҢУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ӘДІСТЕРІ МЕН МОДЕЛДЕРІ	3 33
<b>У. Умбетов, Д. Исайкин</b> МАШИНА ЖАСАУ ӨНДІРІСІНДЕГІ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫҢ ТОРАПТАРЫН ЖОБАЛАУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ЖЕТІЛДІРУДІ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ	5 50

**ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР**

<b>Д. Джуманова, Н.Жакатаева, И.Карабасов, Қ.Таласпеков, А.Жүсіпбеков</b> ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА КОНТРЕЙЛЕРЛІК ТАСЫМАЛДАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ЛОГИСТИКАЛЫҚ ИНФРАҚҰРЫЛЫМДЫ ЖЕТІЛДІРУ	60
<b>К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Түлепбек</b> ESP32 МИКРОКОНТРОЛЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ СЫҒЫЛҒАН БИОГАЗДЫ ТАСЫМАЛДАУДЫ БАСҚАРУДЫҢ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ӨЗІРЛЕУ	67

**СОДЕРЖАНИЕ**  
**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА**

<b>Б. Кангожин, Д. Инсепов</b> РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	17
<b>А. Оралбекова, В. Войцик</b> МЕТОДЫ И МОДЕЛИ САМОРАЗВИВАЮЩИХСЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	33
<b>У. Умбетов, Д. Исайкин</b> ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ УСТРОЙСТВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	50

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

<b>Д. Джуманова, Н.Жакатаева, И.Карабасов, Қ.Таласпеков, А.Жүсіпбеков</b> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН	60
<b>К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек</b> РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ СЖАТОГО БИОГАЗА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP32	67

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 17–32  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>  
УДК 7822

## RISK-ORIENTED PROVISION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

*B. Kangozhin<sup>1</sup>, D. Insepov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [b.kangozhin@alt.edu.kz](mailto:b.kangozhin@alt.edu.kz)

**Bekmuhambet Kangozhin** — doctor of technical sciences, professor, ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [b.kangozhin@alt.edu.kz](mailto:b.kangozhin@alt.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-1023-9873>;

**Dauren Insepov** — doctoral student PhD, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [insepov\\_dauren83@mail.ru](mailto:insepov_dauren83@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7098-4824>.

© B. Kangozhin, D. Insepov

**Abstract.** The modern development of railway transport and the implementation of digital technologies in energy systems impose increased requirements for ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of railway energy infrastructure. The relevance of the study is determined by the need to reduce the number of failures in automated control systems (ACS) under electromagnetic interference (EMI) and to increase equipment reliability. The aim of the study is to develop a comprehensive approach to ensuring EMC of railway transport objects using modern monitoring methods and mathematical modeling. The objectives include analyzing existing EMC methods and identifying their limitations, developing a mathematical model of the electromagnetic environment, investigating the effectiveness of hardware-software complexes for monitoring and managing EMC, and proposing methods for equipment protection against EMI. As a result of the research, a mathematical model of the electromagnetic environment at railway facilities was developed, and the software-measuring complex "PIK-EMC" was created to predict the reliability of SMART ACS systems. Experimental surveys of substations with harsh electromagnetic environments were conducted, EMI sources and transmission channels were identified, and the effectiveness of protection using hybrid filters was assessed. Modeling results demonstrated the high efficiency of hybrid filters in reducing current and voltage waveform distortions and damping resonance phenomena in the system. The study concludes that integrating mathematical modeling, hardware-software monitoring, and equipment protection significantly improves the reliability of SMART ACS systems. The results have both theoretical and practical significance: EMC assessment and management methods were refined, new regulatory approaches and software products with high commercialization potential were developed, and implementation on railway facilities is feasible. Future work includes enhancing EMC prediction methods, expanding software functionality, and industrial deployment of the developed technologies.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, SMART systems, ACS, hybrid filters, electromagnetic interference, digitalization, reliability

**For citation:** B. Kangozhin, D. Insepov. Risk-oriented provision of electromagnetic compatibility//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 17–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>.

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



## БҰЗЫЛУ-БАҒДАР ЭЛЕКТРОМАГНЕТТІК ҮЙЛЕСІМДІЛІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ

*Б. Кангожин<sup>1\*</sup>, Д. Инсепов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан.

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz

**Бекмұхамбет Кангожин** — т.ғ.д., профессор, Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-1023-9873>;

**Даурен Инсепов** — докторант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан

E-mail: insepov\_dauren83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-4824>.

© Б. Кангожин, Д. Инсепов

**Аннотация.** Қазіргі уақытта теміржол көлігінің дамуы және энергетикалық жүйелерге цифрлық технологияларды енгізу теміржол энергетикалық инфрақұрылым объектілерінің электромагниттік үйлесімділігін (ЭМС) қамтамасыз етуге жоғары талаптар қояды. Зерттеудің өзектілігі автоматтандырылған басқару жүйелерінің (АБЖ) электромагниттік кедергілер әсерінен істен шығу санын азайту және жабдық сенімділігін арттыру қажеттілігімен анықталады. Зерттеудің мақсаты – заманауи мониторинг әдістерін және математикалық модельдеуді қолдана отырып, теміржол объектілерінде ЭМС-ті қамтамасыз етудің кешенді тәсілін әзірлеу. Мақсатқа жету үшін қойылған міндеттер: ЭМС бар әдістерді талдау және олардың кемшіліктерін анықтау, электромагниттік жағдайдың математикалық моделін жасау, ЭМС мониторингі мен басқару үшін бағдарламалық-құрылғылық кешендердің тиімділігін зерттеу және жабдықты электромагниттік кедергілерден қорғау әдістерін ұсыну. Зерттеудің нәтижесінде теміржол объектілеріндегі электромагниттік жағдайдың математикалық моделі жасалды, SMART АБЖ сенімділігін болжауға арналған «ПИК-ЭМС» бағдарламалық-өлшеу кешені әзірленді. Қатты электромагниттік ортаға ие электр подстанцияларында эксперименттік тексерулер жүргізіліп, ЭМП көздері мен таралу арналары анықталды, гибридік сүзгілерді қолданудың тиімділігі бағаланды. Модельдеу нәтижелері ток пен кернеудің жоғарғы гармоникалық бұрмалануын азайтуда және жүйеде резонанстық құбылыстарды бәсеңдетуде гибридік сүзгілердің жоғары тиімділігін көрсетті. Зерттеу қорытындысы математикалық модельдеуді, бағдарламалық-құрылғылық мониторингі және жабдықты қорғауды біріктіру SMART АБЖ сенімділігін елеулі түрде арттыратынын дәлелдейді. Нәтижелер теориялық және практикалық маңызға ие: ЭМС бағалау және басқару әдістері жетілдірілді, жаңа нормативтік тәсілдер мен жоғары коммерциялық әлеуеті бар бағдарламалық өнімдер әзірленді, оларды теміржол объектілерінде енгізуге болады. Болашақ зерттеу перспективаларына ЭМС болжамдау әдістерін жетілдіру, бағдарламалық кешендердің функционалдығын кеңейту және әзірленген технологияларды өнеркәсіптік қолдануға енгізу кіреді.

**Түйін сөздер:** электромагниттік үйлесімділік, SMART жүйелері, АБЖ, гибридік сүзгілер, электромагниттік кедергілер, цифрландыру, сенімділік

**Дәйексөздер үшін:** Б. Кангожин, Д. Инсепов. Бұзылу-бағдар электромагнеттік үйлесімділікті қамтамасыз ету//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 17–32 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>.

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

## РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

*Б. Кангожин<sup>1\*</sup>, Д. Инсепов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан.

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz

**Бекмұхамбет Кангожин** — т.г.д., профессор, АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-1023-9873>;

**Даурен Инсепов** — докторант, Satbayev University, Алматы, Казахстан

E-mail: insepov\_dauren83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-4824>.

© Б. Кангожин, Д. Инсепов

**Аннотация.** Современное развитие железнодорожного транспорта и внедрение цифровых технологий в энергетические системы предъявляют повышенные требования к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) объектов железнодорожной энергетической инфраструктуры. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения числа отказов автоматизированных систем управления (АСУ) при воздействии электромагнитных помех (ЭМП) и повышением надежности работы оборудования. Цель исследования заключается в разработке комплексного подхода к обеспечению ЭМС объектов железнодорожного транспорта с применением современных методов мониторинга и математического моделирования. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов ЭМС и выявление их недостатков, разработка математической модели электромагнитной обстановки, исследование эффективности программно-аппаратных комплексов для мониторинга и управления ЭМС, а также разработка методов защиты оборудования от ЭМП. В результате проведенных исследований была создана математическая модель электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта и разработан программно-измерительный комплекс «ПИК-ЭМС», позволяющий прогнозировать надежность SMART систем АСУ. Проведено экспериментальное обследование электрических подстанций с жесткой электромагнитной обстановкой, идентифицированы источники и каналы передачи ЭМП, оценена эффективность защиты с использованием гибридных фильтров. Результаты моделирования показали высокую эффективность гибридных фильтров в снижении несинусоидальности тока и напряжения, а также в демпфировании резонансных явлений в системе. Заключение исследования подтверждает, что интеграция математического моделирования, программно-аппаратного мониторинга и защиты оборудования позволяет существенно повысить надежность функционирования SMART систем АСУ. Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение: уточнены методы оценки и управления ЭМС, разработаны новые нормативные подходы и программные продукты, обладающие высоким потенциалом коммерциализации и внедрения на железнодорожных объектах. Перспективы дальнейшей работы включают совершенствование методов прогнозирования ЭМС, расширение функциональности программных комплексов и внедрение разработанных технологий в промышленную эксплуатацию.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, SMART системы, АСУ, гибридные фильтры, электромагнитные помехи, цифровизация, надежность

**Для цитирования:** Б. Кангожин, Д. Инсепов. Риск-ориентированное обеспечение электромагнитной совместимости//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 82. Стр. 17–32. (На русс.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Введение.**

Современное развитие железнодорожного транспорта в условиях цифровизации требует обеспечения надежной электромагнитной совместимости (ЭМС) объектов энергетической инфраструктуры. Опыт предшественников показывает, что существующие методы контроля и защиты оборудования не всегда позволяют эффективно предотвращать электромагнитные помехи и аварийные ситуации (Кангожин, 2005: 36; Даутов, 2014: 89–94). При этом появляются новые объекты и системы управления, для которых отсутствуют исследования, направленные на комплексную оценку ЭМС и разработку интегрированных решений (Бадер, 2008: 56–60).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности работы железнодорожного транспорта и внедрения цифровых технологий в энергетические сети. Несмотря на существующие методы мониторинга и защиты, остаются открытые вопросы по повышению точности математического моделирования, применению термовизионных методов контроля состояния изоляции и разработке комплексных программно-аппаратных решений (Kangozhin, 2020: 1585–1590; Кангожин, 2019: 63–67). Теоретическая значимость заключается в уточнении подходов к обеспечению ЭМС, практическая — в возможности внедрения разработанных решений на объектах железнодорожного транспорта.

Объект исследования: электромагнитная совместимость железнодорожной энергетической инфраструктуры. Предмет исследования: методы оценки и обеспечения ЭМС, включая программно-аппаратные комплексы, математическое моделирование и защитные устройства.

Цель исследования: разработать комплексный подход к обеспечению электромагнитной совместимости объектов железнодорожного транспорта с применением современных методов мониторинга и моделирования.

Задачи исследования:

- Проанализировать существующие методы обеспечения ЭМС и выявить их недостатки.
- Разработать математическую модель электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта.
- Исследовать эффективность программно-аппаратных комплексов для мониторинга и управления ЭМС.
- Предложить методы защиты оборудования от электромагнитных помех и аварийных ситуаций.

В исследовании применяются следующие методы:

- математическое моделирование электромагнитной обстановки;
- анализ существующих теоретических и практических решений;
- экспериментальные методы контроля состояния оборудования (термовизионные методы);
- комплексный подход к разработке программно-аппаратных решений для повышения ЭМС.

Эффективное обеспечение ЭМС объектов железнодорожного транспорта возможно при интеграции математического моделирования, программно-аппаратного мониторинга и защитных устройств, что позволит снизить аварийность и повысить надежность работы энергетических систем.

Результаты исследования имеют как теоретическое, так и практическое значение. Теоретически — уточняются методы оценки и управления ЭМС, практическое значение заключается в возможности внедрения разработанных решений на железнодорожных объектах для повышения надежности и энергоэффективности.

#### **Материалы и методы.**

Выбор SMART систем и технологий объектов энергетики обусловлен крайне жесткой ЭМО на электрических подстанциях (ЭП), что обеспечит полноту и достоверность проведенных исследований и выводов. Разработка базируется на экспериментальных исследованиях ЭМО и математическом моделировании надежности функционирования SMART систем и технологий на объектах с крайне жесткой ЭМО.

В статье исследованы отказы ТС SMART систем АСТУ при невыполнении требований ЭМС и созданы программные продукты прогнозирования их надежности.

Научная новизна состоит в полученных новых данных и результатов, составляющих основу риск-ориентированного обеспечения ЭМС, что позволит проводить эффективную цифровизацию.

Практическая значимость проекта состоит в получении новых конкретных результатов, имеющих высокий потенциал коммерциализации:

- программный комплекс «ПИК-ЭМС», основанный на алгоритмах расчета надежности SMART систем;
- методики обследования ЭМО и риск-ориентированный метод обеспечения ЭМС;
- новая нормативно-техническая документация (или их проекты);
- отечественные разработки по снижению ЭМВ в системах электроснабжения.

Применение разработанных методов определения ЭМО и оценок эффективности мер защиты от ЭМП окажут положительное влияние на внедрение технологий с использованием SMART систем на предприятиях с неблагоприятной ЭМО и повысит надежность внедряемых информационных технологий.

Проект направлен на решение нижеследующих научно-технических проблем обеспечения ЭМС:

- необходимости перехода к комплексной концепции выполнения требований электромагнитной совместимости с соответствующей переработкой нормативно-технической документации (например, правил устройств электроустановок),
- разработки средств и методов защит от электромагнитных помех, соответствующих современным знаниям об их источниках и уровнях (например, правил устройств молниезащиты и заземления),
- необходимость исследований влияния защитных средств (например, УЗИП) на надежность самих SMART систем и функциональность автоматизированных (автоматических) систем управления,
- необходимость исследований надежности цифровых автоматизированных систем управления в неблагоприятной электромагнитной обстановке,
- предлагаемая системы защиты от электромагнитных волн с помощью гибридных фильтров.

Проведение исследований и разработка научных основ риск-ориентированного обеспечения ЭМС SMART систем на примере цифровых технологий АСТУ объектами электроэнергетики. Выбор SMART систем и технологий энергетики обусловлен крайне жесткой ЭМО на электрических подстанциях. Разработка базируется на экспериментальных исследованиях ЭМО и математических моделях прогнозирования надежности функционирования SMART систем и технологий.

Достижение цели связана с исследованиями источников и уровня электромагнитных помех (ЭМП), средств и методов их ограничения, прогнозирования надежности SMART систем АСТУ при риск-ориентированном обеспечении ЭМС. Применение в АСТУ SMART систем, восприимчивых к воздействию ЭМП ведет к увеличению числа их отказов.

Принятие решений о реализации мер по обеспечению ЭМС: обследование ЭМО, необходимость проектирования и экономический эффект от установки мер защиты от ЭМП, достаточность их выбора, основанных на прогнозировании надежности составляет суть риск-ориентированного подхода обеспечения ЭМС.

Способом достижения цели является проведение исследований и решение нижеследующих задач проекта:

- Обследование объекта с крайне жесткой ЭМО.
- Исследования механизмов возникновения ЭМП.
- Идентификация источников и вероятности появления ЭМП.
- Определение статистических характеристик параметров ЭМП.
- Идентификация ЭМП, приводящих к отказам SMART систем.
- Идентификация каналов передачи ЭМП от источника к ТС SMART систем АСТУ.
- Оценка помехоустойчивости АСТУ ко всем ЭМП.
- Определение степени жесткости испытаний ТС SMART систем АСТУ ЭМП.
- Расчет надежности SMART систем АСТУ конкретного типа.
- Формулирование требований к ЭМС SMART системам.
- Предлагаемые способы защиты от ЭМВ отечественными гибридными фильтрами.

#### **Результаты.**

Решения поставленных задач связана с научно-технической проблемой обеспечения ЭМС технических средств цифровизации и является частью решения задач перехода к цифровой индустрии.

В последние десятилетие резко возросла насыщенность производственной сферы деятельности приборами и технологиями, базирующимися на достижениях SMART систем и технологий. По мере развития ТС SMART систем чувствительность, а значит и восприимчивость к различного рода помехам, повышается. Одновременно с этим непрерывно растет амплитудный и частотный диапазон ЭМП. Все это обостряет проблему ЭМС, в особенности на объектах энергетики с крайне жесткой ЭМО. (Кангожин, 2005: 36; Кангожин, 2014: 108–112).

Исключительная значимость вопросов ЭМС на современном этапе развития экономики страны определяется ее цифровизацией. Правительством РК принят технический регламент по ЭМС, который устанавливает требования ЭМС в целях предотвращения опасности жизни и здоровья человека, окружающей среде и исключения недопустимых ЭМП другим техническим средствам и системам (Даутов, 2014: 89–94; Кангожин, 2016: 64–67). Вопросы обеспечения ЭМС сложны, многообразны и должны быть взаимоувязаны и являются предпосылками к разработке проекта (Кангожин, 2019: 63–67; Кангожин, 2018; Kangozhin, 2020: 1585–1590; Бадер, 2008: 56–60; Инсепов, 2008: 17–20; Инсепов, 2013: 33–39).

Высокая чувствительность микропроцессорной техники SMART систем, крайне жесткая ЭМО на ЭП, недостаточная эффективность внедряемых защитных мер от ЭМП являются предпосылками к разработке риск-ориентированного обеспечения ЭМС (Кангожин, 2019: 63–67; Кангожин, 2018).

Принципиальным отличием является то, что новые данные и результаты прогнозирования надежности SMART систем (Рис.1) вводятся в основу риск-ориентированного обеспечения ЭМС (Kangozhin, 2020: 1585–1590).

Проведенный обзор предшествующих научных исследований, проведенных в мире, относящихся к теме проекта выявил ряд проблем:

- недостаточны знания физической природы и уровня ЭМП составляющих ЭМО;
- нет алгоритмов определения необходимости и достаточности мер обеспечения надежности SMART систем при неблагоприятном ЭМО;
- существующая нормативная база по обеспечению ЭМС не отражает достижения современной науки,

- существующие мероприятия улучшения ЭМО не обеспечивают надежность SMART систем и финансово затратны,

- отсутствует комплексное обеспечение ЭМС SMART систем АСТУ.

Решение в настоящем проекте этих проблем определяет его взаимосвязь с ранее проведенными исследованиями. В частности, результаты проекта позволят развить теорию и практику защит от перенапряжений. Такая защита может быть построена на предварительных результатах ТОО «КИТР», имеющих охраняемые документы.

В проекте в качестве источников ЭМП рассматриваются атмосферные и коммутационные перенапряжения. Создаваемые и излучаемые ими ЭМП приведены на рис.1.

Защита ЭП от ЭМП основана на концепции зон защит (ЗЗ): пространство, в котором имеются защищаемые ТС АСТУ, должно разделяться на ЗЗ. Данные зоны являются определенными участками пространства, где уровень ЭМП ( $H_i, U_i, I_i$ ) совместимы с уровнем жесткости испытаний ТС АСТУ. Граница действия ЗЗ определяется используемыми мерами защиты, ЗЗ различаются значительными изменениями в уровне ЭМП (Рис. 2).

Все металлические устройства, корпуса электрооборудования, экраны кабелей заземляются. Для защиты от кондуктивных импульсных перенапряжений на границах зон устанавливаются ограничители перенапряжений ОПН, ТС АСТУ защищаются устройствами защиты от импульсных перенапряжений ( $U_2 \ll U_0$  и  $I_2 \ll I_0$ ). Экраны используются для защиты от излучаемых магнитных полей ( $H_2 \ll H_0$ ).

В предлагаемой статье впервые будут исследованы отказы АСТУ при невыполнении требований риска ЭМС. Полученные при этом новые данные и результаты предопределяет научную новизну работы.

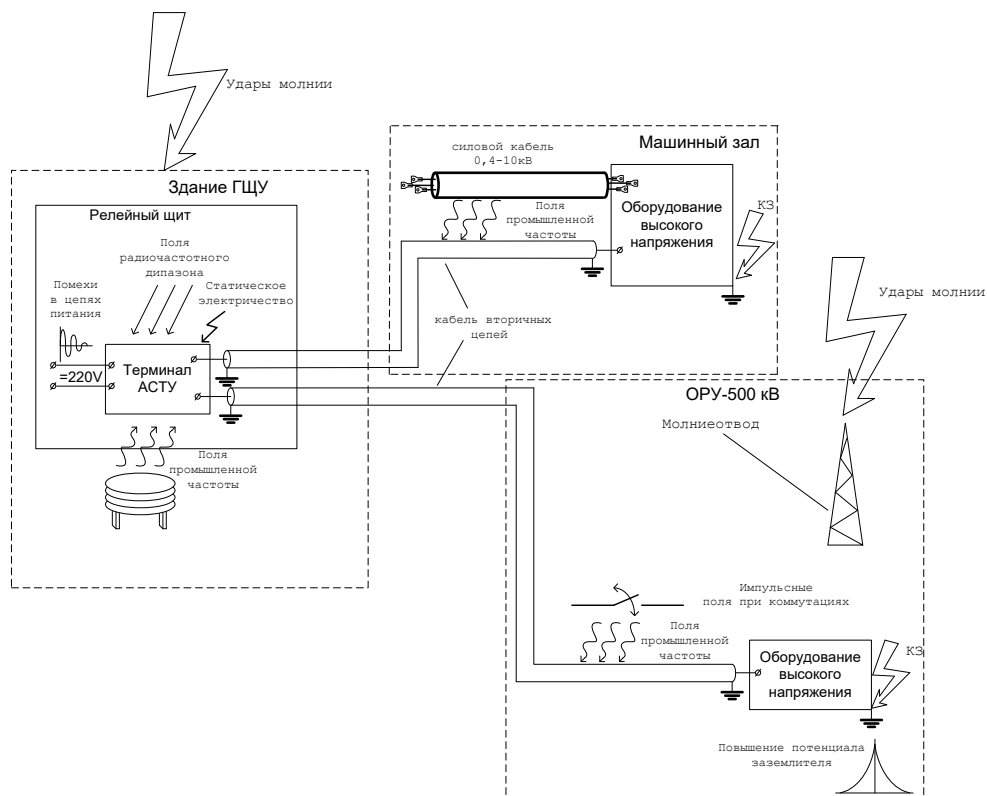


Рис. 1. Источники электромагнитных помех на ЭП

В процессе разработки процедуры определения надежности SMART систем впервые будут идентифицированы всех типы АСТУ и соответствующие им риски от отказа, впервые будет создан механизм оценки защит от ЭМП.

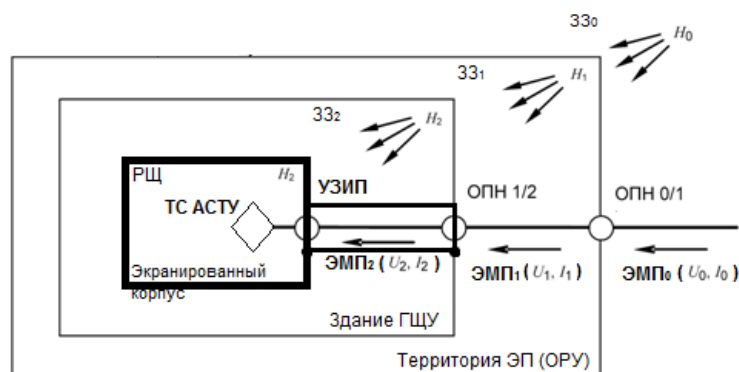


Рис. 2. Зоны защит электрической подстанции

Процедуры обеспечения ЭМС (Рис. 1) базируются на определении ЭМО электрической подстанции (Кангожин, 2005: 36; Кангожин, 2014: 108–112). Как свидетельствует большинство работ, посвященных ЭМС на энергообъектах высокого напряжения, отказ имеет место и после реализации мер по обеспечению ЭМС. Такое положение связано с изменениями ЭМО с течением времени из-за внесения изменений при реконструкции, модернизации ПС, старения оборудования и т.д. Следовательно, риск-ориентированное обеспечение ЭМС связано с контролем ЭМО и соответственно должно осуществляться на всех этапах жизнедеятельности энергетических объектов с этапа проектирования, где принятые проектные решения должны обеспечивать минимальные электромагнитные воздействия в местах установки SMART систем АСТУ и нормативные требования по классам жесткости испытаний на помехоустойчивость ТС SMART систем до осуществления периодического технического надзора уровня ЭМО.

#### Обсуждение.

Научная и практическая значимость проекта состоит в получении новых конкретных результатов, отвечающих требованиям научной новизны и имеющих потенциал коммерциализации: программный комплекс «ПИК-ЭМС», основанный на прогнозировании надежности SMART систем при неблагоприятной ЭМО; востребованные на практике методики обследования ЭМО и обеспечения ЭМС, разработанные на основе полевых экспериментов на реальных ПС; разработанные инновационные средства (или требования к ним) от ЭМП и методы обеспечения ЭМС, новая нормативно-техническая документация (или их проекты).

Одно из принципиальных отличий проекта от существующих аналогов заключается в следующем: известными зарубежными фирмами производителями защитных устройств в защите от ЭМП продвигается подход защиты УЗИПами, при этом их количество может достигать несколько сотен штук (или даже более тысячи). При средней цене в 1000\$ очевиден коммерческий интерес. При этом совершенно не учитывается их негативное влияние на функциональные характеристики и надежность самих SMART систем АСТУ. Реализация проекта позволит снизить число УЗИП до единиц штук, а в ряде случаев отказаться от них.

Один из конечных результатов проекта будет программно-измерительный комплекс «ПИК-ЭМС» прогнозирования надежности SMART систем АСТУ, основанный на достижениях отечественных и зарубежных производителей, имеет высокую степень коммерциализации.

Кроме оговоренных выше в статье результаты могут войти в основу новых эффективных технологий эксплуатации, диагностики и ремонта электрооборудования электрических станций и подстанций. Результаты исследований найдут отражение в соответствующих научных публикациях и проектах нормативных документов. Использование разработанных методов определения ЭМО и оценки эффективности мер защиты от ЭМП окажут положительное влияние на развитие технологий с использованием

SMART систем, используемой на предприятиях с источниками ЭМП что, безусловно, повысит внедряемость информационных технологий.

Результаты проекта будет представлять интерес для предприятий энергетики, РЭКов и национальной компании АО «KEGOC» для принятия решений необходимости контроля ЭМО действующих энергообъектов и достаточности защитных мер по обеспечению ЭМС. Результаты имеют большую практическая ценность, выраженную в минимизации возможных ущербов из-за не выполнения требований ЭМС, в повышении энергоэффективности действующих ЭП, в принятии управленческих решений, исключающих катастрофические последствия из-за отказов АСТУ при невыполнении требований технического регламента ЭМС.

В процессе реализации выбранного подхода исследований будут проанализированы существующие методики определения ЭМП, при необходимости будут созданы новые программы расчетов и схемы экспериментов, разработаны необходимые дополнительные методики, приборы и программные продукты для определения ЭМО на реальных подстанциях и ОРУ станций. Такой выбранный подход обеспечит минимизацию затрат для достижения целей и достоверность полученных результатов.

В процессе выполнения проекта будет реализован подход одновременного использования надежных экспериментально-расчетных методик определения ЭМО, математическое моделирование электрофизических процессов при воздействии ЭМП и компьютерные расчеты отказа. В целом такой подход является наиболее общим и включает в себя ряд подходов, известных ранее.

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем электроснабжения является повышение качества электроэнергии. Острота данной проблемы во многом связана с бурным развитием преобразовательной техники и ее широким использованием. Нелинейный характер преобразовательной нагрузки приводит к искажению формы (несинусоидальности) кривых тока и напряжения в системе электроснабжения (СЭ). Несинусоидальность кривых тока и напряжения оказывает негативное влияние на работу различных электротехнических устройств в составе СЭ, что значительно сокращает срок службы оборудования СЭ. Таким образом, снижение несинусоидальности кривых тока и напряжения является одной из важнейших и насущных задач современного электроснабжения.

Одним из традиционных способов снижения несинусоидальности кривых тока и напряжения в СЭ является использование пассивных фильтров: LC-цепей, настроенных в резонанс на частоты высших гармоник (Бадер, 2008: 56–60; Инсепов, 2013: 33–39). Главным достоинством пассивных фильтров является низкая стоимость. Однако наличие ряда серьезных недостатков, таких, как низкая добротность, технологический разброс параметров реакторов и конденсаторов фильтра, возможность возникновения опасных резонансных явлений и негативное влияние на переходные процессы в СЭ при установке фильтров, привело к значительному сокращению и ограничению их использования.

С развитием силовой электроники появилась возможность создания активных фильтров высших гармоник (англ. active filters) (Бадер, 2008: 56–60; Инсепов, 2013: 33–39). Имея в своей основе четырехквadrантный преобразователь на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах, активный фильтр обеспечивает высокую эффективность фильтрации высших гармоник. Принцип действия наиболее распространенного активного фильтра параллельного типа заключается в генерации тока высших гармоник в противофазе с током высших гармоник нагрузки (Рис. 3). Таким образом, токи высших гармоник циркулируют между фильтром и нагрузкой, не попадая дальше в питающую сеть. В настоящее время активные фильтры выпускаются серийно на номинальные токи до 450 А (Инсепов, 2013: 33–39). Однако широкое применение активных фильтров ограничивает их высокая стоимость, связанная с большой установленной мощностью.

В связи с этим наиболее перспективным направлением является разработка силовых гибридных фильтров (англ. hybrid filters), представляющих собой комбинацию пассивного фильтра и активного элемента (регулятора) на базе маломощного электронного преобразователя в четырехквadrантной плоскости (Рис. 4).

Наличие регулятора позволяет корректировать частотную характеристику СЭ, повышая эффективность фильтрации на частоте настройки пассивного фильтра и демпфируя резонансные явления в системе СЭ-фильтр. Малая установленная мощность силового электронного регулятора достигается благодаря наличию пассивного фильтра. В результате, в отличие от чисто активного фильтра, регулируемый фильтр становится конкурентоспособным устройством, решающим насущные задачи в СЭ.

На рис. 4 представлены возможные варианты топологии гибридного фильтра. Очевидно, что для получения системой управления регулятора информации о высших гармониках в системе могут быть использованы различные токи и напряжения в СЭ, например, ток сети, ток нагрузки, напряжение на пассивном фильтре и т.д. Таким образом, сочетание отслеживаемого сигнала, содержащего высшие гармоники, места подключения активной части и способа формирования сигнала задания определяют степень устранения недостатков, характерных для пассивной фильтрации. При этом особую важность

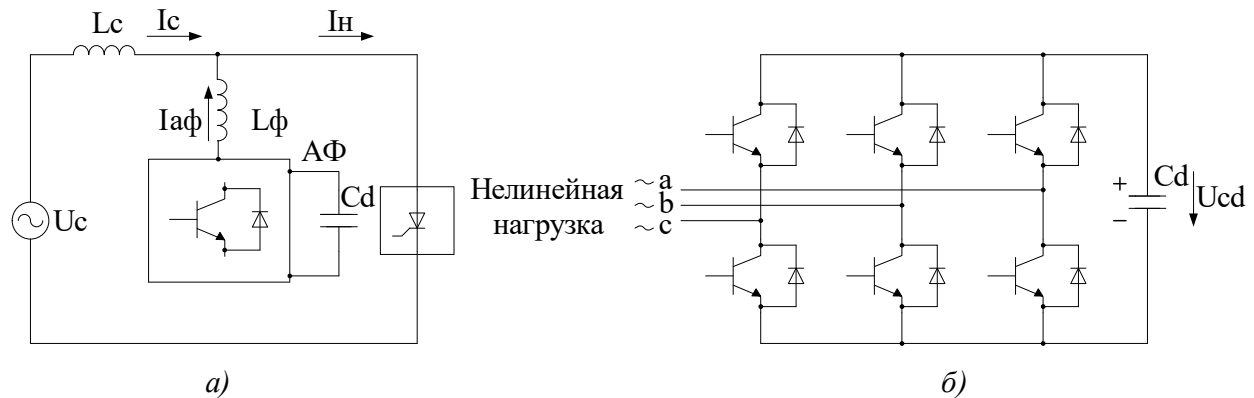


Рис. 3. Однофазная эквивалентная схема СЭ с активным фильтром параллельного типа (а) и схема силовой части преобразователя (б) ( $L_c$  - эквивалентная индуктивность сети)

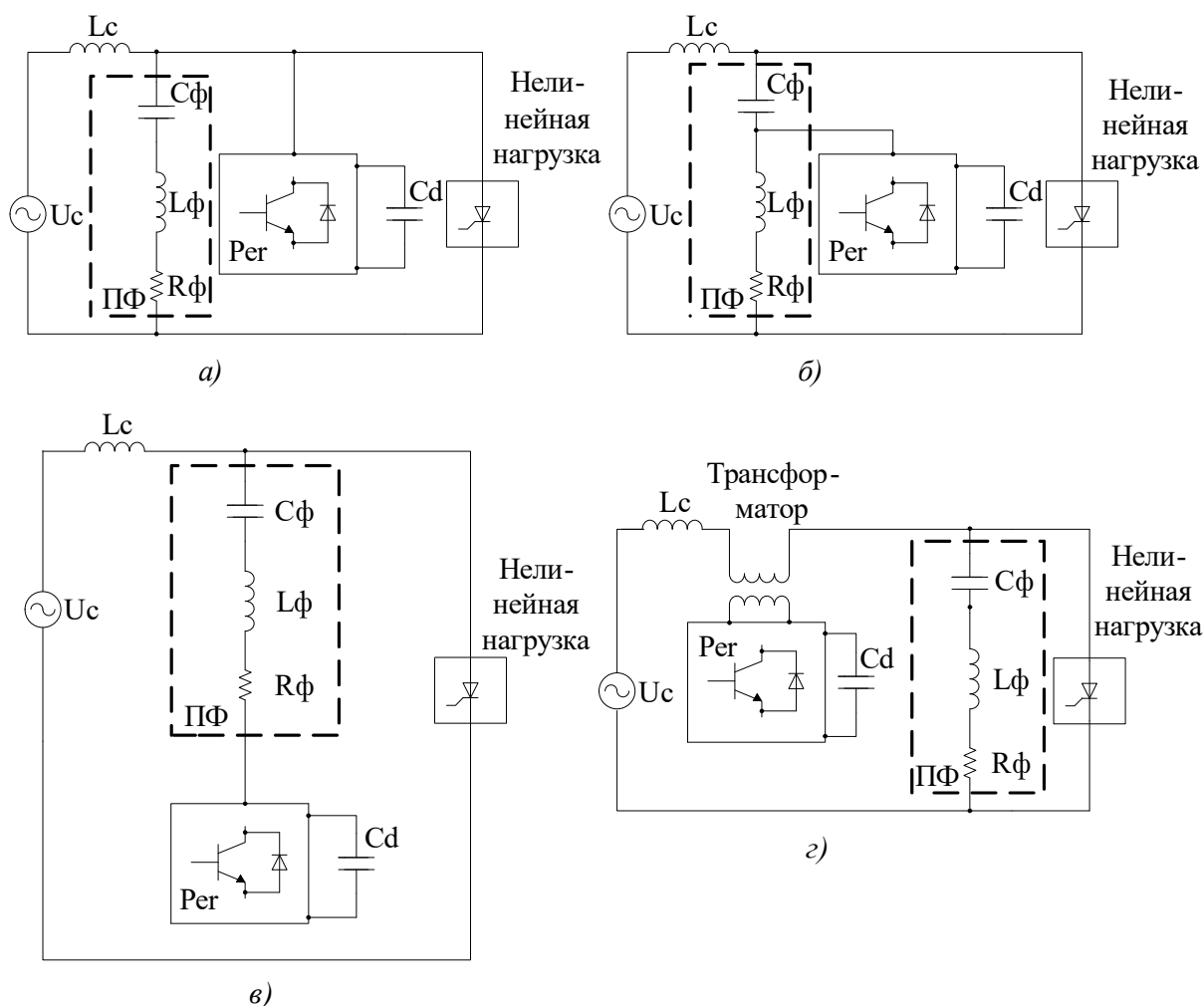


Рис. 4. Топология гибридного фильтра (однофазная эквивалентная схема,  $L_c$  - эквивалентная индуктивность сети):

*а* – параллельно нагрузке; *б* – параллельно реактору пассивного фильтра; *в* – последовательно в цепь пассивного фильтра; *г* – последовательно в сеть представляет тот факт, что положение фиктивного сопротивления, создаваемого регулятором в СЭ, не обязательно совпадает с фактическим местом подключения регулятора.

Анализ силового регулятора, как двухполюсника с управляемым полным входным сопротивлением, позволяет использовать общий подход при рассмотрении гибридных фильтров (Бадер, 2008: 56–60). Функционирование двухполюсника с положительным активным сопротивлением (потребление энергии) и с отрицательным активным сопротивлением (генерация энергии) ограничено энергоемкостью накопителя, в то время как работа с индуктивным или емкостным входным сопротивлением не ограничена. В результате регулятор может создавать полное сопротивление различного характера в СЭ. Таким образом, использование регулятора позволяет изменять положения резонансных частот в системе, а также снижать амплитуды резонансных пиков. Аналогичным образом регулятор может влиять на полное сопротивление пассивного фильтра на частоте настройки. В результате возрастает амплитуда тока высших гармоник на резонансной частоте в пассивном фильтре, т.е. повышается эффективность фильтрации.

На Рис. 5 представлен основной канал регулирования системы управления гибридного фильтра, отвечающий за формирование сигнала задания. Помимо основного, система управления также содержит два вспомогательных канала регулирования, предназначенных для синхронизации с основной частотой напряжения в точке

подключения фильтра и стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе преобразователя. Для выделения необходимой гармонической составляющей или области спектра входного сигнала в регуляторе фильтра наиболее широкое распространение получил метод, основанный на преобразовании в синхронных координатах (Рис. 5.) (Бадер, 2008: 56–60). Используя прямое преобразование, векторам трехфазной системы ставим в соответствии проекции единственного вектора в двухфазной системе координат, вращающейся с частотой сети. Преимуществом данного метода является высокая точность выделения необходимого спектра несинусоидального входного сигнала.

Сигналы  $X^*$ , получаемые в канале регулирования, являются не чем иным, как входными сигналами  $X$  за вычетом составляющей на основной частоте сети. Далее блок формирования сигнала задания реализует один из законов регулирования, создавая определенные характер и значение полного сопротивления силового электронного регулятора на частотах высших гармоник, содержащихся в сигнале  $X^*$ .

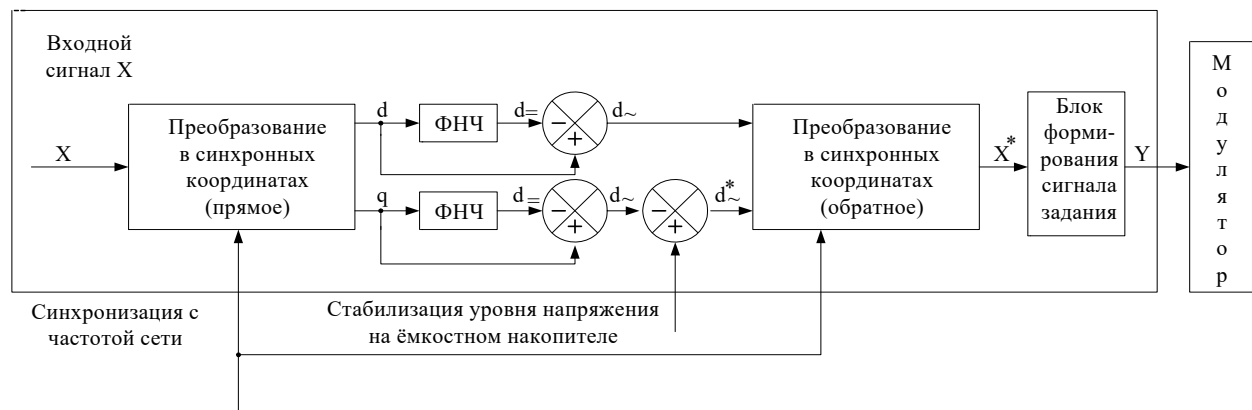


Рис. 5. Обобщенная блок-схема основного канала системы управления силовым регулятором гибридного фильтра в усреднённом состоянии

В качестве входных переменных  $X$  регулятора потенциально могут быть использованы любые токи и напряжения в СЭ, имеющие необходимый спектральный состав. Важно отметить, что задачи, решаемые регулятором, зависят от спектрального состава входного сигнала регулятора. Очевидно, что для повышения качества фильтрации пассивным фильтром на частоте настройки достаточно обрабатывать только гармонику входного сигнала данной частоты. В этом случае установленная мощность регулятора значительно меньше, чем в случае использования всего спектра сигнала. Кроме того, в этом случае упрощается задача модуляции сигнала в преобразователе. В то же время демпфирование регулятором резонансных явлений в системе возможно только при использовании широкого спектра входного сигнала регулятора.

В качестве входных сигналов потенциально могут быть рассмотрены следующие напряжения и токи высших гармоник в СЭ (Рис. 3): ток нагрузки  $I_n$ , токи сети  $I_c$  и пассивного фильтра  $I_\phi$ , напряжение в точке подключения пассивного фильтра и т.д. В целом использование тока в качестве отслеживаемого сигнала более предпочтительно. В первую очередь это связано с существенной разницей в амплитудах высших гармоник и основной гармоники напряжения, что значительно затрудняет выделение необходимой гармонической составляющей. Таким образом, в качестве входных сигналов возможно использование тока нагрузки  $I_n$ , токов сети и фильтра  $I_c$  и  $I_\phi$ . Необходимо отметить, что использование тока нагрузки имеет существенный недостаток, поскольку не позволяет судить о наличии резонансов в системе СЭ-фильтр. Таким образом, использование тока нагрузки  $I_n$  возможно только для повышения качества фильтрации на частоте настройки пассивного фильтра. Однако при этом преимуществом тока нагрузки перед другими

сигналами является практически полная независимость от напряжения высших гармоник сети, повышающая устойчивость регулирования. В то же время использование тока сети или тока фильтра в качестве входного сигнала регулятора теоретически позволяет осуществить как повышение фильтрации на частоте настройки фильтра, так и демпфирование резонансных явлений в СЭ.

Поэтому схемы управления гибридными фильтрами с током сети или током фильтра в качестве входного сигнала являются наиболее перспективными.

При оценке эффективности топологий гибридного фильтра (Рис. 3 а, б) при различных входных сигналах и законах регулирования необходимо учитывать не только несинусоидальность тока нелинейной нагрузки, но и возможную в реальных СЭ несинусоидальность питающего напряжения. Несинусоидальность напряжения СЭ также приводит к возникновению резонансов в системе и дополнительно нагружает пассивный фильтр токами высших гармоник (последовательный резонанс в контуре СЭ-фильтр). Для оценки эффективности различных топологий применяются известные допущения, позволяющие представить нелинейную нагрузку источником высших гармонических составляющих тока нагрузки, а несинусоидальное напряжение питающей сети – источником высших гармонических составляющих напряжения сети. Далее, используя метод эквивалентных источников, можно рассматривать отдельно компоненты тока сети, создаваемые источником напряжения высших гармоник сети и источником тока высших гармоник нагрузки.

Для оценки эффективности топологий гибридного фильтра (Рис. 3 а, б) при различных входных сигналах было проведено математическое моделирование СЭ с нелинейным потреблением и гибридным фильтром в программном комплексе С++ (Инсепов, 2013: 33–39), позволяющем достаточно просто получить необходимые частотные характеристики.

При анализе использовались следующие исходные данные типовой низковольтной трехфазной сети. Эквивалентная индуктивность  $L_C$  фазы сети составляет 300 мкГн. Параметры типового пассивного фильтра 5-й гармоники: емкость конденсатора фильтра  $C_\phi = 249 \text{ мкФ}$ ; индуктивность реактора фильтра  $L_\phi = 1,6 \text{ мГн}$ ; сопротивление фильтра  $R_\phi = 0,25 \text{ Ом}$  (типовое значение добротности  $Q=10$ ). Моделирование производилось в диапазоне частот 100 Гц – 1 кГц, содержащем наиболее энергетически важные высшие гармонические составляющие.

Результаты моделирования показали, что при наличии несинусоидальности напряжения сети использование регулятора параллельно с пассивным фильтром (Рис. 4а) при токе сети/токе фильтра в качестве входного сигнала регулятора нежелательно, поскольку создает предпосылки для усиления высших гармоник. Это ограничивает применение данного решения. Однако если напряжение сети синусоидально, то наилучший результат дает как ток сети, так и ток фильтра в комбинации с пропорциональным законом регулирования, реализуемым в блоке формирования сигнала задания. В этом случае при работе с током фильтра регулятор эквивалентен включению индуктивного сопротивления последовательно с сопротивлением сети. В случае же работы системы управления с током сети регулятор вносит фиктивное индуктивное сопротивление параллельно сопротивлению пассивного фильтра. В результате в обоих случаях регулятор демпфирует резонанс СЭ-фильтр и повышает качество фильтрации на частоте настройки пассивного фильтра.

Анализ топологии (Рис. 4б) с током фильтра в качестве входного сигнала показал, что в этом случае работа регулятора соответствует включению фиктивного сопротивления последовательно с цепью пассивного фильтра. Очевидно, что в этом случае невозможно одновременно обеспечить демпфирование резонансов и повышение качества фильтрации на частоте настройки пассивной части, как взаимоисключающие друг друга характеристики. Это означает, что обеспечение полной функциональности регулируемого

фильтра в данном случае не представляется возможным.

В этом случае регулятор эквивалентен внесению активно-индуктивного сопротивления последовательно с сопротивлением сети. При этом наибольшее влияние оказывает индуктивная составляющая, обеспечивающая сдвиг резонансной частоты СЭ-фильтра в область низких частот.

Анализ топологии (Рис. 4в) показал, что при работе по току фильтра  $I_\phi$  фиктивное сопротивление регулятора расположено последовательно с цепью пассивного фильтра. Как было отмечено ранее, данное решение не обеспечивает полной функциональности регулируемому фильтру.

#### **Заключение.**

Проведённое исследование посвящено проблемам обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) объектов железнодорожной энергетической инфраструктуры с использованием SMART систем и цифровых технологий автоматизированных систем управления (АСУ). Цель работы — разработка комплексного риск-ориентированного подхода к обеспечению ЭМС — была достигнута посредством реализации комплекса научных методов, включающих математическое моделирование электромагнитной обстановки, экспериментальные методы контроля состояния оборудования, а также разработку и апробацию программно-аппаратных комплексов мониторинга и защиты.

Методы исследования позволили выявить основные источники и каналы распространения электромагнитных помех (ЭМП), оценить их влияние на надежность SMART систем, а также создать эффективные средства защиты, включая отечественные гибридные фильтры, обеспечивающие как снижение амплитуд высших гармоник, так и демпфирование резонансных явлений в системе электроснабжения. Проведено моделирование различных топологий гибридных фильтров с учетом входных сигналов регулятора, что позволило определить оптимальные схемы подключения активной части фильтра для повышения эффективности фильтрации и минимизации негативного воздействия ЭМП на оборудование.

В результате работы получены следующие ключевые результаты:

- Разработана методика комплексного риск-ориентированного обеспечения ЭМС, включающая обследование электромагнитной обстановки, идентификацию источников ЭМП, оценку помехоустойчивости АСУ и формирование требований к ЭМС SMART систем.

- Создан программный комплекс «ПИК-ЭМС», позволяющий прогнозировать надежность SMART систем при воздействии ЭМП, с возможностью применения как на действующих объектах, так и при проектировании новых.

- Проведен анализ эффективности различных топологий гибридных фильтров, показавший, что использование обратной связи по току сети обеспечивает оптимальное демпфирование резонансов и высокое качество фильтрации, что практически исключает усиление высших гармоник при несинусоидальности тока нагрузки и питающего напряжения.

- Разработаны рекомендации по минимизации числа защитных устройств УЗИП без снижения надежности АСУ, что снижает затраты на эксплуатацию и повышает эффективность защиты.

Выводы исследования подтверждают истинность выдвинутого автором утверждения о том, что интеграция математического моделирования, экспериментальных методов контроля и программно-аппаратных комплексов позволяет существенно повысить надежность SMART систем и эффективность мер обеспечения ЭМС. Новизна работы заключается не только в разработке инструментов прогнозирования отказов и оптимизации фильтров, но и в комплексной оценке взаимодействия ЭМП с цифровыми системами управления, что ранее в отечественной и зарубежной практике реализовано не было.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением применения

разработанных методов на объекты железнодорожной инфраструктуры различного уровня напряжения и автоматизации, а также с внедрением комплексных программно-аппаратных решений для мониторинга и адаптивной защиты SMART систем. Практическое применение результатов возможно в области эксплуатации и модернизации электрических подстанций, повышении энергоэффективности и безопасности железнодорожного транспорта, а также в разработке новой нормативно-технической документации по ЭМС, соответствующей современным требованиям цифровой индустрии.

Таким образом, проведённая работа формирует научную и практическую основу для развития риск-ориентированного подхода к обеспечению ЭМС, открывает возможности для коммерциализации программно-аппаратных решений, а также служит важным вкладом в повышение надёжности и безопасности функционирования SMART систем в условиях жесткой электромагнитной обстановки.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бадер, 2008 — Бадер М.П., Инсепов Д.Г. Гибридные фильтры как источник снижения электромагнитных волн в системах электроснабжения // Технологии электромагнитной совместимости. — 2008. — №1(24). — С. 56–60. [Russ.]
- Даутов, 2014 — Даутов С.С., Инсепов Д.Г., Омарова Т.М. Исследование электромагнитной обстановки тяговой подстанции // Вестник КазАТК. — 2014. — №2. — С. 89–94. [Russ.]
- Инсепов, 2008 — Инсепов Д.Г. Математическая модель электромагнитной совместимости // Наука и техника транспорта. — 2008. — №4. — С. 17–20. [Russ.]
- Инсепов, 2013 — Инсепов Д.Г. Способы защиты от электромагнитных помех на железнодорожном транспорте // Алматы: ГУТиП, Промышленный транспорт Казахстана. — 2013. — №2(39). — С. 33–39. [Russ.]
- Кангожин, 2005 — Кангожин Б.Р. Научно-практические аспекты ЭМС АСТУ. Сб.т. «Проблемы развития энергетики и телекоммуникаций в свете стратегии индустриально-инновационного развития Казахстана». — Алматы. — 2005. — С. 36. [Russ.]
- Кангожин, 2014 — Кангожин Б.Р., Даутов С.С., Омарова Т.М. Обеспечение электромагнитной совместимости при проектировании заземляющих устройств тяговых подстанций // Вестник КазАТК. — 2014. — №6. — С. 108–112. [Russ.]
- Кангожин, 2018 — Кангожин Б.Р., Даутов С.С., Исаков А.К., Гараев Е.Т., Артюхин А.В. Комплекс обеспечения электробезопасности при оперативных переключениях на энергетических объектах. Патент №3357 на полезную модель от 08.11.2018 г. — 2018. — С. 1. [Russ.]
- Кангожин, 2019 — Кангожин Б.Р., Даутов С.С. Программно-аппаратный измерительный комплекс повышения технологической энергоэффективности — инструмент цифровизации электрических сетей // XLIX Международная научно-практическая конференция «Фёдоровские чтения-2019». — Москва, МЭИ. — 2019. — С. 63–67. [Russ.]
- Кангожин, 2016 — Кангожин Б.Р., Шелофаст В.В. Комплексное математическое моделирование актуальных задач железных дорог // Транс-Экспресс Казакстан. — 2016. — №6. — С. 64–67. [Russ.]
- Kangozhin, 2020 — Kangozhin B.R., Dautov S.S., Zharmagambetova M.S., Kosilov M.A. Thermal-imaging method for monitoring the insulation condition of oil-filled equipment // International Journal of Advanced Science and Technology. — 2020. — Vol. 29. — № 12s. — Pp. 1585–1590. [Eng.]

#### REFERENCES

- Bader, 2008 — Bader, M.P., Insepev, D.G. (2008). Gibridnye fil'try kak istochnik snizheniya elektromagnitnykh voln v sistemakh elektrosnabzheniya [Hybrid Filters as a Source of Electromagnetic Wave Reduction in Power Supply Systems] // Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestivosti. — 2008. — №1(24). — Pp. 56–60. [in Russ.]
- Dautov, 2014 — Dautov, S.S., Insepev, D.G., Omarova, T.M. (2014). Issledovanie elektromagnitnoi obstanovki tyagovoi podstantsii [Investigation of the Electromagnetic Environment of a Traction Substation] // Vestnik KazATK. — 2014. — №2. — Pp. 89–94. [in Russ.]
- Insepev, 2008 — Insepev, D.G. (2008). Matematicheskaya model' elektromagnitnoi sovmestivosti [Mathematical Model of Electromagnetic Compatibility] // Nauka i tekhnika transporta. — 2008. — №4. — Pp. 17–20. [in Russ.]
- Insepev, 2013 — Insepev, D.G. (2013). Spособы zashchity ot elektromagnitnykh pomekh na zheleznodorozhnom transporte [Methods of Protection Against Electromagnetic Interference in Railway Transport]. — Almaty: GUTiP, Promyshlennyy transport Kazakhstana. — 2013. — №2(39). — Pp. 33–39. [in Russ.]
- Kangozhin, 2005 — Kangozhin B.R. (2005). Nauchno-prakticheskie aspekty EMS ASTU [Scientific and Practical Aspects of EMC ASTU] // Sbornik trudov «Problemy razvitiya energetiki i telekommunikatsii v svete strategii industrial'no-innovatsionnogo razvitiya Kazakhstana». — Almaty. — 2005. — P. 36. [in Russ.]
- Kangozhin, 2014 — Kangozhin, B.R., Dautov, S.S., Omarova, T.M. (2014). Obespechenie elektromagnitnoi sovmestivosti pri proektirovanii zazemlyayushchikh ustroystv tyagovykh podstantsii [Ensuring Electromagnetic Compatibility in the Design of Grounding Devices of Traction Substations] // Vestnik KazATK. — 2014. — №6. — Pp. 108–112. [in Russ.]
- Kangozhin, 2018 — Kangozhin, B.R., Dautov, S.S., Isakov, A.K., Garaev, E.T., Artyukhin, A.V. (2018). Kompleks obespecheniya elektrobezopasnosti pri operativnykh pereklyucheniyyakh na energeticheskikh obektakh [Complex for Ensuring Electrical Safety During Operational Switching at Energy Facilities]. Patent №3357 on a Utility Model dated 08.11.2018. — 2018. — P. 1. [in Russ.]
- Kangozhin, 2019 — Kangozhin, B.R., Dautov, S.S. (2019). Programmo-apparatnyi izmeritel'nyi kompleks povysheniya tekhnologicheskoi energoeffektivnosti — instrument tsifrovizatsii elektricheskikh setei [Hardware-Software Measuring Complex

for Improving Technological Energy Efficiency — Tool for Digitalization of Electrical Networks] // XLIX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Fyodorovskie chteniya-2019». — Moscow: MEI. — 2019. — Pp. 63–67. [in Russ.]

Kangozhin, 2016 — Kangozhin, B.R., Shelophast, V.V. (2016). Kompleksnoe matematicheskoe modelirovanie aktual'nykh zadach zheleznykh dorog [Complex mathematical modeling of current railway problems]. Trans-Express Kazakhstan. — 2016. — № 6. — Pp. 64–67. [in Russ.]

Kangozhin, 2020 — Kangozhin, B.R. (2020). Thermal-imaging method for monitoring the insulation condition of oil-filled equipment [Thermal-Imaging Method for Monitoring the Insulation Condition of Oil-Filled Equipment] // International Journal of Advanced Science and Technology. — 2020. — Vol. 29. — №12s. — Pp. 1585–1590. [in Eng.]



Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 33–49  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.003>  
UDC 629.42.067(075)

## METHODS AND MODELS OF SELF-LEARNING AUTOMATED DETECTION SYSTEMS STATE OF HIGH-SPEED RAILWAY TRANSPORT HUBS

*A. Oralbekova<sup>1\*</sup>, W. Wojcik<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Lublin Polytechnic University, Lubun, Poland.

E-mail: [oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz](mailto:oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz)

**Ayaulym Oralbekova** — PhD, associate professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz](mailto:oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

**Waldemar Wojcik** — PhD, Director of Institute of Electronic and Information Technologies, Lublin Polytechnic University, Lubun, Poland

E-mail: [waldemar.wojcik@pollub.pl](mailto:waldemar.wojcik@pollub.pl), <https://orcid.org/0000-0002-0843-8053>.

© A. Oralbekova, W. Wojcik

**Abstract.** The article contains the results of researches aimed at the further development of methods and models for self-trained automated detection systems (SADS) of nodes and aggregates of high-speed railway transport (HSRT) based on the clustering of failure signs. There has been developed SADS model of nodes and aggregates of HSRT and a method for its training, in which the procedure of fuzzy clustering of failure signs realization is applied. The procedure for decision rules correction is also considered, that will allow the creation of adaptive self-trained mechanisms for automated systems for detecting HSRT nodes and aggregates. It is proposed to use the modified information condition of functional effectiveness (ICFE) as an evaluation indicator of the training effectiveness of SADS. This condition is based on Kullback-Leibler information-distance criteria. There is considered the method of space fragmentation of failure signs realization of the HSRT nodes and aggregates into clusters during the implementation of the failure recognition procedure. Also there is considered the method of initial training of SADS. The method is an iterative procedure for finding the global maximum of ICFE. There were substantiated perspectives of decisions on the integrated evaluation of the detection results of the nodes and aggregates of the HSRT rolling stock based on the use in similar automated complexes for detecting models with fuzzy clustering algorithms of hundreds of the HSRT failure signs systems.

**Keywords:** non-destructive control methods, railway rolling stock, feature clustering, Kullback-Leibler criterion

**For citation:** A. Oralbekova, W. Wojcik. Methods and models of self-learning automated detection systems state of high-speed railway transport hubs//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 33–49. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.003>

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

**ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫ ПОЙЫЗ КӨЛІК ХАБТАРЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН ӨЗ-ӨЗІН ОҚЫТУ АВТОМАТТЫ ТАҢУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ӘДІСТЕРІ МЕН МОДЕЛДЕРІ**

*А. Оралбекова<sup>1\*</sup>, В. Войцик<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Халықаралық көлік және гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Люблин Политехникалық Университеті, Люблин, Польша.

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz

**Аяулым Оралбекова** — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті Алматы, Қазақстан

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

**Вальдемар Войцик** — PhD, Электрондық және ақпараттық технологиялар институтының директоры, Люблин Политехникалық Университеті, Люблин, Польша

E-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0002-0843-8053>.

© А. Оралбекова, В. Войцик

**Аннотация.** Мақалада сәтсіздік белгілерін кластерлеу негізінде жоғары жылдамдықты теміржол көлігі тораптары мен агрегаттарының (HSRT) өзін-өзі оқытатын автоматтандырылған анықтау жүйелерінің (SADS) әдістері мен модельдерін одан әрі дамытуға бағытталған зерттеу нәтижелері келтірілген. HSRT тораптары мен агрегаттарының sads-моделі және оны оқыту әдісі әзірленді, онда сәтсіздік белгілерін іске асырудың бұлыңғыр кластерлеу процедурасы қолданылады. Сондай-ақ, HSRT тораптары мен агрегаттарын анықтаудың автоматтандырылған жүйелері үшін адаптивті өзін-өзі оқыту механизмдерін құруға мүмкіндік беретін шешім қабылдау ережелерін түзету процедурасы қарастырылған. Sads оқыту тиімділігін бағалау көрсеткіші ретінде өзгертілген функционалдық тиімділік ақпараттық шартын (ICFE) пайдалану ұсынылады. Бұл шарт Құлбақ-жапсырманьың ақпараттық қашықтық критерийлеріне негізделген. Сәтсіздікті тану процедурасын жүзеге асыру кезінде HSRT түйіндері мен агрегаттарының сәтсіздік белгілерін кластерлерге енгізуді кеңістіктік бөлшектеу әдісі қарастырылады. Sads бастапқы дайындық әдісі де қарастырылады. Бұл әдіс icfe жаһандық максимумын табудың итеративті процедурасы болып табылады. Жүздеген hsrt істен шығу белгілері жүйелерінің анық емес кластерлеу алгоритмдері бар модельдерді анықтау үшін ұқсас автоматтандырылған кешендерде пайдалануға негізделген HSRT жылжымалы құрамының түйіндері мен агрегаттарын анықтау нәтижелерін кешенді бағалау шешімдерінің перспективалары негізделген.

**Түйін сөздер:** Бұзбайтын бақылау әдістері, теміржол жылжымалы құрамы, белгілерді кластерлеу, Құлбақ-Жапсырма критерийі

**Дәйексөздер үшін:** А. Оралбекова, В. Войцик. Жоғары жылдамды пойыз көлік хабтарының жағдайын өз-өзін оқыту автоматты тану жүйелерінің әдістері мен моделдері // Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 33–49 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.003>

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

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ САМОРАЗВИВАЮЩИХСЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*А. Оралбекова<sup>1\*</sup>, В. Войцик<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Международный университет транспорта и гуманитарных наук, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Люблинский политехнический университет, Люблин, Польша.

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz

**Аяулым Оралбекова** — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет т, Алматы, Казахстан

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

**Вальдемар Войцик** — PhD, директор Института электронных и информационных технологий, Люблинский политехнический университет, Люблин, Польша

E-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl, <https://orcid.org/0000-0002-0843-8053>.

© А. Оралбекова, В. Войцик

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований, направленных на дальнейшую разработку методов и моделей для самообучающихся автоматизированных систем обнаружения (SADS) узлов и агрегатов высокоскоростного железнодорожного транспорта (HSRT) на основе кластеризации признаков отказа. Разработана SADS-модель узлов и агрегатов HSRT и метод ее обучения, в котором применяется процедура нечеткой кластеризации реализации признаков отказа. Также рассмотрена процедура коррекции правил принятия решений, которая позволит создать адаптивные самообучающиеся механизмы для автоматизированных систем обнаружения узлов и агрегатов HSRT. Предлагается использовать модифицированное информационное условие функциональной эффективности (ICFE) в качестве показателя оценки эффективности обучения SADS. Это условие основано на критериях информационного расстояния Кульбака-Лейблера. Рассмотрен метод пространственной фрагментации реализации признаков отказа узлов HSRT и агрегатов в кластеры при реализации процедуры распознавания отказа. Также рассматривается методика начальной подготовки SADS. Метод представляет собой итеративную процедуру для нахождения глобального максимума ICFE. Обоснованы перспективы решений по комплексной оценке результатов обнаружения узлов и агрегатов подвижного состава HSRT, основанных на использовании в аналогичных автоматизированных комплексах для обнаружения моделей с алгоритмами нечеткой кластеризации сотен систем признаков отказов HSRT.

**Ключевые слова.** Методы неразрушающего контроля, железнодорожный подвижной состав, кластеризация признаков, критерий Кульбака-Лейблера.

**Для цитирования:** А. Оралбекова, В. Войцик. Методы и модели саморазвивающихся автоматизированных систем обнаружения состояния узлов высокоскоростного железнодорожного транспорта//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. №. 82. Стр. 33–49. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.003>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Introduction.

The modern development of the transport system requires the application of comprehensive methods of analysis and management aimed at improving efficiency and ensuring the safety and integrity of transport facilities. Given the increasing volume of transportation and the complexity of logistics chains, the need for a systemic approach becomes evident, as it allows transport facilities to be viewed as interrelated elements of a unified infrastructure (Orlovsky & Skvortsov, 2007: 134).

The choice of this research topic is determined by the growing importance of the transport sector for the economy and the need to reduce losses associated with damage and inefficiency in transport operations (Aspanova, 2025: 401–408). Despite a considerable amount of research in this area, many aspects of integrating systems analysis into ensuring the reliability and resilience of transport processes remain insufficiently studied (Kozlov, 2014: 46–50).

The relevance of this topic lies in the fact that the efficiency of transport systems directly affects national economic security, regional development, and the competitiveness of logistics

companies. However, existing management models often fail to account for the complex interaction between technical, organizational, and human factors (Kasymbekova et al., 2019: 99).

Object of the study – transport facilities and systems. Subject of the study – methods and tools of the systemic approach applied to improve the efficiency and safety of transport facilities. Purpose of the study – to develop and justify a systemic approach that ensures higher efficiency and integrity of transport facilities. Research objectives include:– analyzing existing approaches to the management of transport facilities;– identifying factors influencing their efficiency and safety;– developing an integrated model of systemic management.

The study employs methods of systems analysis, modeling, and comparative analysis to identify interconnections among transport system elements and to propose optimization strategies.

The research hypothesis assumes that the application of a systemic approach will significantly enhance the resilience of transport facilities to internal and external impacts and reduce losses during transportation.

The scientific significance of this study lies in forming a theoretical foundation and practical recommendations for implementing systems analysis in the management of transport structures.

### **Materials and methods.**

The above mentioned reasons make the topic of our research relevant.

As it was shown in (Papaelias et al., 2008: 367–384; Seeliger et al., 2002; Jin et al., 2009: 8–25) with the development of digital technologies the methods of technical non-destructive control and technical diagnostics of nodes and aggregates of the railway transport (including HSRT) have become very popular in the maintenance of high-tech equipment on transport. In recent years, there have been developed relevant regulatory documents, in particular, standards for the implementation of such control, and have been written numerous articles on this issue. However, with the development of digital technology, these researches need to be developed.

In works (Papaelias et al., 2008: 367–384; Seeliger et al., 2002; Jin et al., 2009: 8–25) there was carried out a review and analysis of most of the technical aspects of railway transport systems diagnostics, including using such methods as vibration, heat and acoustic non-destructive control (NDC). In works (Jin et al., 2009: 8–25; Mariani et al., 2011: 486–508) there was emphasized that NDC becomes an integral part of the technical maintenance of the railway transport RS. As with traditional approaches to the organization of technical diagnostics (TechD), the use of non-destructive control and diagnostics are aimed at ensuring the safety, functional reliability and efficiency of operation of the RS as a whole, as well as of individual nodes and aggregates. In addition, the use of RS NDC and TehD systems of the railway transport, and, in particular, HSRT, contributes to reducing the cost of its maintenance. As a result, losses are reduced as a result of failures or withdrawal of the railway transport RS. However, as the authors themselves (Jin et al., 2009: 8–25) note, these researches are still ongoing.

Many researches (Mariani et al., 2011: 486–508; Orbán & Gutermann, 2009: 2287–2298) in the segment of improving the reliability and dependability of HSRT systems are aimed at the creation and implementation of mobile diagnostics complexes for evaluation the state of both the HSRT rolling stock and technical infrastructure facilities. As shown in (Huang & Sun, 2013: 974–981; Siril et al., 2006: 10–20), the priority directions of researches remain the tasks of creating: systems for control and evaluation the geometrical parameters of railway for HSRT; non-contact visual detection of defects of railway for HSRT; non-contact visual detection of defects in HSRT rolling stock and others. For the technical implementation of NDC means many methods are currently used (Papaelias et al., 2008: 367–384; Jin et al., 2009: 8–25; Orbán & Gutermann, 2009: 2287–2298; Bhowmik et al., 2013: 1–18), for example, vibration, acoustic and heat of NDC nodes and aggregates.

All these methods give to the side conducting the diagnostics and detection of nodes and aggregates large amounts of very different information, which often may not be the same or may

be stored in different formats. And in this situation, it seems promising to use self-trained systems of automated or automatic diagnostics of nodes and aggregates based on machine learning.

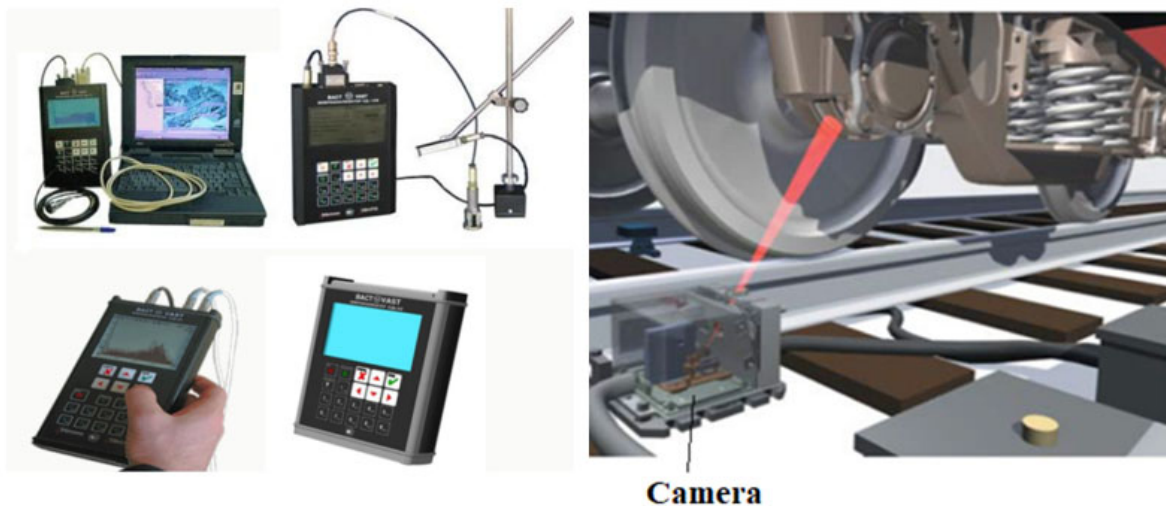
Even a preliminary review of researches in the field of automation of non-contact detection of the state of HSRT systems showed that there is an actual scientific problem in the development of mathematical methods and models for automation tools of non-contact detection of the HSRT systems state (Seeliger et al., 2002; Jin et al., 2009: 8–25; Mariani et al., 2011: 486–508; Huang & Sun, 2013: 974–981). In particular, a promising seems a solution based on the use in similar automated complexes for detecting models with fuzzy clustering algorithms of hundreds of the HSRT failure signs systems. Therefore, the task of selecting an evaluation indicator of the SADS learning effectiveness seems relevant.

The article solves the following problems:

1. To justify the need for the use of intelligent technologies in the tasks of non-destructive control and technical diagnostics of nodes and aggregates of railway transport rolling stock. Consider the possibilities of machine learning for the detection the HSRT state based on the clustering of failure signs realizations that can be detected by various non-destructive means of detection and diagnosis.

2. To develop a method for training the system for detecting HSRT nodes and aggregates using the procedure for fuzzy clustering of failure signs realizations and the possibility of decision rules correction, which will allow the creation of adaptive self-trained mechanisms for the diagnostics and detection of HSRT nodes and aggregates.

For diagnostics (detection) of anomalies in operation or malfunctions of railway transport nodes and aggregates there are used modern digital systems of non-destructive control (NDC), see fig. 1. However, the data of these systems are rather scattered. For their ordering, it is possible to apply cluster analysis methods, in particular, for training the system for detecting HSRT nodes and aggregates using the fuzzy clustering procedure of failure signs realizations and the possibility of decision rules correction. This will allow the creation of adaptive mechanisms of self-trained systems for diagnostics and detection of nodes and aggregates, for example, for HSRT.



a) small-sized devices for non-destructive vibration control and diagnostics of nodes and aggregates

b) Scheme of box node scanning by the infrared radiation receiver

Fig. 1. Remote non-destructive control systems used on the railway transport

Strict regulation of the technical maintenance and repair processes of the rolling stock (in the first place, diesel locomotives and electric locomotives) leads to the need to use methods of non-contact diagnostics and detection of many nodes and aggregates. This reduces the time to

perform such work. For example, in the depot, diagnosing nodes of diesel locomotives and electric locomotives there are actively applied methods of thermal (or thermal imaging) control.

### Results and discussion.

For these purposes there are used hand thermal imagers (for example, with uncooled matrix), which have high sensitivity. The result of thermal control will be thermograms. With the recognition of failures according to the results of ash non-contact diagnostics, you can get quite reliable information.

For example, the Figure shows the results of weak contact and overheating detection (Fig. 2) of one of the knife switch, of electrical locomotive nodes.

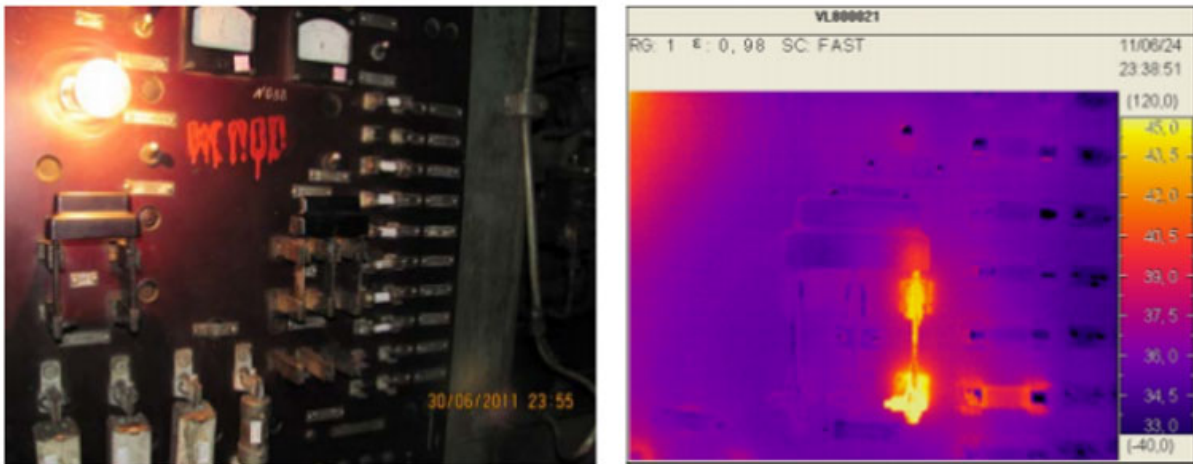


Fig. 2. Weak contact and overheating of the knife switch and the corresponding thermogram

During the automated failure analysis, the thermogram displays a so-called thermal wedge or a table of correspondence of brightness (or color) to a specific temperature on the surface of the diagnosed object. The fig. 3, for comparison, shows thermograms of bolted nodes connections of the locomotive crew parts for different tightening. During the analysis, there was found that at weakening of the tightening there are occurred vibrations. This, in turn, leads to a sharp increase of the connection temperature. a) normal bolt connection tightening b) weak bolt connection tightening. The Figure. 3. Thermograms of contact connection of VL80s electric locomotive tires.

We should note that the accuracy of the obtained data depends on the parameters of the object under research and on the conditions of its operation. We believe that the analysis of thermograms as well as in the previous examples can be carried out not only with the help of thermal imaging tools, but also on a computer using the developed automated analysis tools by failure and anomalies parameter in the operation of nodes and aggregates of locomotives.

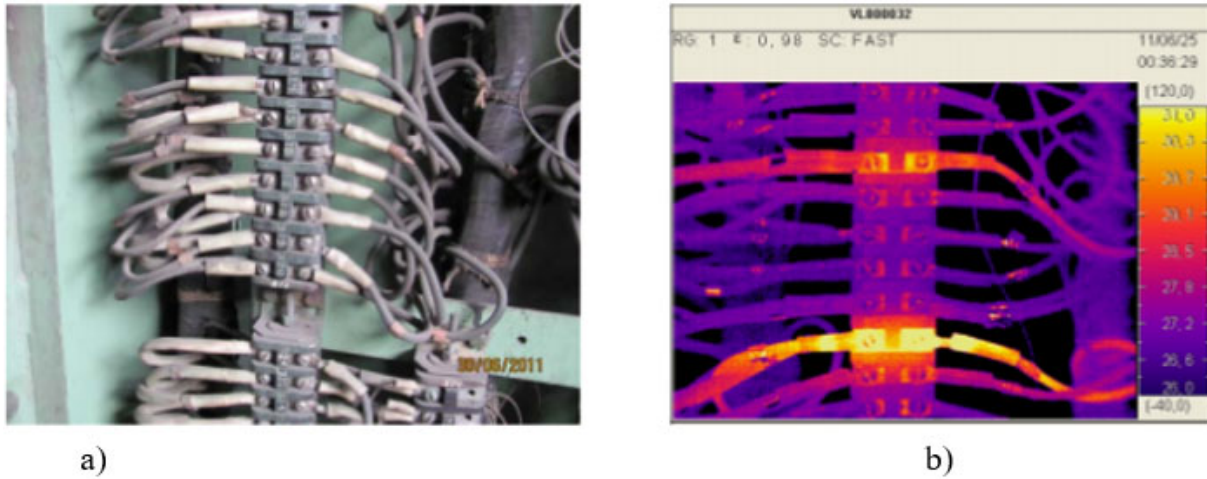


Fig. 3. Overheating of individual contacts due to the increased load current

The creation of a model of data mining during the process of identifying anomalies or failures in the operation of rolling stock is a part of a large-scale data processing process. The complexity of the implementation of the existing models of the systems for diagnostics and detection anomalies and failures of the rolling stock of a formalized recognition theory apparatus lies in the fact that a specific information complex for diagnostics often includes unique software and the corresponding information arrays. On the basis on preliminary conclusions obtained during the process of literature analysis, within the framework of the research there is considered an automated system based on the multi-stage detection of anomalies and failures of the rolling stock, see figure. 4.

Let consider the process of a priori fuzzy classified learning matrix formation in order to build decision rules in the process of initial SADS training. Let suppose that the a priori classified multidimensional learning matrix for SADS is known:

$$\|z_i^{(j)}\|, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, n} \quad (1)$$

where  $N, n$  – accordingly, the amount of anomalies detection signs (recognition in SADS) in operation or malfunctions of nodes and aggregates of railway transport.

Problem statement:

1) in the cluster analysis mode it is necessary to convert the input matrix of signs, which is used in the process of initial SADS training, into a classified one;

2) in the training mode it is necessary to build a clear division of the space of realizations of signs of anomalies or failures recognition of nodes and aggregates into classes  $\{R_c^0 | c = \overline{1, C}\}$  that respectively characterize the functional states of the controlled process of automatic detection of anomalies or failures by optimizing the coordinates of the vector of SADS functioning parameters:

$$h = \langle C, s, \delta, r_{c1}, r_{c2}, O_b, a_c \rangle, \quad (2)$$

where  $C$  – the amount of clusters or the alphabet capacity for anomalies or malfunctions recognition (detection) in the operation of nodes or aggregates of railway transport;

$S$  – a parameter that determines the signs of fuzziness of the algorithm (Dolezel et al., 2016: 1–6; Lakhno et al., 2016a: 32–44; Lakhno, 2016b: 18–25; Lakhno et al., 2016c: 5778–5786);

$\delta$  – tolerance fields on the detection signs realizations of anomalies or failures;

$r_{c1}, r_{c2}$  – binary vectors that determine the coordinates of the first and second focuses of containers for a class of anomalies or failures in the binary signs space;  $O_b$ ;

$a_c$  – the semi-axis of the container class in the space of  $O_b$  signs realizations.

Let introduce such restrictions:

$$\begin{cases} 2 \leq C \leq n/n_{\min}; n_c \geq n_{\min}; s > 1; \\ a_c > d_c; d_c \leq N/2; \\ a(r_{d1} \oplus r) + a(r_{d2} \oplus r) - d_d > 0, \\ \forall r \in \{r : a(r_{c1} \oplus r) + a(r_{c2} \oplus r) = 2a_c\}; \\ \delta \in [0, \delta_n/2], \end{cases} \quad (3)$$

where  $n_{\min}$  – the minimum sample size used to train the system for diagnostics and detection failures for each class of anomalies or failures (the sample must be representative);

$n_c$  – the amount of signs realizations within the class  $R_c^0$ ;

$d_c$  – distance to the center of the container within the boundaries of the class  $R_c^0$ ;

$a(r_{d1} \oplus r)$ ,  $a(r_{d2} \oplus r)$  – respectively, code distances from the first and second container focuses of the next class of anomalies or failures  $R_c^0$ ;

$r$  – vector-realization of the binary space, describing signs of anomalies or failures of nodes and aggregates  $O_b$ ;

$d_d$  – the distance to the center of the container within the class  $R_c^0$  in the space of signs realizations  $O_b$ ;  $a(r_{c1} \oplus r)$ ,  $a(r_{c2} \oplus r)$ - respectively, code distances from the first and second container classes  $R_c^0$ ;

$\delta_n$  – normalized tolerance field for the anomalies or failure signs.

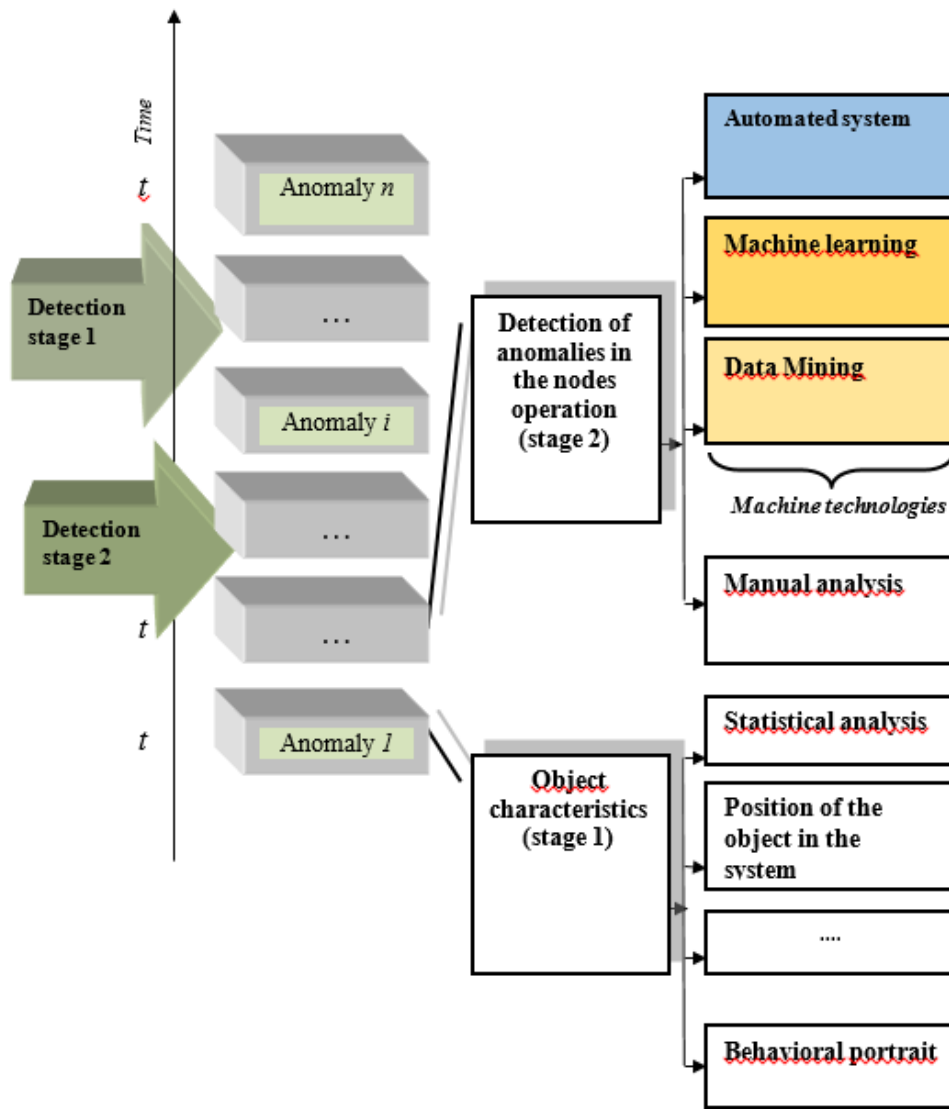


Fig. 4. The scheme of multi-stage detection of anomalies and failures in the operation of nodes and aggregates of the rolling stock

During the process of SADS training there are determined the coordinates of the term parameters vector (2) under the constraints (3). This, in turn, allows to ensure the maximum value of the informational condition of functional effectiveness (ICFE) averaged in alphabetical order for recognizing anomalies or failures in the operation of nodes and aggregates, respectively:

$$\bar{E}^* = (1/C) \cdot \sum_{c=1}^C \max_{\{w\}} E_c, \quad (4)$$

where  $E_c$  – value of ICFE for SADS of anomalies and failures of railway transport for class realizations –  $R_c^0$ ;

$\{w\}$  – many steps for SADS training.

In the SADS test mode, there is decided whether the realization signs of standard images, which characterize the current functional state of a node or aggregate, belong to the corresponding class. That is, at this stage there is performed a defuzzification of the fuzzy data according to the signs realizations –  $\{R_c^0 | c = \overline{1, C}\}$ .

Initialization of non-clustered input data on the anomalies signs in operation or failures of nodes and aggregates of railway transport, including HSRT, is defined as a (vector) matrix:

$$\{z_i^{(j)}, | i = \overline{1, N}, j = \overline{1, n}\} \quad (5)$$

At the next stage of the algorithm there are generated matrices for observations fragmentation about anomalies signs in operation or failures of nodes and aggregates:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{c1} & v_{c2} & \dots & v_{cn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

under condition

$$v_{cj} \in \{0,1\}; \sum_{c=1}^C v_{cj} = 1; 0 < \sum_{j=1}^n v_{cj} < n,$$

where  $v_{cj}$  – degree of belonging of  $j$  observation object to the cluster –  $c$ .

The centers of clusters of anomalies and failures signs are calculated using the following formula (this condition is based on the Kullback-Leibler information-distance criterion):

$$z_c = \frac{\sum_{j=1}^n (v_{cj}^{(l-1)})^s \cdot z^{(j)}}{\sum_{j=1}^n (v_{cj}^{(l-1)})^s}, \quad (7)$$

where  $l$  – iteration amount count.

As a result of the algorithm operation there is minimized the following objective function:

$$J = \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^n v_{cj}^s \cdot a_{K^{(c)}}^2(z^{(j)}, z_c), \quad (8)$$

where

$$K^{(c)} = \frac{\sum_{j=1}^n (v_{cj}^{(l-1)})^s \cdot (z^{(j)} - z_c)^T \cdot (z^{(j)} - z_c)}{\sum_{j=1}^n (v_{cj}^{(l-1)})^s} \quad \text{– covariance for the cluster – } c;$$

$T$  – set of moments of time withdrawing information about the NDC means.

If necessary, the elements of the fuzzy fragmentation of the dictionary of anomalies and failures signs, used for SADS training, are recalculated. The calculation is performed using the following formula:

$$v_{ej}^{(l)} = 1 / \left[ \sum_{w=1}^C \left( \frac{a_{K^{(e)}}^2(z^{(j)}, z_w)}{a_{K^{(e)}}^2(z^{(j)}, z_c)} \right)^{\frac{1}{w-1}} \right] \tag{9}$$

Then the normalized entropy value of the index of the informational component of the self-trained automated system for detection anomalies and failures of nodes and aggregates of the locomotives, based on the failure signs clustering, can be represented as follows:

$$CE_m^{(ls)} = 1 + 0,5 \cdot \left( \frac{mis1_m^{(ls)}(cr)}{mis1_m^{(ls)}(cr) + AU_{2,m}^{(ls)}(cr)} \log_2 \frac{mis1_m^{(ls)}(cr)}{mis1_m^{(ls)}(cr) + AU_{2,m}^{(ls)}(cr)} + \frac{mis2_m^{(ls)}(cr)}{AU_{1,m}^{(ls)}(cr) + mis2_m^{(ls)}(cr)} \log_2 \frac{mis2_m^{(ls)}(cr)}{AU_{1,m}^{(ls)}(cr) + mis2_m^{(ls)}(cr)} + \frac{AU_{1,m}(cr)}{AU_{1,m}^{(ls)}(cr) + mis2_m^{(ls)}(cr)} \log_2 \frac{AU_{1,m}(cr)}{AU_{1,m}^{(ls)}(cr) + mis2_m^{(ls)}(cr)} + \frac{AU_{2,m}^{(ls)}(cr)}{mis1_m^{(ls)}(cr) + AU_{2,m}^{(ls)}(cr)} \log_2 \frac{AU_{2,m}^{(ls)}(cr)}{mis1_m^{(ls)}(cr) + AU_{2,m}^{(ls)}(cr)} \right) \tag{10}$$

where  $AU_{1,m}^{(ls)}(cr)$  – first validation procedure;

$AU_{2,m}^{(ls)}(cr)$  – second validation procedure;

$mis1_m^{(ls)}(cr)$  – errors of the first type confirming a failure decision for  $ls$  learning step for the system of detection failures of nodes and aggregates;

$mis2_m^{(ls)}(cr)$  – errors of the second type;

$cr$  – radius of the containers of the detection system learning classes (Lakhno, 2016b: 18–25; Lakhno et al., 2016c: 5778–5786; Campbell et al., 2008: 1595–1602).

Verification of the model effectiveness was carried out in the MATLAB simulation environment. A preliminary model check was carried out for two classes of common failures in railway transport systems, including HSRT – "gearbox failures", "failures in the brake system." The corresponding tables 1 and 2 with failure signs of simulated systems are shown below.

Table 1 – Fragment of the table of the dictionary of anomalies and failures signs of the gearbox for means of non-destructive control and for use of vibration signal tracking methods

№	Type of failure / anomaly in operation	Sign for SADS dictionary
1	Vibrations	Vibration time signal on the gear pairs
2	Cracks	Temporary vibration signal form
3	Tines chipping	Vibration Spectra
4	Others	Vibration signal envelope spectrum, modal analysis

Table 2 – Fragment of the table of the dictionary of anomalies and failures signs in the brake system of a diesel locomotive for non-destructive control means

№	Type of failure / anomaly in operation	Sign for SADS dictionary
1	Extraneous noise in the compressor	Extraneous noise in the compressor
2	Excessive / insufficient line pressure	Excessive / insufficient line pressure
3	The swap process stops quickly	Temporary vibration signal form
4	Others	Vibration signal envelope spectrum, modal analysis, acoustic analysis

The diagrams in MATLAB for simulation are shown in Figures 5 and 6.

After the formation of binary matrices that are used as objects in the process of learning of the automated system for diagnostics (detection) anomalies and failures in the operation of nodes and aggregates of the rolling stock, there are created binary trees of anomalies or failures signs clustering, see fig. 7, 8.

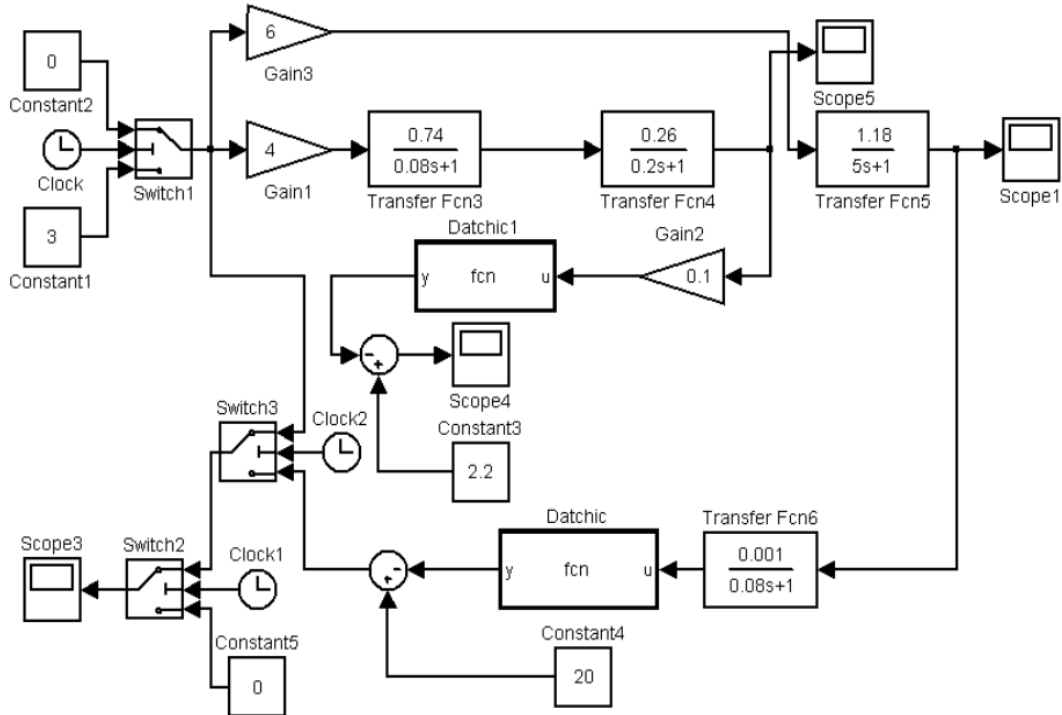


Fig. 5. A simulation model for studying the effectiveness of the dictionary of anomalies and failures signs of the gearbox using the NDC methods and with the application of SADS

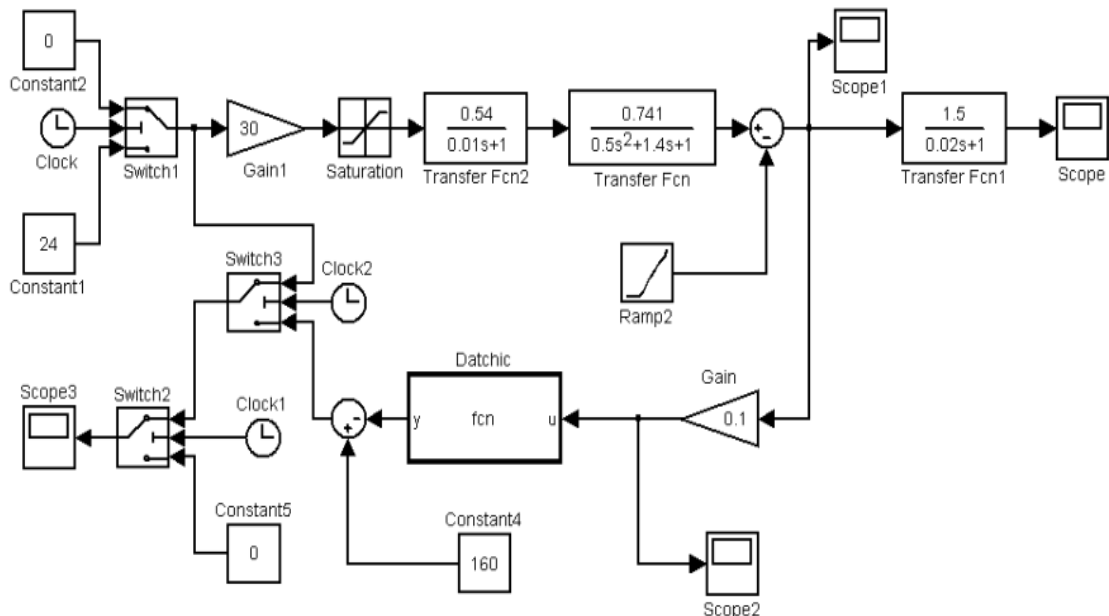


Fig. 6. A simulation model for studying the effectiveness of the dictionary of anomalies and failures signs of the brake system using the NDC methods and with the application of SADS

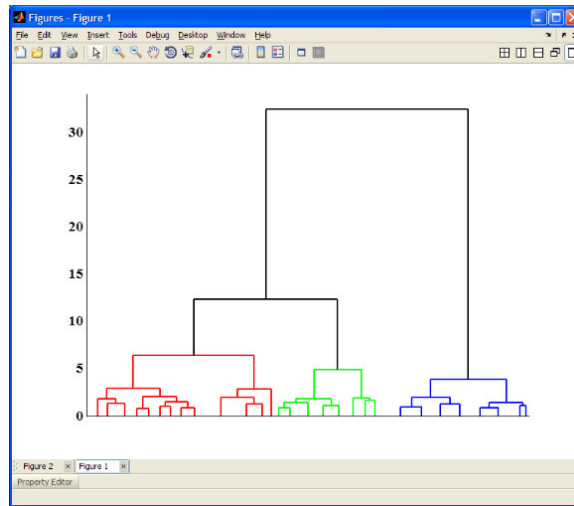


Fig.7. Normal behavior of the detected nodes and aggregates of the railway transport rolling stock

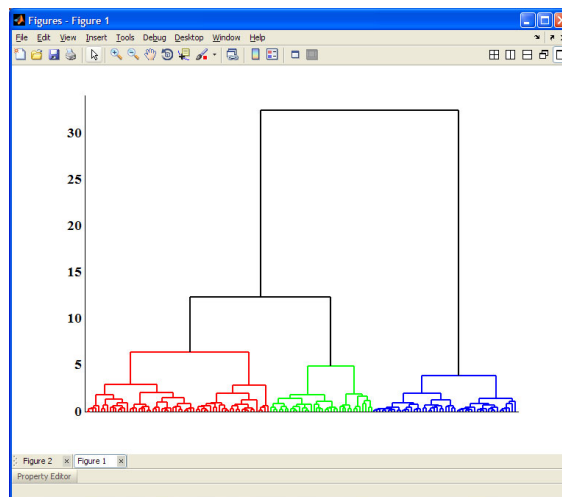


Fig.8. Anomalies or failures signs clustering of the detected nodes and aggregates of the railway transport rolling stock

In this case, the amount of recognition signs varied within  $N=9-15$ . The optimal amount of clusters was selected at the maximum values of ICFE. As the analysis of the results showed the optimal amount of clusters is equal to  $C=3$ .

Figure 4 shows a histogram of the dependence of the ICFE value for variants of the dictionaries of the anomalies and failures signs of nodes and aggregates from the amount of steps of the SADS learning algorithm  $\{w\}$ , and the Fig. 5 shows the dependence of ICFE from the amount of signs used to train the system for failure diagnostics and detection.

Analysis of simulation results showed that the use of an algorithm with 5–10 signs of learning is quite effective in SADS. That is, for this case, the ICFE reaches its maximum value. This, in turn, indicates the possibility of creation error-free decision rules in failure diagnostics and detection.

In the SADS testing mode a sufficient amount of steps  $\{w\}$  for accurately determination of anomalies and failures classes were  $w=2500-3000$ .

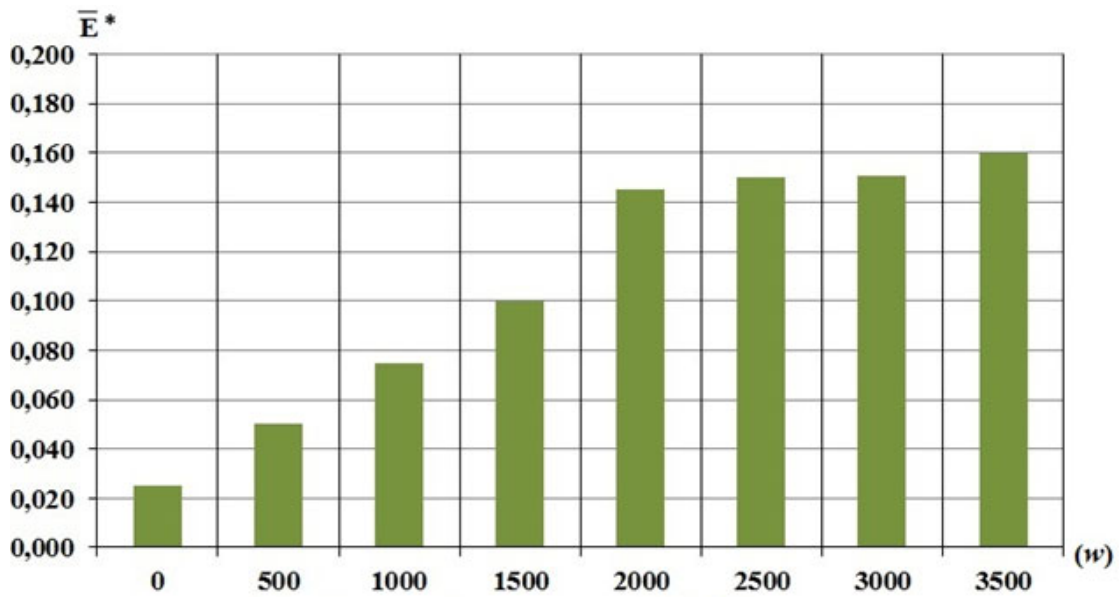


Fig. 9. Dependence of the **max** ICFE value for variants of the dictionary of anomalies and failures signs of nodes and aggregates of the simulated railways transport systems

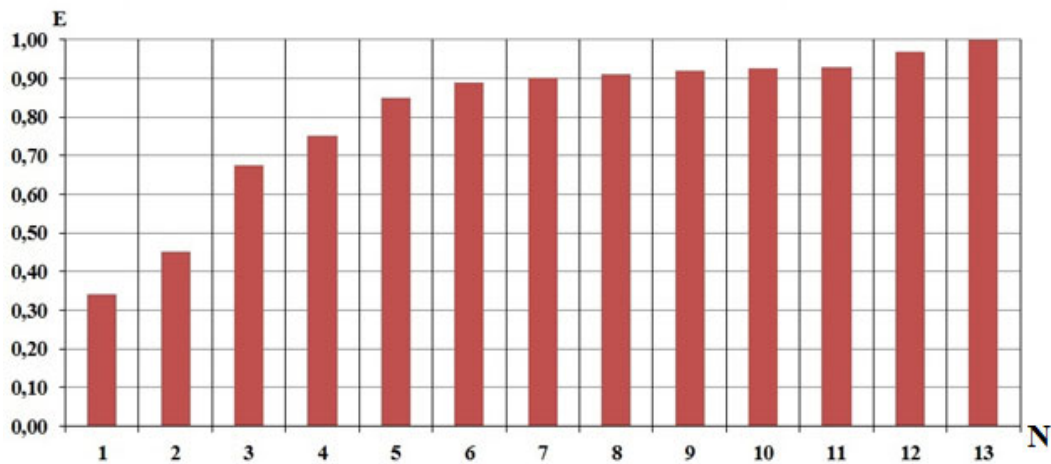


Fig. 10. Diagram of the dependence of ICFE from the amount of signs realizations used for SADS

In the situations when during the simulation process and at the creation of an algorithm for recognizing anomalies and failures of nodes and aggregates of railway transport there were added representative sets of greater length, the efficiency of the algorithm was the same. Adding representative sets of shorter length reduced the efficiency of the algorithm.

The developed model and algorithm for SADS, in our opinion, not only constitute an independent practical interest, but are an example of a new approach for the creation adaptive NDC systems for diagnostics and detection nodes and aggregates of railway transport, including HSRT.

In particular, compared with the results presented in (Papaelias et al., 2008: 367–384; Seeliger et al., 2002; Lakhno, 2016b: 18–25; Lakhno et al., 2016c: 5778–5786), our approach provides a significantly smaller amount of necessary primary signs for the classification of nodes and aggregates. In this case, it is possible to process data obtained from different means of NDC, for example, vibration, heat, sound, etc. This reduces the time spent on self-training of the automated diagnostics and detection system. In our model and in the corresponding algorithms, it is possible to determine automatically the sizes of the training and test matrices of the failures and anomalies signs realizations for nodes and aggregates. This minimizes the participation of service

personnel at the stage of identifying the primary signs of failures, which, for example, previously could be detected using manual analysis of the NDC means.

Approbation of the model was implemented only for two classes of failures or anomalies in the operation of nodes and aggregates of the railway transport. This is a definite disadvantage of our research at its current stage. For more complex types of failures and anomalies, obviously, there will be required an increase in the amount of signs realizations, as well as steps of the algorithm, for self-training of an automated diagnostic and detection system that receives data from various means of NDC, which, in turn, will increase the level of requirements for computing resources.

Prospects for further research are to improve the knowledge base for failures and anomalies in the operation of nodes and aggregates, as well as to explore the proposed solutions on a wider class of diagnostic problems for the railway transport.

Now our research is carried out in the following directions: during machine learning it is necessary: 1) to optimize the vector parameters  $q_h$ ; 2) to determine the criterion of the effectiveness of the system for automated detection of the HSRT systems state; 3) during the process of machine learning to form decision rules for the detection of failures, in particular by optimizing the parameters of the containers of recognition classes.

We believe that the planned researches will improve the reliability of the results of the procedures for the automatic evaluation of failures and defects of the HSRT system components and, accordingly, the degree of reliability of the decisions regarding the organization of technical maintenance and current repair.

The article analyzes the previous researches in the field of non-destructive control and technical diagnostics of nodes and aggregates of railway transport rolling stock. There was substantiated the necessity of using intelligent technologies in the tasks of non-destructive control and technical diagnostics of nodes and aggregates of railway transport rolling stock.

There was considered the possibility of machine learning of the HSRT state detection system based on the clustering of the failure signs realizations that can be detected by various means of detection and diagnostics.

It was shown that the use of NDC and diagnostics methods separately from each other is not always advisable. Simultaneous diagnostics and detection simultaneously by several methods uniquely gives a more complete picture of the object of study. There was substantiated the perspectives of decisions on the complex results evaluation of the detection of nodes and aggregates of the HSRT rolling stock based on the use of models with algorithms of fuzzy clustering of hundreds of failure signs of the HSRT systems.

### **Conclusion.**

This study aimed to address the critical need for advanced methods of diagnostics and monitoring in high-speed railway transport (HSRT) systems through the development of self-trained automated detection systems (SADS). The research focused on integrating intelligent technologies and machine learning techniques into non-destructive control (NDC) processes for the detection of anomalies and failures in nodes and aggregates of railway rolling stock. The proposed SADS model utilizes fuzzy clustering of failure signs and iterative training procedures, enabling adaptive and self-learning mechanisms capable of improving the functional reliability of HSRT components.

The results demonstrated that applying fuzzy clustering for the classification of failure signs allows for effective recognition of both common and complex anomalies in railway transport nodes and aggregates. The proposed method of decision rule correction within the SADS framework ensures that the system can continuously improve its diagnostic accuracy, minimizing human intervention and reducing the time required for the detection and evaluation of failures. The study also introduced the modified Information Condition of Functional Effectiveness (ICFE), based on the Kullback-Leibler information-distance criterion, as a reliable metric for assessing the efficiency of the system's learning and performance. Simulation experiments in MATLAB showed

---

that the SADS model could accurately detect anomalies and failures using a relatively small number of failure signs, confirming the effectiveness of the proposed approach for practical implementation.

The findings highlight several important aspects. First, the integration of multiple NDC methods—vibration, thermal, and acoustic analyses—within a unified automated system provides a more complete and accurate understanding of the technical condition of HSRT nodes and aggregates. Second, the use of adaptive self-trained algorithms reduces dependency on manual analysis and allows for rapid processing of large and heterogeneous data sets generated by modern diagnostic systems. Third, the methodology provides a framework for systematic evaluation of equipment condition, contributing to predictive maintenance strategies that can minimize operational disruptions, reduce maintenance costs, and enhance the overall safety of high-speed railway transport.

From a theoretical perspective, the study contributes to the development of a systematic approach for combining machine learning, fuzzy clustering, and NDC techniques in the railway transport domain. The research confirms the hypothesis that the application of a systemic, adaptive approach improves both the resilience and operational efficiency of transport systems. The proposed model also establishes a basis for further research in expanding the diagnostic capabilities of automated systems to a wider range of HSRT failures and anomalies, optimizing learning parameters, and integrating additional intelligent tools, such as neural networks and hybrid algorithms.

Practically, the study provides railway operators, engineers, and transport managers with methodological guidelines for implementing adaptive SADS in existing maintenance routines. The approach not only increases the reliability and safety of railway operations but also supports the development of predictive maintenance plans and reduces downtime caused by unexpected failures. Moreover, the framework can be extended to other areas of transport infrastructure requiring continuous monitoring and diagnostics, offering significant potential for technological advancement and economic efficiency.

In conclusion, the research demonstrates that intelligent, self-trained automated systems for detecting anomalies and failures in HSRT nodes and aggregates represent a promising and effective tool for improving both the efficiency and safety of railway transport operations. The study lays a solid foundation for future investigations, including the refinement of algorithms, expansion of diagnostic data sets, and application of the developed methods to more complex systems, ensuring long-term improvement in the operational reliability and sustainability of high-speed railway networks.

#### REFERENCES

- Schickert, 2005 — Schickert M. Progress in ultrasonic imaging of concrete. *Materials and Structures*, 38(9), 807–815. — 2005. [Eng.]
- Hasanzadeh et al., 2007 — Reza Hasanzadeh P.R., et al. A density-based fuzzy clustering technique for non-destructive detection of defects in materials. *Ndt & E International*, 40(4), 337–346. — 2007. [Eng.]
- Papaelias et al., 2008 — Ph Papaelias M., Roberts C., Davis C.L. A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 222(4), 367–384. — 2008. [Eng.]
- Seeliger et al., 2002 — Seeliger A., Mackel J., Georges D. Measurement and diagnosis of process-disturbing oscillations in high-speed rolling plants. In *Proc. XIV IMEKO World Congress*. — 2002. [Eng.]
- Jin et al., 2009 — Jin X.S., Guo J., Xiao X.B., Wen Z.F., Zhou Z.R. Key scientific problems in the study on running safety of high-speed trains. *Engineering Mechanics*, 26(Sup II), 8–25. — 2009. [Eng.]
- Mariani et al., 2011 — Mariani L., Pastore F., Pezze M. Dynamic analysis for diagnosing integration faults. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 37(4), 486–508. — 2011. [Eng.]
- Huang & Sun, 2013 — Huang Y.C., Sun H.C. Dissolved gas analysis of mineral oil for power transformer fault diagnosis using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(3), 974–981. — 2013. [Eng.]
- Orbán & Gutermann, 2009 — Orbán Z., Gutermann M. Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures*, 31(10), 2287–2298. — 2009. [Eng.]
- Siril et al., 2006 — Yella Siril, M.S. Dougherty, N.K. Gupta. Artificial intelligence techniques for the automatic interpretation of data from non-destructive testing. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 48(1), 10–20. — 2006. [Eng.]



- Bhowmik et al., 2013 — Bhowmik P.S., Pradhan S., Prakash M. Fault-diagnostic and monitoring methods of induction motor: a review. *International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics*, 1, 1–18. — 2013. [Eng.]
- Dolezel et al., 2016 — Dolezel P., Skrabanek P., Gago L. Pattern recognition neural network as a tool for pest birds detection. *Computational Intelligence (SSCIIEEE Symposium Series on)*, 1–6. — 2016. [Eng.]
- Lakhno et al., 2016a — Lakhno V., Tkach Y., Petrenko T., Zaitsev S., Bazylevych V. Development of adaptive expert system of information security using a procedure of clustering the attributes of anomalies and cyber attacks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9), 32–44. — 2016. [Eng.]
- Lakhno, 2016b — Lakhno V. Creation of the adaptive cyber threat detection system on the basis of fuzzy feature clustering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9), 18–25. — 2016. [Eng.]
- Lakhno et al., 2016c — Lakhno V.A., Kravchuk P.U., Malyukov V.P., Domrachev V.N., Myrutenko L.V., Piven O.S. Developing of the cyber security system based on clustering and formation of control deviation signs. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 95(21), 5778–5786. — 2016. [Eng.]
- Pisano & Shih, 2009 — Pisano G.P., Shih W.C. Restoring American competitiveness. *Harvard Business Review*, 87(7/8), 114–125. — 2009. [Eng.]
- Kim et al., 2010 — Kim H.K., Kuk S., Kim M., Jung H.Y. An effective method of head lamp and tail lamp recognition for night time vehicle detection. In *Proceedings of the International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering (ICCESSE)*, Hong Kong, Vol. 2830, p. 5457. — 2010. [Eng.]
- Colby & McGuire, 1981 — Colby K.M., McGuire M.T. Signs and symptoms. *The Sciences*, 21(9), 21–23. — 1981. [Eng.]
- Campbell et al., 2008 — Campbell R., Starkey F., Holliday J., Audrey S., Bloor M., Parry-Langdon N., ... Moore L. An informal school-based peer-led intervention for smoking prevention in adolescence (ASSIST): a cluster randomised trial. *The Lancet*, 371(9624), 1595–1602. — 2008. [Eng.]
- Jurie & Triggs, 2005 — Jurie F., Triggs B. Creating efficient codebooks for visual recognition. In *Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on*, Vol. 1, 604–610. — 2005. [Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 50–59  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.004>  
УДК 681.5

## IMPROVEMENT OF AUTOMATION SYSTEMS FOR DESIGNING DEVICE ASSEMBLIES IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION

*U. Umbetov\*, D. Isaikin*

International transport-humanitarian University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz](mailto:isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz)

**Umirbek Umbetov** — d.t.s., professor, Kazakh-Turkish International University named after Ahmet Yassawi's skin

E-mail: [uumbetov@mail.ru](mailto:uumbetov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>;

**Dmitry Isaikin** — m.t.s., Senior Lecturer, International transport-humanitarian University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz](mailto:isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0009-8420-6383>.

© U. Umbetov, D. Isaikin

**Abstract.** This article explores the importance of integrated software platforms in the automation of industrial processes. In the context of rapid digitalization and technological modernization, the implementation of automated control systems has become essential for modern enterprises. The aim of this research is to analyze the capabilities of the Trace Mode 6 software platform for optimizing engineering design and management processes, as well as to demonstrate its application in education. The study objectives included analyzing the structure of the software system, defining the principles of mathematical modeling using FBD-block diagrams, and evaluating the efficiency of its implementation in industrial control systems. The research draws on both domestic and international sources, complemented by real-world project examples. The results demonstrate that the Trace Mode 6 platform provides high efficiency in designing and monitoring technological processes. It supports five modern programming standards (SFC, LD, FBD, ST, IL), allowing automation at all levels of production systems. The “Navigator” module offers students a flexible and intuitive environment for engineering projects and practical training. In conclusion, the integrated Trace Mode 6 software serves as a key tool for accelerating the digital transformation of engineering education and industrial processes. It not only enhances production efficiency but also develops students’ practical and technical competencies.

**Keywords:** automation, Trace Mode 6, engineering design, integrated program, control system, production, technological process

**For citation:** U. Umbetov, D. Isaikin. Improvement of automation systems for designing device assemblies in machine-building production//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 50–59. (In Kaz.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.004>

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

## МАШИНА ЖАСАУ ӨНДІРІСІНДЕГІ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫҢ ТОРАПТАРЫН ЖОБАЛАУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ЖЕТІЛДІРУДІ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ

*У. Умбетов<sup>1</sup>, Д. Исайкин<sup>2\*</sup>*

<sup>1</sup>Қожа Ахмет Ясауи ат. қазақ-түрік халықаралық университеті, Түркістан, Қазақстан;

<sup>2</sup>Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.  
E-mail: isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz

**Умирбек Умбетов** — т.ғ.д., профессор, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті

E-mail: uumbetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>;

**Дмитрий Исайкин** — т.ғ.м., аға оқытушы, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-8420-6383>.

© У. Умбетов, Д. Исайкин

**Аннотация.** Бұл мақалада өндірістік процестерді автоматтандыруда интеграцияланған бағдарламалық платформаларды пайдаланудың маңызы қарастырылады. Қазіргі таңда цифрландыру мен технологиялық жаңғыртудың дамуы өндірістік кәсіпорындар үшін автоматтандырылған басқару жүйелерін енгізуді қажет етеді. Зерттеудің мақсаты – инженерлік жобалау мен басқару процестерін оңтайландыруда Trace Mode 6 бағдарламалық платформасының мүмкіндіктерін талдау және оның білім беру процесіндегі қолданылуын көрсету. Зерттеу міндеттері ретінде бағдарламалық жүйенің құрылымын талдау, FBD блоктық диаграммалары арқылы математикалық модельдеу принциптерін анықтау және өндірістік басқару жүйелерінде оның тиімділігін бағалау қарастырылды. Зерттеу барысында отандық және шетелдік авторлардың еңбектері, сондай-ақ практикалық жобалар мен өндірістік мысалдар қолданылды. Нәтижелер көрсеткендей, Trace Mode 6 бағдарламалық платформасы технологиялық процестерді жобалау мен бақылауда жоғары тиімділікке ие. Ол бес бағдарламалау стандартына (SFC, LD, FBD, ST, IL) негізделіп, өндіріс жүйелерінің барлық деңгейінде автоматтандыруды жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Бағдарламаның “Навигатор” модулі білім алушыларға инженерлік жобаларды орындауда икемді тәсіл ұсынады және практикалық сабақтарда қолдануға мүмкіндік береді. Қорытындылай келе, Trace Mode 6 интеграцияланған бағдарламалық қамтамасыз ету инженерлік білім беру мен өндірістік процестердің цифрлық трансформациясын жеделдететін маңызды құрал болып табылады. Ол өндірістік жүйелердің тиімділігін арттырумен қатар, студенттердің тәжірибелік дағдыларын дамытуға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** автоматтандыру, Trace Mode 6, инженерлік жобалау, интеграцияланған бағдарлама, басқару жүйесі, өндіріс, технологиялық процесс

**Дәйексөздер үшін:** У. Умбетов, Д. Исайкин. Машина жасау өндірісіндегі құрылғылардың тораптарын жобалауды автоматтандыру жүйелерін жетілдіруді жүзеге асыру//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 50–59 бет. (Қаз. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.004>

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

## ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ УСТРОЙСТВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*У. Умбетов<sup>1</sup>, Д. Исайкин<sup>2\*</sup>*

<sup>1</sup>Казахско-турецкий международный университет им. Кожы Ахмет Ясауи;

<sup>2</sup>Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz



**Умирбек Умбетов** — д.т.н., профессор, Казахско-турецкий международный университет им. Кожа Ахмет Ясауи

E-mail: uumbetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>;

**Дмитрий Исайкин** — м.т.н., ст. преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: isaykin.dmitriy@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-8420-6383>.

© У. Умбетов, Д. Исайкин

**Аннотация.** В статье рассматривается значение интегрированных программных платформ в автоматизации производственных процессов. Современная цифровизация и технологическая модернизация требуют внедрения автоматизированных систем управления на промышленных предприятиях. Цель исследования – проанализировать возможности программной платформы Trace Mode 6 для оптимизации инженерного проектирования и управления, а также показать её применение в образовательной практике. В задачи исследования входили: анализ структуры программной системы, определение принципов математического моделирования с помощью FBD-блоков и оценка эффективности использования платформы в производственных условиях. В работе использованы отечественные и зарубежные научные источники, а также примеры из практических проектов. Результаты показали, что программная платформа Trace Mode 6 отличается высокой эффективностью при проектировании и контроле технологических процессов. Она поддерживает пять стандартов программирования (SFC, LD, FBD, ST, IL), что позволяет осуществлять автоматизацию на всех уровнях производственных систем. Модуль “Навигатор” делает платформу удобной для студентов инженерных направлений и способствует формированию профессиональных навыков. В заключение отмечается, что интегрированное программное обеспечение Trace Mode 6 является важным инструментом цифровой трансформации инженерного образования и промышленности, повышая эффективность производственных процессов и качество подготовки специалистов.

**Ключевые слова:** Автоматизация, Trace Mode 6, инженерное проектирование, интегрированная программа, система управления, производство, технологический процесс

**Для цитирования:** У. Умбетов, Д. Исайкин. Осуществление совершенствования систем автоматизации проектирования узлов устройств машиностроительного производства//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 82. Стр. 50–59. (На каз.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.004>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Кіріспе.

Қазіргі заманғы машина жасау саласы жоғары технологиялық күрделілікпен сипатталады және өндірістік процестердің барлық кезеңінде озық компьютерлік технологияларды енгізуді талап етеді (Асқарова, 2024: 15–17). Елдің индустриялық кезеңіндегі ғылыми зерттеулер мен технологиялық прогрестің қалыптасуы кеңестік кезеңмен тығыз байланысты (Аркешев, 2014: 109–122). Машиналардың түйіндері мен бөлшектерін жобалауды автоматтандыру өндірістің тиімділігін арттырудың, жобалау уақытын қысқартудың және жоғары дәлдікті өнімдерді өндіруге кететін шығындарды төмендетудің негізгі факторы болып табылады (Morokina, Umbetov, Mailybayev, 2020).

Тақырыпты таңдау негіздемесі. Соңғы жылдары CAD/CAE жүйелерін және автоматтандырылған жобалау интеграцияланған платформаларын енгізуге қызығушылық қарқынды өсуде. MSC Software, Adams, SimDesigner және Simufact additive сияқты шетелдік шешімдер көп болса да, отандық өндіріс саласында осы құралдарды толыққанды өндірістік процеске енгізу мәселелері шешілмей қалып отыр (Khasanova, Khasanov, 2019). Бағдарламалық шешімдерді стандарттаудың жеткіліксіздігі, интеграцияланған жүйелерді

кешенді қолданудың шектеулі тәжірибесі және енгізу шығындарының жоғары болуы зерттеуді қажет ететін проблемалық жағдай туғызады.

Тақырыптың өзектілігі. Бұл зерттеудің өзектілігі отандық машина жасау кәсіпорындарының бәсекеге қабілеттілігін арттыру мақсатында заманауи цифрлық технологияларды енгізу қажеттілігімен анықталады. Автоматтандырылған жобалау және талдау саласына арналған көптеген зерттеулер бар болса да, әртүрлі CAD/CAE жүйелерін интеграциялау мен бүкіл өндіріс процесіне қолдану бойынша кешенді зерттеулер өте аз (Morokina, Sergeev, Porozov, 2010; Umbetov, Morokina, 2020). Бұл мәселені шешу өндіріс шығындарын азайтып қана қоймай, жобаланған бөлшектер мен түйіндердің дәлдігі мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу объектісі — машина жасау өндірісінде түйіндер мен бөлшектерді жобалау және автоматтандыру процестері. Зерттеу пәні — машина жасау саласында автоматтандырылған жобалауға арналған бағдарламалық және аппараттық құралдар, сондай-ақ әртүрлі CAD/CAE жүйелерін интеграциялау әдістері.

Зерттеудің мақсаты — машина түйіндерін автоматтандырылған жобалау жүйелерін жетілдіруге бағытталған әдістемелік және практикалық тәсілдерді әзірлеу, бағдарламалық өнімдер арасындағы өзара әрекетті тиімді ұйымдастыру және оларды өндірістік процессқа интеграциялау мүмкіндігін қамтамасыз ету.

Зерттеу міндеттері:

- Машина түйіндері мен бөлшектерін автоматтандырылған жобалау әдістері мен жүйелерін талдау;

- Әртүрлі бағдарламалық құралдарды интеграциялаудағы проблемалар мен шектеулерді анықтау;

- Жобалау дәлдігін арттыру үшін мультифизикалық модельдеуді қолдану әдістемесін әзірлеу;

- Trace Mode бағдарламалық платформасы мен басқа интеграцияланған CAD/CAE шешімдерін қолдану мүмкіндіктерін зерттеу;

- Ұсынылған шешімдерді машина жасау кәсіпорындарына енгізу бойынша ұсыныстар жасау.

Зерттеу әдістері — бағдарламалық өнімдерді салыстырмалы талдау, технологиялық процестерді модельдеу және оңтайландыру, мультифизикалық модельдеу, FBD-блоктары мен PLC-программалауды қолдану, интеграцияланған шешімдердің тиімділігін практикалық мысалдар арқылы бағалау (Khasanov, Akhmetov, 2021; Zhussupov, Mailybayev, 2019).

Зерттеу гипотезасы — заманауи CAD/CAE жүйелерін интеграцияланған автоматтандырылған жобалау платформасында біріктіру машина түйіндерін жобалаудың сапасын едәуір арттырады, жобалау уақытын қысқартады және жаңа технологияларды енгізуге кететін қаржылық шығындарды азайтады.

Ғылыми және практикалық мәні — алынған нәтижелерді инженерлік мамандық студенттерін оқыту процесінде қолдануға, сондай-ақ нақты машина жасау өндірісінде жоғары дәлдікті бөлшектер мен түйіндерді жобалау мен өндіріс тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

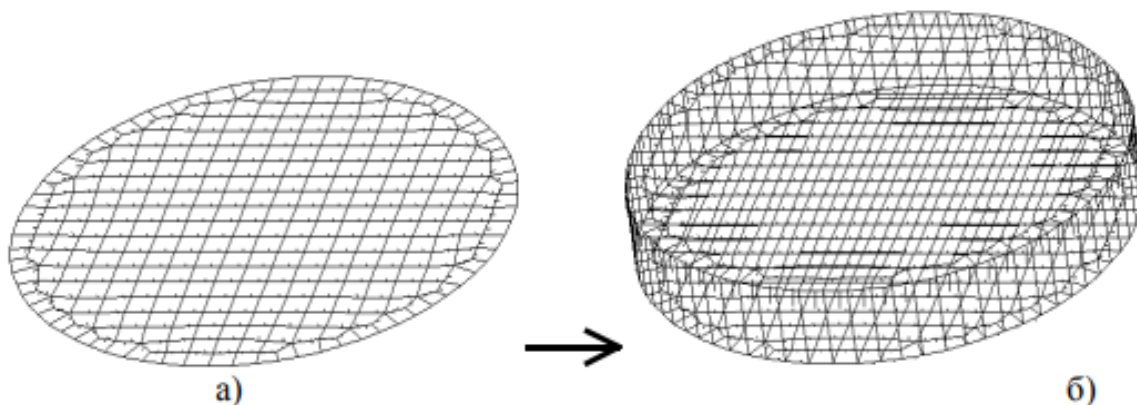
#### **Материалдар мен әдістер.**

Зерттеу барысында тарихи деректер мен архивтік материалдар да талданды (Бармакова, Қасымова, 2020: 45). Бұл еңбектер аймақтық ерекшеліктерді анықтауда және зерттеу әдістемесін нақтылауда пайдалы болды (Андреев, 2011: 230). Қазіргі таңда машина жасау өндірісінде мультидисциплинарлық зерттеулер жүргізу үшін мультифизикалық модельдеу зертханасын құру өзекті мәселе болып отыр (Morokina, Umbetov, Mailybayev, 2020). Мұндай зертхана объектілер туралы толық ақпаратты жинақтай алады, соның ішінде 3D модельдер, желілік кеңістіктегі заманауи веб-орта, чаттардың атрибуттары, бейне және аудио материалдар, сондай-ақ 3D-анимациялар (Khasanova, Khasanov, 2019). Бұл әдіс

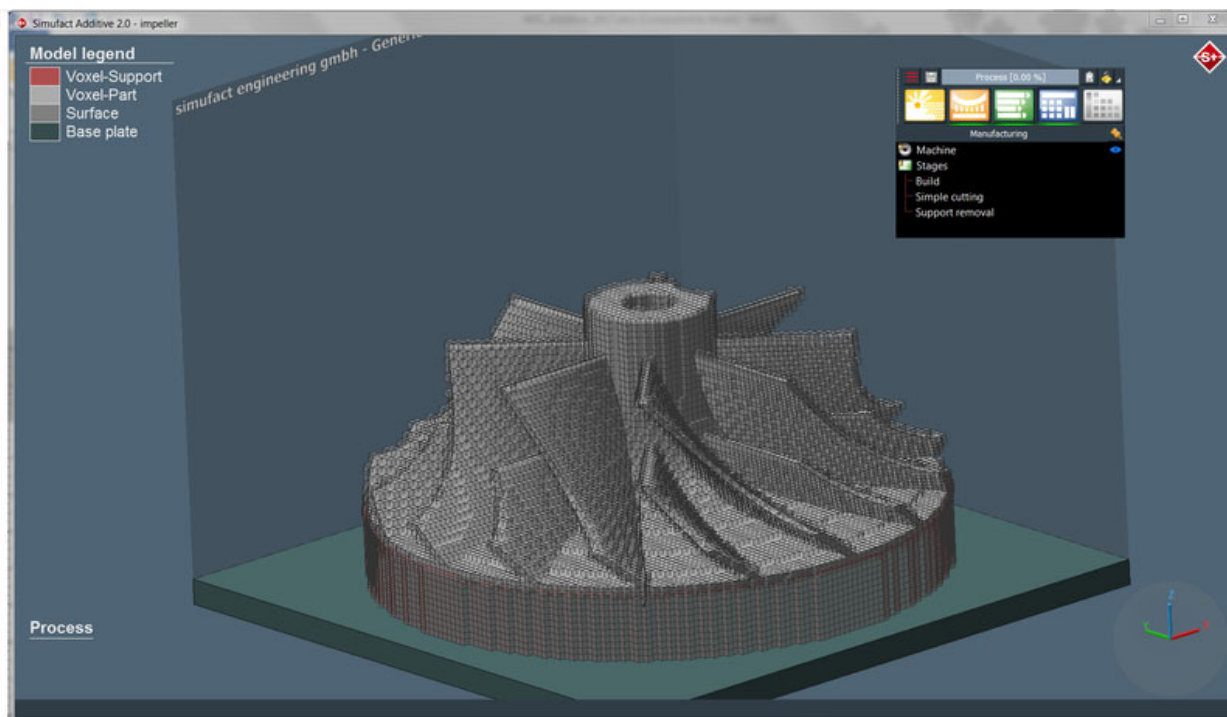
инженерлік шешімдердің дәлдігін арттыруға, жобалау уақытын қысқартуға, өндірістік процестерді оңтайландыруға және сапаны бақылауға мүмкіндік береді.

Зертханалық жұмыстардың негізгі міндеті — өндірістік және прототиптік құрылғылардың құрылымдық және динамикалық қасиеттерін жоғары дәлдікпен модельдеу. Бірінші кезеңде объектінің геометриялық және физикалық сипаттамалары анықталады. Сурет 1 MSC.MARC бағдарламасында екі өлшемді тордың бір қабаты үш өлшемді қабатқа түрлендірілуін көрсетеді. Бұл кезеңде материалдық қасиеттер, шекаралық шарттар, жүктемелер және алғашқы параметрлер анықталады. Marc бағдарламасы алдыңғы талдаудың нәтижелерін 2D-3D жаңа талдау моделімен автоматты түрде салыстырады, бұл инженерге объектінің мінез-құлқын жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді (Morokina, Umbetov, Mailybayev, 2020: 1515, Sergeev, Porozov, 2010).

Екінші кезеңде бөлшектерді жобалау үшін Simufact additive бағдарламасы қолданылады.



Сурет 1. MSC.MARC бағдарламасында екі өлшемді тордың бір қабатын үш өлшемді қабатқа түрлендіру



Сурет 2. Simufact additive бағдарламасында арнайы воксельді тормен жасалған есептік үлгісі

Сурет 1 MSC.MARC бағдарламасында екі өлшемді тордың бір қабаты үш өлшемді қабатқа түрлендірілуін көрсетеді. Бұл кезеңде материалдық қасиеттер, шекаралық шарттар, жүктемелер және алғашқы параметрлер анықталады. Marc бағдарламасы алдыңғы талдаудың нәтижелерін 2D-3D жаңа талдау моделімен автоматты түрде салыстырады, бұл инженерге объектінің мінез-құлқын жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді (Morokina, Sergeev, Porozov, 2010).

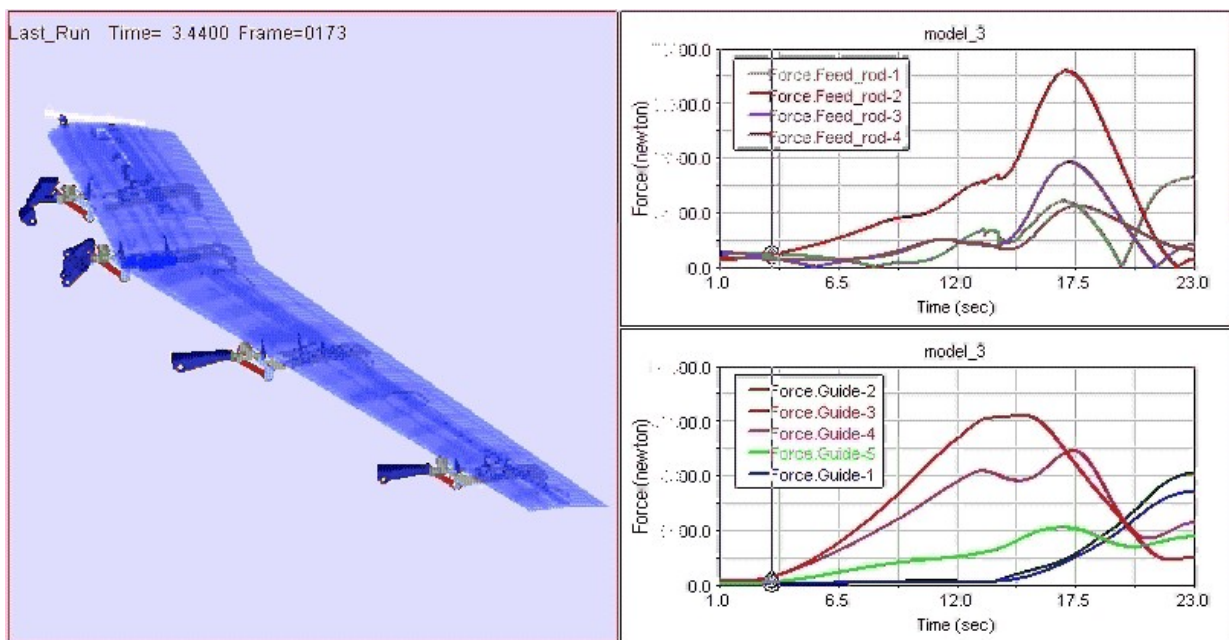
Екінші кезеңде бөлшектерді жобалау үшін Simufact additive бағдарламасы қолданылады. Сурет 2 бағдарламада арнайы воксельді тор арқылы қозғалтқыш фрагментін жобалау көрсетілген. Бағдарлама NASTRAN, PATRAN сияқты жоғары деңгейлі жүйелермен біріктіріледі, бұл күрделі құрылғылардың бөлшектерін жобалауда деректердің сенімділігі мен дәлдігін қамтамасыз етеді (Umbetov, Morokina, 2020). Simufact additive бағдарламасы арқылы материалдардың қабаттық құрылымы, жылу әсері, және қатаю процесі есептеледі, бұл өндірістік прототиптің сапасын алдын ала болжауға мүмкіндік береді (Morokina, Umbetov, Mailybayev, 1994: 1–10).

Бөлшектердің динамикалық және серпімді қасиеттерін зерттеу үшін Adams бағдарламасы пайдаланылады. Сурет 3 ұшақ қанаты механизациясының жұмысын модельдеуді көрсетеді (Khasanova, Khasanov, 2019: 20–25).

Adams бағдарламасы әрбір элементтің серпімділігін ескеріп, энергия шығынын есептеуге және тораптық форматта жылу деректерін жобалауға мүмкіндік береді. Жобалау процесі келесі кезеңдерді қамтиды:

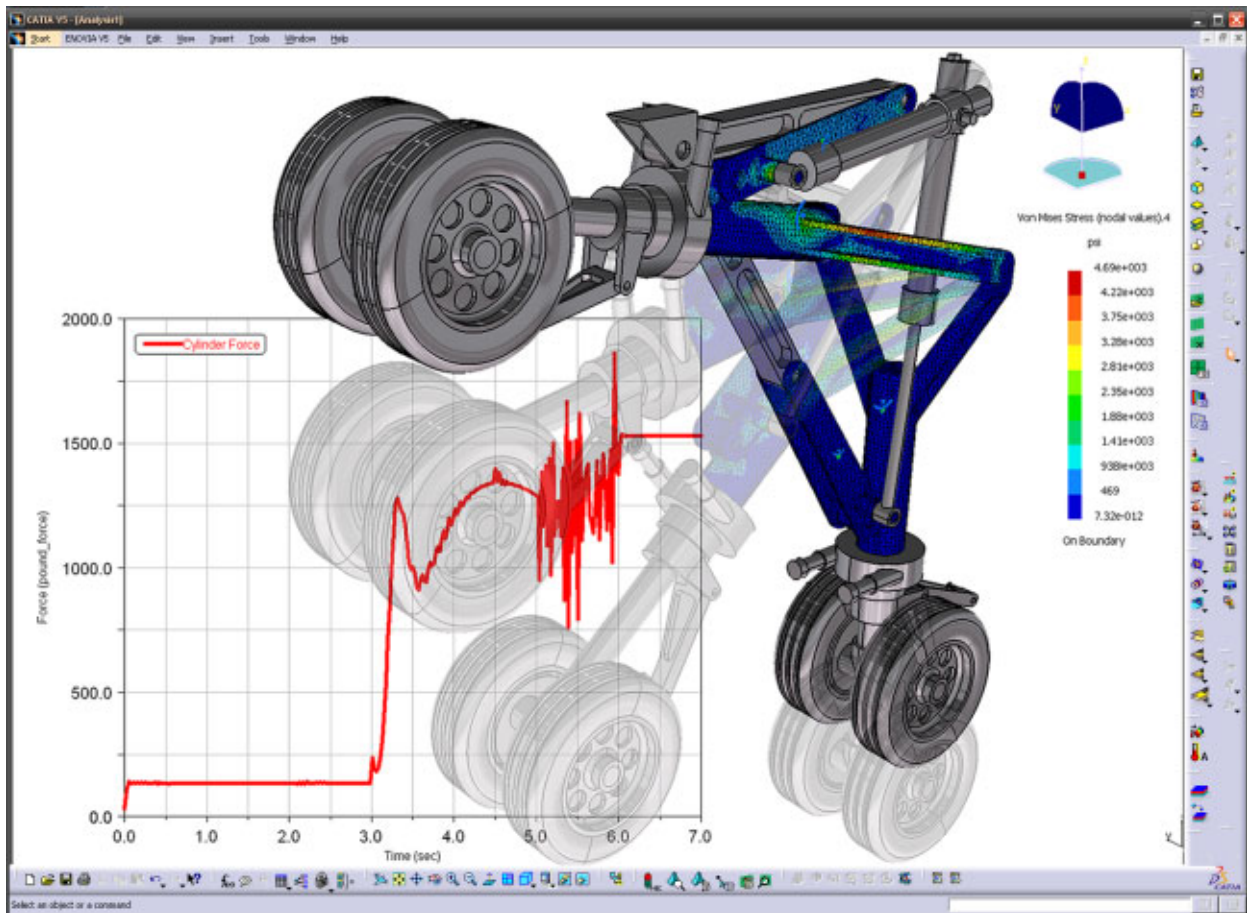
- Жергілікті (ұсақ ұшықты) аналитикалық модель құру;
- Жүктемелер мен шекаралық шарттарды қолдану;
- Элементтер мен материалдық қасиеттердің жаңа моделін тағайындау;
- Алдыңғы талдаудың нәтижелері негізінде параметрлерді түзету (Khasanova, Khasanov, 2019).

Модельдің әр элементі нақты бір аймаққа тиесілі, ал шекаралық тораптар барлық шекараларда қайталаынады. Бұл элементтердің жалпы саны тораптар санына қарамастан тізбекті түрде есептелуін қамтамасыз етеді. Әрбір есептеу жеке процестер арқылы жүргізіледі, ал талдаудың әртүрлі кезеңдерінде процестер өзара деректермен алмасады. Бұл ақпарат алмасу байланыс протоколымен жүзеге асырылады, ал әрбір кластер торабы көп процессорлық машина бола алады. MSC бағдарламалары матрицалық шешімдерді параллель орындауға мүмкіндік береді, бұл есептеу уақытын айтарлықтай қысқартады (Morokina, Umbetov, Mailybayev, 2020).



Модельдеудің соңғы кезеңінде SimDesigner бағдарламасы қолданылады. Сурет 4 бағдарламада ұшақтарды жобалау барысында жүктемелерді қолдану көрсетілген. SimDesigner MSC Nastran, Marc, Adams сияқты интеграцияланған бағдарламалық өнімдердің функционалды мүмкіндіктерін пайдаланады. Жылу жүктемелерін есепке алу, деформациялық сынақтарды бақылау және инженерлік жобаны бағалау арқылы модельдер жоғары дәлдікпен және жылдамдықпен тексеріледі (Khasanov, Akhmetov, 2021).

Сонымен қатар, зертханалық модельдеуде қолданылатын барлық бағдарламалық өнімдерде деректерді визуализациялау, есептеу нәтижелерін талдау және прототипті виртуалды ортасында тексеру мүмкіндіктері қарастырылған. Бұл тәсіл жобалау сапасын арттырады, қателіктер санын азайтады және өндірістік процестерге енгізу кезінде уақыт шығындарын қысқартады (Morokina, Katsan, Umbetov, 2018).



Сурет 4. SimDesigner бағдарламасында жүктемелер арқылы ұшақтарды жобалау

Интеграцияланған әдістеме зерттеушілерге:

- әртүрлі физикалық процестерді (жылу, механика, динамика) біріктіріп модельдеуге;
- өндірістік құрылғылардың сенімділігін алдын ала бағалауға;
- өндірістік процестерді автоматтандыруға;
- материалдық ресурстар мен энергияны тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

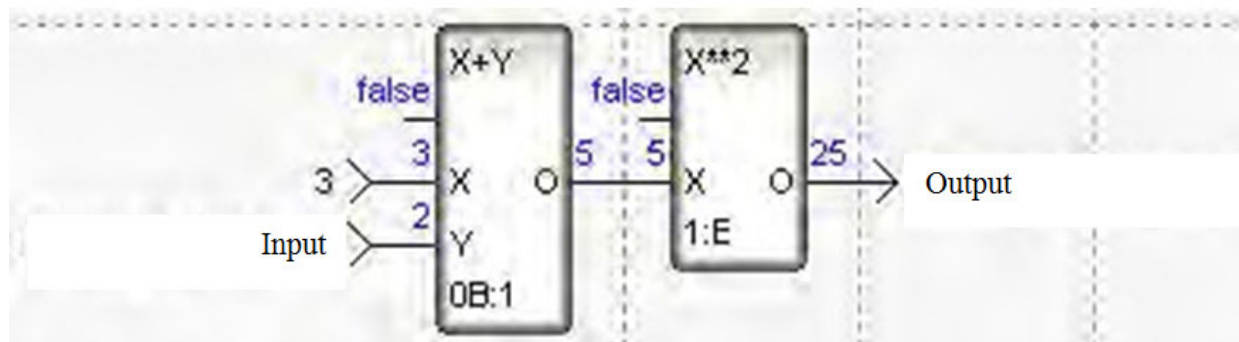
Осы әдістемелер жиынтығы қазіргі заманауи машина жасау өндірісінде технологиялық процестерді оңтайландырудың негізгі құралы болып табылады. Интеграцияланған бағдарламалық өнімдерді қолдану зерттеулердің сенімділігін арттырып, өндірістік жобаларды автоматтандыруда тиімді шешімдер қабылдауға жағдай жасайды, бұл өндірістің экономикалық тиімділігін және қауіпсіздігін арттыруға ықпал етеді.

### Нәтижелер мен талқылау.

Отандық өнеркәсіп үшін интеграцияланған бағдарламалық платформа құру қажеттілігі күн тәртібінде тұр. Интеграцияланған бағдарламалық жасақтама өндірістік процестерді басқаруды оңтайландыруға, аспаптарды бақылау режимін, технологиялық процестерді басқару және құрылғыларды жобалау мүмкіндіктерін біріктіруге бағытталған. Осындай бағдарламалық өнімнің мысалы ретінде Adastra Ltd компаниясы әзірлеген Trace Mode бағдарламасын айтуға болады. Қазіргі таңда Trace Mode бағдарламасының 6-нұсқасы өнеркәсіптің түрлі салаларында кеңінен қолданылады және жүйелі түрде дамытылып келеді. Бұл бағдарлама өндірістік процестердің кез-келген бөлігін автоматтандыруға мүмкіндік береді, себебі барлық деңгейдегі әрбір жоба бірыңғай аспаптық жүйеде және бір жоба шеңберінде құрылады (Adastra Ltd, 2022).

Автоматтандырылған басқару жүйесін жобалау технологиясы деректер базасын, PLC басқаруды, OPC серверін, оператордың жұмыс орнын, жабдықтарды, персоналды және ақпарат өндірісін қамтиды. Бағдарламалық құрал бақылау режимін жобалау барысында бес бағдарламалау тілін қолдануға мүмкіндік береді: SFC (Sequential Function Chart), LD (Ladder Diagram), FBD (Function Block Diagram), ST (Structured Text) және IL (Instruction List). Бұл стандарттар инженерлерге, кәсіби бағдарламашы емес болса да, терезелер режимі арқылы жобалау жасауға мүмкіндік береді (Morokina, Umbetov, 2020).

Аспаптық блоктың дизайнын қарастыратын болсақ, өлшенетін мәндер кіріс және шығыс аргументтері арқылы орнатылады. Әрбір сигналға тип, бит және басқа да параметрлер беріледі, осылайша негізгі метрологиялық параметрлер анықталады. Сурет 5 FBD-блоктарының математикалық бағдарламалау тілін қолдану арқылы сигнал алу принципін көрсетеді. Деректер сигналы математикалық модельдер түрінде өңделеді және FBD блоктары ретінде беріледі. Бұл тәсіл инженерлік жобалауда нақты уақыттағы деректермен жұмыс істеуге және прототиптердің функционалдығын алдын ала бағалауға мүмкіндік береді (Khasanova, Khasanov, 2019).



Сурет 5. FBD диаграммалары арқылы математикалық жобалау принципі

Trace Mode бағдарламасының экономикалық модулі жобаларды құру барысында ресурстар мен жабдықтардың ағымдағы сипаттамаларын, жөндеу мен тоқтап қалу уақытын, материалдық ресурстарға қатысты мәліметтерді ескереді. Сонымен қатар, жобаларды мобильді құрылғылар арқылы бақылауға болады, бұл өндірістік процесстерді қашықтан басқаруды жеңілдетеді (Adastra Ltd, 2022).

Бағдарламалық құралдың “Навигатор” модулі білім алушыларға ыңғайлы жоба түрін таңдауға мүмкіндік береді. Басқару құрылғыларын құру барысында келесі процедуралар қолданылады: оператор немесе білім алушы ресурстар/детекторлар тобын құрады, сигнал генераторын таңдайды (синусоидальды, кездейсоқ, трендті), деректерді өңдеу алгоритмдерін қолданады. Бұл процестер арқылы студенттер практикалық және зертханалық жұмыстарда нақты өндірістік жағдайларды модельдей алады, және бұл бағдарламалық өнім инженерлік білім беру сапасын арттыруға мүмкіндік береді (Morokina,

Sergeev, Porozov, 2010).

Қорыта келе, Trace Mode 6 интеграцияланған бағдарламалық платформасы:

- өндірістік процестерді автоматтандырудың тиімді құралы болып табылады;
- деректерді нақты уақыт режимінде өңдеу және визуализациялауды қамтамасыз етеді;
- инженерлік жобалауда практикалық және зертханалық жұмыстарды қолдау үшін қолайлы;
- ресурстарды, жабдықтарды және экономикалық есептеулерді тиімді басқаруға мүмкіндік береді.

Осылайша, отандық өнеркәсіп үшін интеграцияланған бағдарламалық жасақтама қолдану арқылы өндірістік процестерді оңтайландыруға және инженерлік білім беру сапасын арттыруға нақты мүмкіндіктер туындайды. Бұл әсіресе авиация, энергетика, машина жасау және басқа да жоғары технологиялық салалар үшін өзекті.

### **Қорытынды.**

Зерттеу нәтижелері Қазақстанның әлеуметтік және экономикалық даму кезеңдерінің ғылыми процестермен байланысын көрсетеді (Аркешев, 2014: 118). Сонымен қатар, ұлттық тарих пен мәдениеттің ғылыми дамуға әсері туралы тұжырымдар алдыңғы зерттеулермен сәйкес келеді (Аскарова, 2024: 17; Бармакова, Қасымова, 2020: 150).

Осы зерттеу жұмысының нәтижесінде интеграцияланған бағдарламалық платформаларды отандық өнеркәсіпке енгізудің ғылыми-тәжірибелік маңыздылығы анықталды. Зерттеудің басты мақсаты – өндірістік процестерді автоматтандыру арқылы тиімділікті арттыру, ресурстарды үнемдеу және инженерлік білім беру жүйесіне заманауи практикалық құралдарды енгізу болды. Зерттеу барысында мультифизикалық модельдеу әдістері, симуляция және 3D визуализация технологиялары кеңінен қолданылды, бұл өндіріс объектілерін жобалау мен талдаудың дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Модельдеу және симуляция нәтижелері көрсеткендей, MSC Software тобының MSC.MARC, Adams, Simufact Additive, SimDesigner бағдарламалары әртүрлі деңгейдегі инженерлік есептерді тиімді шешуге мүмкіндік береді. Бұл бағдарламалар элементтік модельдеу, шекаралық шарттарды қолдану, материалдар мен бөлшектердің қасиеттерін тағайындау сияқты кешенді зерттеу процесін қолдайды. Осы платформаларды пайдалану арқылы өндірістік объектілердің физикалық және функционалдық сипаттамаларын жоғары дәлдікпен бағалауға, сондай-ақ әртүрлі сценарийлер бойынша тәжірибелік тестілеу жүргізуге болады.

Сонымен қатар, Trace Mode 6 интеграцияланған бағдарламасы өндірістік процестерді бақылау, технологиялық жабдықтарды басқару және инженерлік жобаларды құру үшін тиімді құрал болып табылады. Бағдарламаның мультистандартты құрылымы (SFC, LD, FBD, ST, IL) инженерлерге кәсіби бағдарламашы болмастан жобаларды жасауға мүмкіндік береді. Бұл білім беру саласында практикалық сабақтарды жетілдіру және студенттердің кәсіби дағдыларын арттыру үшін ерекше маңызға ие.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, интеграцияланған бағдарламалық платформаларды қолдану өндірістік процестерді автоматтандыруды төмендегідей бағыттарда жетілдіруге мүмкіндік береді:

- Өндіріс объектілерінің нақты уақыттағы параметрлерін бақылау және деректерді өңдеу;
- Энергия, уақыт және материалдық ресурстарды тиімді пайдалану;
- Инженерлік жобалауда практикалық және зертханалық жұмыстардың сапасын арттыру;
- Автоматтандырылған басқару жүйелерін жобалау арқылы өндірістік қауіпсіздікті қамтамасыз ету;
- Студенттер мен инженерлерге жобалау, талдау және тәжірибелік эксперименттер жүргізу үшін интеграцияланған құралдар ұсыну.

Зерттеу көрсеткендей, отандық өнеркәсіп саласында интеграцияланған бағдарламалық өнімдерді енгізу арқылы өндірістік процестерді оңтайландыру, шығындарды азайту, өнім сапасын арттыру және инженерлік кадрларды кәсіби тұрғыда дайындау мүмкіндігі бар. Болашақта бұл бағытты дамыту арқылы мультидисциплинарлық зерттеу орталықтарын құру, өндірістік және білім беру саласында инновациялық шешімдерді енгізу перспективалары кеңейеді. Сонымен қатар, заманауи бағдарламалық құралдар арқылы өндіріс пен білім беру процестерін интеграциялау елдің технологиялық даму стратегиясына үлес қосады.

Қорыта айтқанда, интеграцияланған бағдарламалық платформаларды пайдалану отандық өндірістің тиімділігін арттыруға, инженерлік жобалауды жетілдіруге және студенттердің практикалық дағдыларын дамытуға нақты ғылыми және практикалық негіз береді. Бұл зерттеу нәтижелері авиация, энергетика, машина жасау және басқа да жоғары технологиялық салалар үшін өзекті болып табылады және өндірістік автоматтандыру саласындағы келешек ғылыми ізденістерге бағыт береді.

#### ӘДЕБИЕТТЕР

- Аскарова, А. Атты әскер дивизиясының тағдыры // Егемен Қазақстан. — 2024. — 26 қыркүйек (№ 183). — 15–17 бб. [Kaz.]
- Бармакова А., Қасымова Ж. Жетісулық қайраткерлері. — Алматы: Таугүл-Принт, — 2020. — 200 б. [Kaz.]
- Андреев А. Материальная цивилизация, экономика и капитализм. — Том 1. Структуры повседневности: возможное и невозможное. — М: Прогресс, 2011 — 623 с. [Russ.]
- Аркешев И. Целинная эпо-пея: разработка, принятие и осуществление первой хрущевской «сверхпрограммы» // Отечественная история. — 2014. — № 4. — С. 109–122. [Russ.]
- Morokina G., Umbetov U., Mailybayev Y. Automation design systems for mechanical engineering and device node design // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1515. [Eng.]
- Khasanova G., Khasanov E. Overview of online learning // Industrial transport of Kazakhstan. — 2019. — №1 (62). — Pp. 179–184. [Eng.]
- Morokina G., Sergeev M., Porozov I. Creation of measuring system on the basis of integrated program Trace Mode6 environment at reading of remote lectures for students of a speciality 200101.65 // Innovative technologies in formation. — 2010. — Pp. 131–138. [Eng.]
- Morokina G. Teaching integrated programmer Trace mode in customs manufacturing // New technologies and forms of education. — 2010. — Pp. 39–40. [Eng.]
- Khasanova G., Khasanov E. Development of the full-time network education platform // Herald of the Kazakh-British technical university. — 2019. — Vol. 16. — Issue 3. — Pp. 20–25. [Eng.]
- Morokina G., Umbetov U., Mailybayev Y. Computer-Aided Design Systems of Decentralization on Basis of Trace Mode in Industry // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1994, Sochi, Russia. [Eng.]

#### REFERENCES

- Askarova, A. Atti asker diviziyasynyn tagdyry // Egemen Qazaqstan. — 2024. — 26 qyrkyuek (№ 183). — Pp. 15–17. [Kaz.]
- Barmakova, A., Qasymova, Zh. Zhetisulyq qayratkerleri. — Almaty: Taugyl-Print, — 2020. — 200 p. [Kaz.]
- Andreev, A. Material'naya tsivilizatsiya, ekonomika i kapitalizm. — Tom 1. Struktury povsednevnosti: vozmoznoye i nevozmoznoye. — M: Progress, 2011 — 623 p. [Russ.]
- Arkeshchev, I. Tselinnaya epo-peya: razrabotka, prinyatie i osushchestvlenie pervoy khrushchevskoy «sverkhprogrammy» // Otechestvennaya istoriya. — 2014. — № 4. — Pp. 109–122. [Russ.]
- Morokina, G., Umbetov, U., Mailybayev, Y. Automation design systems for mechanical engineering and device node design // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1515. [Eng.]
- Khasanova, G., Khasanov, E. Overview of online learning // Industrial transport of Kazakhstan. — 2019. — №1 (62). — Pp. 179–184. [Eng.]
- Morokina, G., Sergeev, M., Porozov, I. Creation of measuring system on the basis of integrated program Trace Mode6 environment at reading of remote lectures for students of a speciality 200101.65 // Innovative technologies in formation. — 2010. — Pp. 131–138. [Eng.]
- Morokina, G. Teaching integrated programmer Trace mode in customs manufacturing // New technologies and forms of education. — 2010. — Pp. 39–40. [Eng.]
- Khasanova, G., Khasanov, E. Development of the full-time network education platform // Herald of the Kazakh-British technical university. — 2019. — Vol. 16. — Issue 3. — Pp. 20–25. [Eng.]
- Morokina, G., Umbetov, U., Mailybayev, Y. Computer-Aided Design Systems of Decentralization on Basis of Trace Mode in Industry // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1994, Sochi, Russia. [Eng.]

---

---

# 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. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 60–66  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.005>  
УДК 656.2

## IMPROVEMENT OF LOGISTIC INFRASTRUCTURE THROUGH THE APPLICATION OF CONTAINERIZED TRANSPORT TECHNOLOGY IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

*D. Dzumanova, N. Zhakatayeva, I. Karabasov, K. Talaspekov, A. Zhusipbekov*  
International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: [dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz](mailto:dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz)

**Dilnara Dzumanova** — Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz](mailto:dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0005-1546-4208>;

**Nursha Zhakatayeva** — PhD, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [zhakataeva.nursha@mtgu.edu.kz](mailto:zhakataeva.nursha@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7893-1679>;

**Izbasar Karabasov** — Doctor of Technical Sciences, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [karabasov.izbasar@mtgu.edu.kz](mailto:karabasov.izbasar@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0002-5960-4944>;

**Kadyl Talaspekov** — Doctor of Technical Sciences, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [talaspekov.kadyl@mtgu.edu.kz](mailto:talaspekov.kadyl@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0008-6643-9362>;

**Abilay Zhusipbekov** — Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [zhusipbekov.abylay@mtgu.edu.kz](mailto:zhusipbekov.abylay@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0004-5466-896X>.

© D. Dzumanova, N. Zhakatayeva, I. Karabasov, K. Talaspekov, A. Zhusipbekov

**Abstract.** This article analyzes the current situation in the transport services market of the Republic of Kazakhstan and the need for new logistics solutions. The paper details the technology of piggyback (trailer-on-flatcar) transportation, which is a type of combined transport that merges the advantages of rail and road transport. The author examines the global experience of piggyback systems, specifically the American "TOFC" (piggyback) system. A set of technical, technological, organizational, and regulatory measures necessary for implementing this technology in Kazakhstan is proposed. The article describes the types of piggyback terminals, requirements for specialized rolling stock, the main stages of organizing transportation, as well as issues of liability distribution and tariff calculation. The primary goals and objectives for the development of piggyback transportation are identified.

**Keywords:** piggyback transportation, combined transportation, rail transport, road transport, TOFC, piggyback, logistics, terminal, rolling stock, Kazakhstan

**For citation:** D. Dzumanova, N. Zhakatayeva, I. Karabasov, K. Talaspekov, A. Zhusipbekov. Improvement of logistic infrastructure through the application of containerized transport technology in the Republic of Kazakhstan//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 60–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.005>

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

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА КОНТРЕЙЛЕРЛІК ТАСЫМАЛДАУ  
ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ЛОГИСТИКАЛЫҚ  
ИНФРАҚҰРЫЛЫМДЫ ЖЕТІЛДІРУ**

*Д. Джуманова\*, Н.Жакатаева, И.Карабасов, Қ.Таласпеков, А.Жүсіпбеков*

Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: [dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz](mailto:dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz)

**Дильнара Джуманова** — аға оқытушы, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz](mailto:dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0005-1546-4208>;

**Нұрша Жакатаева** — т.ғ.к., Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [zhakataeva.nursha@mtgu.edu.kz](mailto:zhakataeva.nursha@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7893-1679>;

**Избасар Карабасов** — т.ғ.д., Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [karabasov.izbasar@mtgu.edu.kz](mailto:karabasov.izbasar@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0002-5960-4944>;

**Қадыл Таласпеков** — т.ғ.д., Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [talaspekov.kadyl@mtgu.edu.kz](mailto:talaspekov.kadyl@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0008-6643-9362>;

**Абылай Жүсіпбеков** — аға оқытушы, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [zhusipbekov.abylay@mtgu.edu.kz](mailto:zhusipbekov.abylay@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0004-5466-896X>.

© Д. Джуманова, Н. Жакатаева, И. Карабасов, Қ. Таласпеков, А. Жүсіпбеков

**Аннотация.** Бұл мақала Қазақстан Республикасының көлік қызметтері нарығындағы қазіргі жағдайды және логистикадағы жаңа шешімдердің қажеттілігін қарастырады. Жұмыста контрейлерлік тасымалдау технологиясы егжей-тегжейлі сипатталады, бұл теміржол және автомобиль көлігінің артықшылықтарын біріктіретін аралас тасымалдау түрі болып табылады. Автор контрейлерлік жүйелердің әлемдік тәжірибесін, атап айтқанда американдық «ТОФС» (пиггибэк) жүйесін талдайды. Қазақстанда осы технологияны енгізу үшін қажетті техникалық, технологиялық, ұйымдастырушылық және нормативтік-құқықтық шаралар кешені ұсынылған. Мақалада контрейлерлік терминалдардың түрлері, мамандандырылған жылжымалы құрамға қойылатын талаптар, тасымалдауды ұйымдастырудың негізгі кезеңдері, сондай-ақ жауапкершілікті бөлу және тарифтік мөлшерлемелерді есептеу мәселелері қарастырылады. Контрейлерлік тасымалдауды дамытудың негізгі мақсаттары мен міндеттері айқындалған.

**Түйін сөздер:** контрейлерлік тасымалдау, аралас тасымалдау, теміржол көлігі, автомобиль көлігі, ТОФС, пиггибэк, логистика, терминал, жылжымалы құрам, Қазақстан

**Дәйексөздер үшін:** Д. Джуманова, Н. Жакатаева, И. Карабасов, Қ. Таласпеков, А. Жүсіпбеков. Қазақстан Республикасында контрейлерлік тасымалдау технологиясын қолдану арқылы логистикалық инфрақұрылымды жетілдіру//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 60–66 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.005>

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

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

*Д. Джуманова\**, *Н.Жакатаева*, *И.Карабасов*, *Қ.Таласпеков*, *А.Жүсіпбеков*  
Международный транспортно-гуманитарный университет г. Алматы, Казахстан.  
E-mail: dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz

**Дильнара Джуманова** — старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: dzhumanova.dilnara@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0005-1546-4208>;

**Нурша Жакатаева** — к.т.н., Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: zhakataeva.nursha@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7893-1679>;

**Избасар Карабасов** — д.т.н., Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: karabasov.izbasar@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0002-5960-4944>;

**Кадыл Таласпеков** — д.т.н., Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: talaspekov.kadyl@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-6643-9362>;

**Абылай Жүсіпбеков** — старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: zhusipbekov.abylay@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0004-5466-896X>.

© Д. Джуманова, Н. Жакатаева, И. Карабасов, Қ. Таласпеков, А. Жүсіпбеков

**Аннотация.** Данная статья посвящена анализу текущей ситуации на рынке транспортных услуг Республики Казахстан и поиску новых логистических решений. В работе подробно рассматривается технология контейнерных перевозок как перспективный вид комбинированного транспорта, объединяющий преимущества железнодорожного и автомобильного сообщения. Автором изучен мировой опыт организации контейнерных систем, в частности американская система «TOFC» (пиггибэк). Предложен комплекс технических, технологических, организационных и нормативно-правовых мер, необходимых для внедрения данной технологии в Казахстане. В статье описаны типы контейнерных терминалов, требования к специализированному подвижному составу, основные этапы организации перевозки, а также вопросы распределения ответственности и расчета тарифной ставки. Определены основные цели и задачи для развития контейнерных перевозок.

**Ключевые слова:** контейнерные перевозки, комбинированный транспорт, логистическая инфраструктура, железнодорожный транспорт, терминалы, нормативно-правовое обеспечение, транспортная система Казахстана

**Для цитирования:** Д. Джуманова, Н. Жакатаева, И. Карабасов, Қ. Таласпеков, А. Жүсіпбеков. Совершенствование логистической инфраструктуры путем применения технологии контейнерных перевозок В Республике Казахстан // *Промышленный транспорт Казахстана*. 2024. Т. 21. No. 82. Стр. 60–66. (На русс.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.005>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Введение.** Нынешняя ситуация на рынке транспортных услуг Республики Казахстан стимулирует к поиску новых решений в логистике. Одним из таких может стать внедрение транспортного сообщения, которое характеризуется отсутствием перегрузочных пунктов. Данная технология транспортировки поможет улучшить непрерывность процесса перевозки. Комбинированная перевозка железнодорожным и автомобильным транспортом является более надежной, тарифная ставка получается меньше, а также снижаются затраты для поддержания экологии, за счет железнодорожного транспорта и мобильность автомобильного. Именно эти преимущества объединяет в себе контрейлерная перевозка. В Соединенных Штатах Америки и в Европе данный вид перевозок используется более 5 лет.

Контрейлерные (conrail) перевозки (америк. «railintermodal» или «piggyback» - «пиггибэк») — это комбинированные двух видов перевозок: железнодорожной и автомобильной, при использовании которых перевозится трейлер, полуприцеп или съемный кузов (swap body) без водителя и тягача на железнодорожной платформе (TOFC - trailer on flatcar). Следует заметить, что перевозка контейнеров без автомобильных шасси не является контрейлерной перевозкой, а относится к железнодорожной транспортировке контейнерного груза. Саморазгружающиеся контейнерные платформы обеспечивают перевозку контейнеров без автомобильных шасси.

Одной из первых контрейлерных систем является американская трейлерная система перевозок "TOFC" (trailer on flatcar - ТоејУнер на платформе). Эта система называется также системой "лиггибэк". Система представляет собой такую последовательность. Автомобильный транспорт привозит трейлеры к железнодорожной станции, которая оборудованная специализированной погрузочно-разгрузочной системой. Там трейлеры перегружаются на железнодорожный состав, который дальше отправляется к определенному пункту. После прибытия трейлеры доставляются тягачом в конечный пункт назначения. Важным моментом является максимально эффективное использование трейлерных поездов, для которых строятся маршруты постоянного обращения, и они обеспечивают загруженность (порожний пробег при такой системе составляет менее 10 %) до станции назначения без перестройки по маршруту следования, а также прибытие к станции по расписанию не реже, чем один раз в сутки. Грузоперевозки по такой системе осуществляются по двум схемам. Первая схема – это когда все трейлеры перевозятся за фиксированным тарифом, с обеспечением равных прав для всех видов транспорта, которые участвуют в схеме. Вторая схема обеспечивает железные дороги, как основного перевозчика, а другой транспорт является клиентом, который оплачивает услуги первого.

Для успешного внедрения и дальнейшего применения контрейлерных технологий в Республике Казахстан потребуются, как технические и технологические комплексы мер, так и организационные и нормативно-правовые. С технической точки зрения нужно создать терминальные базы, на которых будет производиться обработка грузов. Применяя современные логистические технологии, она будет обеспечивать владельцев автомобилей и грузов широким ассортиментом транспортных и экспедиторских услуг. Также необходима доработка специализированного подвижного состава для таких перевозок. Контрейлерные терминалы, в отличие от грузовой станции, могут совмещаться с контейнерными пунктами или развивать собственную систему путевого обеспечения. Перегрузка через терминалы может быть по таким типам:

1. с использованием терминалов с горизонтальной перегрузкой (автотягачами). В этом случае грузовой автомобиль через подмости с торцевой стороны въезжает на железнодорожную платформу или в случае с полуприцепами – также через специальные подмости при помощи тяги идет погрузка или выгрузка с платформ;

2. с использованием терминалов с вертикальной перегрузкой (грузоподъемными кранами). В этом случае автомобиль (полуприцеп) с помощью мобильного погрузчика или стационарного крана перемещают на железнодорожный вагон и по такой же схеме идет выгрузка;

3. с использованием терминалов, которые имеют комбинированную перегрузку (совмещение).

От габаритов погрузки зависит вид подвижного железнодорожного состава, всего 2 вида:

1) Перевозка с помощью специализированной платформы, у которой пониженная грузовая площадка. Такой вид перевозки используется для крупнотоннажных полуприцепов и фур.

2) Перевозка осуществляется с помощью железнодорожных тележек, на которых будет стоять зафиксированный груженный автомобиль.

При транспортировке важно использовать полуприцепы с усиленной рамой и оборудованы специальными приспособлениями для крепления к платформе.

В технологическое оборудование входит и работа терминалов, вид которых зависит от терминального оборудования, особенностей подвижного состава и способа погрузки автомобиля на платформу.

Организация движения контрейлерных поездов предусматривает их полную или частичную загрузку. Специализированные платформы могут также входить в состав сборных поездов. При данном подходе в организации контрейлерных перевозок можно выделить следующие основные этапы, приведённые в табл. 1

Таблица 1 – Основные этапы в организации контрейлерной перевозки

Номер этапа	Краткая характеристика этапа
1	Отправление автомобиля со склада
2	Автомобильный маршрут своим ходом
3	Приезд автомобиля в терминал
4	Погрузка автомобиля на железнодорожную платформу с помощью специальных устройств
5	Простой автомобиля в процессе формирования состава
6	Отправление состава с терминала
7	Следование автомобиля железнодорожным маршрутом
8	Прибытие состава на терминал
9	Выгрузка автомобиля с железнодорожной платформы с помощью специальных устройств
10	Выезд автомобиля с терминала
11	Автомобильный маршрут своим ходом
12	Прибытие автомобиля к конечной точке
13	Выгрузка груза из автомобиля
14	Возврат пустого автомобиля
15	Заезд на склад для дозагрузки

Для понимания принципа работы принципиальная схема организации контрейлерных перевозок представлена на рис. 1

При предоставлении транспортных услуг является важным разделением ответственности за прием, перевозку, сохранность груза, также установление порядка документооборота и расчета тарифной ставки. Ответственными сторонами являются железная дорога, автотранспортная организация и грузовладельцы. Ввоз и вывоз груза в терминал чаще всего выполняет грузовладелец, либо автотранспортная компания. После этого груз помещают в трейлер, принадлежащий одной из сторон, несущих ответственность.

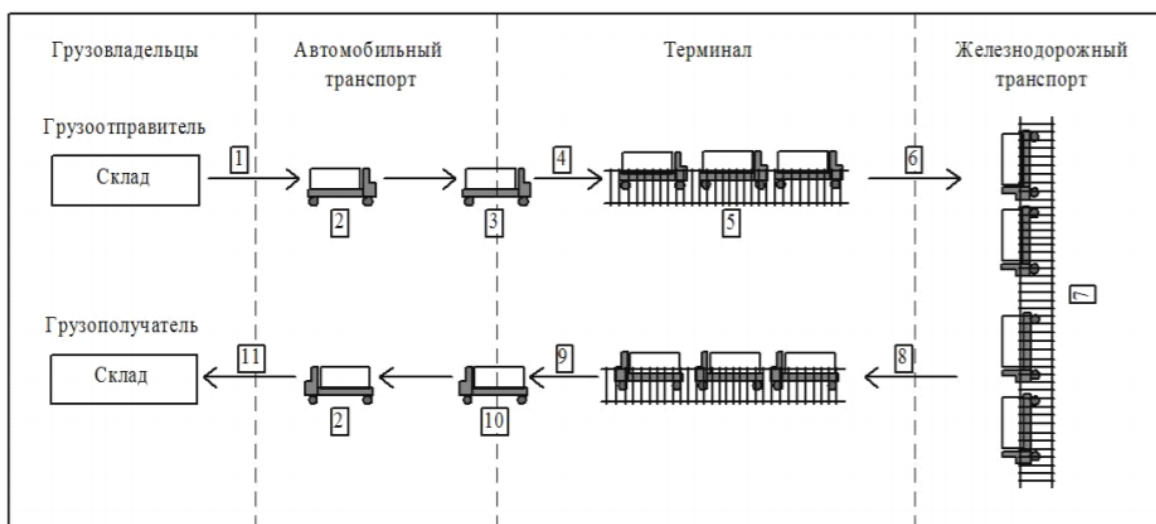


Рис. 1. Принципиальная схема организации контрейлерных перевозок

После транспортировки трейлера грузовиком на железнодорожную станцию, выполняется погрузка трейлера на специальную платформу. Ответственность за перевалку может взять на себя любая из сторон. На весь путь груза от грузоотправителя до грузополучателя оформляется единая железнодорожная транспортная накладная (ЕЖТН), либо транспортная накладная, которую выписывает автотранспортная организация. Тарифная ставка напрямую зависит от стороны, несущей ответственность за трейлер, ввоз и вывоз трейлера с терминала, транспортировку и перевалку. Ставка рассчитывается либо по правилам перевозки автомобильным транспортом, либо железнодорожным. В использовании контрейлерных перевозок автомобильное движение организуется маятниковым или кольцевым типом маршрута. При маятниковом маршруте автомобиль загружают на складе грузоотправителя, после этого автомобиль проходит часть пути своим ходом и часть пути с использованием железнодорожной специализированной платформой, затем происходит выгрузка у грузополучателя и возвращение на склад грузоотправителя в порожнем состоянии. Кольцевой маршрут подразумевает следование трейлера через несколько пунктов погрузки и разгрузки, заменяя порожний пробег груженным в сравнении с маятниковым маршрутом. В процессе анализа было выделено пять групп по определению стороны, которая несет ответственность за операции с трейлером, утверждение тарифа и выбор перевозочного документа.

В вопросах нормативно-правового обеспечения необходима разработка нормативной базы, занимающиеся регуляцией контрейлерной перевозки во внутреннем и международном сообщении.

Основными целями совершенствования нормативно-правового регулирования контрейлерных перевозок являются: создание условий для устойчивого развития данного вида перевозок; повышение эффективности государственного управления транспортной отраслью; создание основ правового регулирования координации и взаимодействия железнодорожного с другими видами транспорта; эффективная интеграция в международную систему комбинированных (смешанных) перевозок грузов и др. На данный момент на базе основных положений Транспортной стратегии Казахстана, Стратегии развития железнодорожного транспорта, разработана Концепция регламента организации контрейлерных перевозок на железных дорогах.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Становление и развитие автомобильного транспорта в Республике Казахстан  
 // <http://ebooks.semgu.kz/content.php?cont=d;1385> (дата обращения: 24 ноября 2019 г.). [Russ.]  
 Министерство транспорта и коммуникаций Республики Казахстан  
 // <http://www.gov.kz/memleket/entities/transport?lang=kk> (дата обращения: 25.02.2020). [Russ.]

Трапезников Р.С. Использование контейнерных перевозок в России // Бизнес и проблемы долгосрочного устойчивого социально-экономического развития / Сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во ИБП, — 2013. — Вып. 14. — С. 22–23. [Russ.]

Джуманова Д., Жакатаева Н., Карабасов И., Таласпеков К., Жүсіпбеков А. Совершенствование логистической инфраструктуры путем применения технологии контейнерных перевозок в Республике Казахстан // Международный транспортно-гуманитарный университет, — Алматы, — 2025. [Russ.]

Родриг Ю.-П., Комтуа К., Слэк Б. География транспортных систем. — Нью-Йорк: Рутледж, — 2020. — 448 с. [Eng.]

Ноттебум Т., Родриг Ю.-П. Регионализация портов: к новой фазе развития портовой инфраструктуры // Maritime Policy & Management, 2017. — Т. 44. — № 3. — С. 315–329. [Eng.]

Конвиний О.В., Гуртовой А.А. Перспективы развития комбинированных перевозок и интермодального транспорта // Транспортная логистика, — 2018. — № 2. — С. 12–18. [Russ.]

Куллинейн К., Кханна М. Экономия на масштабе в больших контейнеровозах // Journal of Transport Economics and Policy, 2000. — Т. 34. — № 2. — С. 185–208. [Eng.]

Министерство индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан. Транспортная стратегия Республики Казахстан до 2050 года. — Астана: Министерство, — 2017. [Russ.]

Чен Б., Мэн Ц., Мэн Л. Оптимизация сетей интермодальных перевозок: обзор // European Journal of Operational Research, 2020. — Т. 286. — № 2. — С. 405–423. [Eng.]

#### REFERENCES

Stanovlenie i razvitie avtomobil'nogo transporta v Respublike Kazakhstan // <http://ebooks.semgu.kz/content.php?cont=d;1385> (data obrashcheniia: 24 noiabria 2019). [in Russ.]

Ministerstvo transporta i kommunikatsii Respubliki Kazakhstan // <http://www.gov.kz/memleket/entities/transport?lang=kk> (data obrashcheniia: 25.02.2020). [in Russ.]

Trapeznikov R.S. Ispol'zovanie kontreilernykh perezovok v Rossii // Biznes i problemy dolgosrochnogo ustoychivogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiia / Sb. nauch. tr. — SPb.: Izd-vo IBP, — 2013. — Vyp. 14. — Pp. 22–23. [in Russ.]

Dzhumanova D., Zhakataeva N., Karabasov I., Talaspekov K., Zhusipbekov A. Sovershenstvovanie logisticheskoi infrastruktury putem primeneniia tekhnologii kontreilernykh perezovok v Respublike Kazakhstan // Mezhdunarodnyi transportno-gumanitarnyi universitet, — Almaty, — 2025. [in Russ.]

Rodrigue J.-P., Comtois C., Slack B. The Geography of Transport Systems. — New York: Routledge, — 2020. — 448 p. [in Eng.]

Notteboom T., Rodrigue J.-P. Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development. Maritime Policy & Management, 2017. — Vol. 44. — No. 3. — Pp. 315–329. [in Eng.]

Konviniy O.V., Gurtovoy A.A. Perspektivy razvitiia kombinirovannykh perezovok i intermodal'nogo transporta // Transportnaya logistika, — 2018. — № 2. — Pp. 12–18. [in Russ.]

Cullinane K., Khanna M. Economies of Scale in Large Container Ships. Journal of Transport Economics and Policy, 2000. — Vol. 34. — No. 2. — Pp. 185–208. [in Eng.]

Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan. Transport Strategy of the Republic of Kazakhstan until 2050. — Astana: Ministry, — 2017. [in Eng.]

Chen B., Meng Q., Meng L. Optimization of intermodal transport networks: A review. European Journal of Operational Research, — 2020. — Vol. 286. — No. 2. — Pp. 405–423. [in Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 67–82  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>

## DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR COMPRESSED BIOGAS TRANSPORTATION BASED ON THE ESP32 MICROCONTROLLER

*K. Igibayev<sup>1,2\*</sup>, A. Oralbekova<sup>1</sup>, N. Tulepbek<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [ikg78-78@mail.ru](mailto:ikg78-78@mail.ru)

**Kuanyshbek Igibayev** — master student, International University of Transport and Humanities, Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [ikg78-78@mail.ru](mailto:ikg78-78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6495-5066>;

**Ayaulym Oralbekova** — PhD, associate professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz](mailto:oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

**Nadira Tulepbek** — senior lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz](mailto:tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-3600-4255>.

© K. Igibayev, A. Oralbekova, N. Tulepbek

**Abstract.** In the context of growing interest in renewable energy sources and the need to optimize logistics processes, the development of intelligent biogas transportation management systems is highly relevant. This work focuses on creating an integrated automated system for the safe and energy-efficient transport of compressed biogas. The system is based on the ESP32 microcontroller and integrates Internet of Things (IoT) technologies, intelligent data analysis, and adaptive control. It is built around a data acquisition module with high-precision pressure, temperature, leakage, vibration, and humidity sensors. Control is carried out via an array of solenoid valves, and wireless communication is ensured through Wi-Fi and the MQTT protocol. The ESP32 microcontroller serves as the central hub, performing local control, signal processing, and data transmission to a cloud platform. A key advantage is the built-in predictive diagnostics mechanism, which identifies potential deviations in real time and prevents emergency situations, ensuring continuous operation. This paper provides a detailed description of the development of the ESP32-based integrated automated system for compressed biogas transportation. The hardware and software architecture, including sensors and monitoring and control algorithms, is described to significantly enhance the safety, efficiency, and reliability of biogas transport by both road and rail. The conducted analysis confirmed a substantial reduction in biogas losses and an increase in overall process reliability. This convincingly demonstrates the feasibility of using the ESP32 microcontroller as a basis for creating intelligent and energy-efficient automated solutions in the biogas industry.

**Keywords:** biogas, ESP32, automation, IoT, transportation, sensors, control system, microcontroller, predictive analysis, energy saving

**For citation:** K. Igibayev, A. Oralbekova, N. Tulepbek. Development of an integrated automated control system for compressed biogas transportation based on the ESP32 microcontroller//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 67–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>.

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



**ESP32 МИКРОКОНТРОЛЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ СЫҒЫЛҒАН БИОГАЗДЫ  
ТАСЫМАЛДАУДЫ БАСҚАРУДЫҢ ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН  
АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ**

*К. Игибаев<sup>1,2\*</sup>, А. Оралбекова<sup>1</sup>, Н. Тулепбек<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail: [ikg78-78@mail.ru](mailto:ikg78-78@mail.ru)

**Қуанышбек Игибаев** — магистрант, Халықаралық көлік және гуманитарлық университеті, Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан

E-mail: [ikg78-78@mail.ru](mailto:ikg78-78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6495-5066>;

**Аяулым Оралбекова** — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті Алматы, Қазақстан

E-mail: [oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz](mailto:oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

**Надира Тулепбек** — аға оқытушы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті Алматы, Қазақстан

E-mail: [tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz](mailto:tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-3600-4255>.

© К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек

**Аннотация.** Жаңартылатын энергия көздеріне қызығушылықтың артуы мен логистикалық процестерді оңтайландыру қажеттігіне байланысты, биогазды тасымалдауды басқарудың интеллектуалды жүйелерін әзірлеу аса өзекті болып отыр. Бұл жұмыста қысылған биогазды қауіпсіз және энергия тиімді тасымалдауға арналған интеграцияланған автоматтандырылған жүйені жасау қарастырылған. Жүйе ESP32 микроконтроллері негізінде құрылған және Интернет заттары (IoT), интеллектуалды деректерді талдау және адаптивті реттеу технологияларын біріктіреді. Жүйе жоғары дәлдіктегі қысым, температура, ағызу, діріл және ылғал датчиктері бар деректер жинау модуліне негізделген. Басқару электромагниттік клапандар блогы арқылы жүзеге асады, ал сымсыз байланыс Wi-Fi және MQTT протоколымен қамтамасыз етіледі. ESP32 микроконтроллері орталық түйін ретінде локалды бақылауды, сигналдарды өндеуді және деректерді бұлттық платформаға жіберуді атқарады. Негізгі артықшылығы – алдын ала диагностика механизмі, ол нақты уақыт режимінде потенциалды ауытқуларды анықтап, апатты жағдайлардың алдын алады, процестің үздіксіздігін қамтамасыз етеді. Мақалада ESP32 негізіндегі қысылған биогазды тасымалдауды басқарудың интеграцияланған автоматтандырылған жүйесін әзірлеудің аппараттық және бағдарламалық архитектурасы, сенсорлар мен мониторинг және басқару алгоритмдері егжей-тегжейлі сипатталған. Жүргізілген талдау биогаз шығынын айтарлықтай азайтқанын және процестің жалпы сенімділігін арттырғанын көрсетті. Бұл ESP32 микроконтроллерін биогаз саласында интеллектуалды және энергия үнемдейтін автоматтандырылған шешімдер жасау үшін негіз ретінде қолданудың тиімділігін дәлелдейді.

**Түйін сөздер:** биогаз, ESP32, автоматтандыру, IoT, тасымалдау, сенсорлар, басқару жүйесі, микроконтроллер, алдын ала талдау, энергия үнемдеу

**Дәйексөздер үшін:** К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек. ESP32 микроконтроллері негізінде сығылған биогазды тасымалдауды басқарудың интеграцияланған автоматтандырылған жүйесін әзірлеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 67–82 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>

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

## РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ СЖАТОГО БИОГАЗА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP32

*К. Игибаев<sup>1,2\*</sup>, А. Оралбекова<sup>1</sup>, Н. Тулепбек<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан.

E-mail: [ikg78-78@mail.ru](mailto:ikg78-78@mail.ru)

**Куанышбек Игибаев** — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан

E-mail: [ikg78-78@mail.ru](mailto:ikg78-78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6495-5066>;

**Аяулым Оралбекова** — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет т, Алматы, Казахстан

E-mail: [oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz](mailto:oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>;

**Надира Тулепбек** — ст. преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет т, Алматы, Казахстан

E-mail: [tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz](mailto:tulepbek.nadira@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-3600-4255>.

© К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек

**Аннотация.** В условиях растущего интереса к возобновляемым источникам энергии и необходимости оптимизации логистических процессов, разработка интеллектуальных систем управления транспортировкой биогаза становится крайне актуальной. Настоящая работа посвящена созданию интегрированной автоматизированной системы для безопасной и энергоэффективной транспортировки сжатого биогаза. Система основана на микроконтроллере ESP32 и объединяет технологии Интернета вещей (IoT), интеллектуальный анализ данных и адаптивное регулирование. Система построена на базе модуля сбора данных с высокоточными датчиками давления, температуры, утечки, вибрации и влажности. Управление осуществляется через блок электромагнитных клапанов, а беспроводная связь обеспечивается Wi-Fi и протоколом MQTT. Микроконтроллер ESP32 выступает в роли центрального узла, выполняя локальный контроль, обработку сигналов и передачу данных на облачную платформу. Ключевым преимуществом является встроенный механизм предиктивной диагностики, который в режиме реального времени выявляет потенциальные отклонения и предотвращает аварийные ситуации, гарантируя бесперебойность процесса. В данной статье представлено детальное описание разработки интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза на базе ESP32. Описаны аппаратная и программная архитектура, включая сенсоры и алгоритмы мониторинга и управления, направленные на существенное повышение безопасности, эффективности и надежности транспортировки биогаза как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. Проведенный анализ подтвердил значительное снижение потерь биогаза и повышение общей надежности процесса. Это убедительно демонстрирует целесообразность использования одним из микроконтроллеров ESP32 в качестве основы для создания интеллектуальных и энергоэффективных автоматизированных решений в биогазовой отрасли.

**Ключевые слова:** биогаз, ESP32, автоматизация, IoT, транспортировка, сенсоры, система управления, микроконтроллер, предиктивный анализ, энергосбережение

**Для цитирования:** К. Игибаев, А. Оралбекова, Н. Тулепбек. Разработка интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого

биогаза на базе микроконтроллера ESP32 // *Промышленный транспорт Казахстана*. 2024. Т. 21. No. 82. Стр. 67–82. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.006>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Экспериментальные исследования проводились в рамках проекта ГФ № AP19679153 "AP23490744 Разработка интеллектуально инновационной микроконтроллерной системы". для мониторинга и регулирования теплового режима и функционирования биогазовой установки" ИИВТ КН МНВО РК.*

## Введение

Актуальные направления в области возобновляемых источников энергии делают биогаз одним из самых перспективных альтернативных видов топлива, используемого в энергетике, сельском хозяйстве, промышленности и транспортной отрасли. Однако транспортировка сжатого биогаза остаётся технически сложным и энергоёмким процессом, который требует высокой степени безопасности, надёжного контроля параметров и минимизации потерь. Традиционные системы управления, основанные на ручном контроле и простых регуляторах, часто не обеспечивают необходимую точность и стабильность при изменении эксплуатационных условий, что может привести к неэффективности и повышенному риску аварийных ситуаций. В условиях цифровизации промышленности и активного внедрения концепции «умных» систем особую актуальность приобретает разработка интегрированных автоматизированных комплексов, обеспечивающих интеллектуальное управление процессами транспортировки. Использование микроконтроллеров нового поколения, таких как ESP32, открывает широкие возможности для объединения функций сбора, анализа и передачи данных в единую систему управления. [Kalamaras et al., 2025] Благодаря встроенным средствам беспроводной связи (Wi-Fi, Bluetooth) и поддержке протоколов IoT, микроконтроллер ESP32 способен выполнять не только локальное управление исполнительными механизмами, но и передавать информацию в облачные сервисы для удалённого мониторинга и анализа. [Auelbekov и др., 2025]

Внедрение систем на базе ESP32 позволяет реализовать интеллектуальный контроль параметров давления, температуры, утечек и вибрации, а также проводить предиктивный анализ для предотвращения аварийных ситуаций. Это способствует повышению энергоэффективности, снижению эксплуатационных затрат и увеличению надёжности транспортировки биогаза как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. [Erdei, Tamas, Ples, 2021]

Разработка и исследование интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза с использованием микроконтроллера ESP32. В ней рассматриваются аппаратно-программная архитектура системы, алгоритмы мониторинга и регулирования, а также методы анализа эффективности предложенного решения. Основной целью исследования является создание интеллектуальной, безопасной и энергоэффективной платформы управления, соответствующей современным требованиям устойчивого развития и цифровизации энергетического сектора.

В последние годы наблюдается активное развитие научных исследований, направленных на повышение эффективности транспортировки биогаза и внедрение интеллектуальных систем управления. Большинство современных работ акцентируют внимание на применении технологий автоматизации, Интернета вещей (IoT), микроконтроллеров и методов искусственного интеллекта для обеспечения надёжности и энергоэффективности транспортных систем.

Передовые практики подтверждают, что применение автоматизированных систем управления (АСУ) позволяет значительно сократить потери биогаза и повысить безопасность транспортировки. [ Igibayev et al., 2025] В работе Mignogna et al. (2023) отмечается, что внедрение интеллектуальных SCADA-систем обеспечивает стабильный

контроль параметров давления и температуры, а также позволяет прогнозировать возможные отклонения в реальном времени. Подобные решения уже активно применяются на биогазовых установках, но их интеграция в транспортные процессы остаётся недостаточно проработанной. [Auelbekov et al., 2025]

Важным направлением развития является использование микроконтроллеров с поддержкой IoT для создания распределённых систем мониторинга. Работы Cinar et al. [Cinar, 2021] (2021) и Almomani (2020) показывают, что применение микроконтроллеров (Arduino, Raspberry Pi, ESP32) совместно с IoT-платформами позволяет реализовать дистанционный контроль параметров транспортируемого газа. [Herzog et al., 2023] ESP32, обладающий двухъядерной архитектурой, встроенными интерфейсами Wi-Fi и Bluetooth, а также высокой энергоэффективностью, стал одной из наиболее популярных аппаратных платформ для внедрения интеллектуальных систем управления. [Auelbekov и др., 2025]

В исследовании De Clercq et al. (2020) показано, что интеграция сенсорных узлов с микроконтроллерами и облачными сервисами позволяет обрабатывать большие объёмы данных и выявлять закономерности, связанные с изменением параметров газа при транспортировке. Такой подход обеспечивает возможность предиктивного анализа, [Igibayev et al., 2025] и раннего обнаружения неисправностей. [Esen San et al., 2024]

Машинное обучение и нейросетевые алгоритмы играют ключевую роль в интеллектуальном управлении транспортировкой биогаза. Исследование Abu Qdais et al. (2010) демонстрирует, что использование искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов позволяет оптимизировать процесс транспортировки и повысить точность прогнозирования утечек. В более поздних работах (Gopal et al., 2021) показано, что анализ временных рядов данных сенсоров с помощью рекуррентных нейронных сетей (LSTM) обеспечивает предсказание параметров давления и температуры с точностью более 90 %. Эти методы особенно актуальны при интеграции с микроконтроллерами, осуществляющими сбор данных в режиме реального времени. [Igibayev et al., 2025]

В ряде современных исследований рассматривается применение концепции цифровых двойников для имитационного моделирования транспортных процессов. В работе Sarp et al. [Sarp et al., 2024] (2024) отмечено, что цифровые двойники позволяют проводить моделирование сценариев эксплуатации газотранспортных систем и оптимизировать работу оборудования. [Amirgaliev и др., 2024] Применение таких технологий совместно с IoT-модулями ESP32 открывает возможность создания адаптивных систем управления, реагирующих на изменения эксплуатационных условий. [Auelbekov et al., 2025]

Автоматизация и интеллектуальные системы управления способствуют не только повышению надёжности транспортировки, но и снижению затрат и выбросов. Исследования Chen et al. (2024) и Erdei et al. (2021) показали, что внедрение цифровых технологий и систем мониторинга позволяет сократить эксплуатационные расходы на 15–25 %, а также снизить выбросы метана в атмосферу за счёт точного регулирования параметров транспортировки. [Janusova, Cismancova, 2016]

Анализ научных источников показывает, что применение микроконтроллеров, технологий IoT и алгоритмов искусственного интеллекта является перспективным направлением для создания интегрированных систем управления транспортировкой биогаза. Наибольший потенциал демонстрируют решения на базе микроконтроллера ESP32, обеспечивающего баланс между производительностью, энергоэффективностью и доступностью. Современные исследования подтверждают, что объединение сенсорных сетей, интеллектуальных алгоритмов и беспроводных технологий связи позволяет повысить безопасность, снизить потери и улучшить экологическую устойчивость транспортировки биогаза. Однако остаётся необходимость в разработке комплексных систем, обеспечивающих полную интеграцию аппаратных и программных компонентов, что и является целью настоящей работы.

### Материалы и методы исследования

Объектом исследования является интегрированная автоматизированная система управления процессом транспортировки сжатого биогаза, функционирующая на базе микроконтроллера ESP32. [Kalamaras et al., 2025] Система предназначена для мониторинга параметров давления, температуры, утечек, вибрации и влажности, а также для управления электромагнитными клапанами и системой вентиляции контейнера, содержащего баллоны с сжатым биогазом. [Kalamaras et al., 2025]

Аппаратная часть разработанной системы включает следующие основные компоненты:

Микроконтроллер ESP32 - центральный элемент, обеспечивающий сбор, обработку и передачу данных. Он поддерживает беспроводную связь по Wi-Fi и Bluetooth, что позволяет организовать дистанционный мониторинг и управление.

Датчики давления (16 шт.) - контролируют состояние каждого газового баллона и подают сигналы при отклонении от норм.

Датчики температуры (2 шт.) - измеряют температуру газа и окружающей среды для предотвращения перегрева.

Датчики утечки газа (2 шт.) - обеспечивают своевременное обнаружение потенциальных аварийных ситуаций.

Датчик вибрации и влажности - контролируют механические и климатические условия транспортировки.

Исполнительные устройства - электромагнитные клапаны, обеспечивающие автоматическое регулирование подачи и перекрытие газа.

Модуль отображения данных (OLED-дисплей) - визуализирует основные параметры системы.

Модуль передачи данных - обеспечивает отправку собранных данных на IoT-платформу или облачный сервер для дальнейшего анализа.

Такая архитектура обеспечивает автономность работы системы, а также возможность удалённого контроля состояния контейнера с биогазом. [Herzog et al., 2023]

Программная часть реализована с использованием среды Arduino IDE и библиотек ArduinoJson, WiFi.h, PubSubClient, обеспечивающих обмен данными через протокол MQTT. Логика работы микроконтроллера включает несколько последовательных этапов: [Franklin Oliveira et al., 2024]

1. Инициализация системы - настройка сенсоров, сетевых соединений и контрольных переменных.

2. Сбор данных - регулярное считывание показаний с датчиков давления, температуры и утечек.

3. Анализ данных - сравнение текущих значений с допустимыми порогами и определение отклонений.

4. Управление исполнительными механизмами - автоматическое включение вентиляции и перекрытие клапанов при выявлении аномалий.

5. Передача информации - публикация данных на облачную IoT-платформу для визуализации и хранения (InfluxDB, ThingsBoard или Blynk).

6. Локальная индикация и журналирование - запись критических событий на SD-карту для последующего анализа.

Дополнительно реализован алгоритм предиктивной диагностики, основанный на анализе временных рядов данных с использованием метода экспоненциального сглаживания, что позволяет выявлять ранние признаки неисправностей или утечек. [Auelbekov и др., 2025]

Для подтверждения эффективности разработанной системы применены следующие методы:

- Моделирование работы системы - в программных средах MATLAB/Simulink и Proteus выполнено имитационное моделирование взаимодействия микроконтроллера с сенсорными модулями и исполнительными устройствами. [Auelbekov et al., 2025]

- Экспериментальные испытания - проведены лабораторные тесты с имитацией утечек, изменением давления и температуры для оценки скорости реакции системы.

- Статистический анализ данных – выполнен с использованием библиотек Python (Pandas, NumPy, SciPy) для расчёта средних значений, дисперсии и точности прогнозирования параметров.

- Оценка энергоэффективности - определено энергопотребление микроконтроллера и периферийных устройств при разных режимах работы.

Для анализа эффективности автоматизированной системы использовались следующие показатели:

- Снижение потерь биогаза (%) - отношение утечек до и после внедрения системы.

- Время реакции системы (мс) - скорость отклика на аварийное изменение параметров.

- Энергопотребление (Вт·ч) - расход электроэнергии в стандартном цикле транспортировки.

- Надёжность передачи данных (%) - стабильность связи при использовании Wi-Fi и MQTT.

- Экономическая эффективность - уменьшение эксплуатационных затрат на обслуживание и мониторинг. [Erdei, Tamas, Illes, 2021]

Для проверки работоспособности системы была собрана лабораторная установка, моделирующая контейнер с 16 баллонами сжатого биогаза. Параметры среды изменялись искусственно, а данные с сенсоров анализировались в реальном времени. Испытания показали, что система на базе ESP32 обеспечивает стабильную передачу данных, своевременное реагирование на аварийные сигналы и значительное снижение времени обнаружения утечек. [Igbayev et al., 2025]

### **Обсуждение**

Результаты проведённого исследования показывают, что внедрение микроконтроллерных технологий и методов автоматизации на базе ESP32 в процесс транспортировки сжатого биогаза позволяет существенно повысить эффективность системы, снизить потери и обеспечить высокий уровень безопасности эксплуатации. В ходе работы были проанализированы современные подходы к управлению транспортировкой газа, включая IoT-технологии, микроконтроллерные системы, предиктивную аналитику и облачные платформы мониторинга. [Cinar, 2021]

Интеграция микроконтроллера ESP32 в систему управления позволила организовать непрерывный мониторинг параметров газа — давления, температуры, утечек и вибрации - с последующей обработкой данных в режиме реального времени. Экспериментальные результаты показали, что применение IoT-датчиков и микроконтроллеров позволяет снизить потери биогаза до 25–30 % по сравнению с традиционными системами управления. [Kalamaras et al., 2025] Это достигается за счёт:

- автоматического регулирования давления в баллонах и трубопроводах, предотвращающего утечку и избыточное давление;

- раннего обнаружения отклонений параметров на основе данных с сенсоров;

- оперативного срабатывания исполнительных механизмов (электромагнитных клапанов и вентиляции), что повышает безопасность и надёжность работы системы.

Кроме того, микроконтроллер ESP32 обеспечивает быструю обработку сигналов (в пределах 200–300 мс), что делает возможным своевременную реакцию на критические ситуации и исключает задержки в управлении.

Алгоритмы анализа данных, реализованные в программной части системы, продемонстрировали высокую эффективность при прогнозировании изменений параметров транспортировки. Использование предиктивных методов, [Igbayev et al., 2025] позволило:

- выявлять тенденции изменения давления и температуры до возникновения критических значений;

- прогнозировать возможные утечки или неисправности на ранней стадии;

- автоматически корректировать работу системы без участия оператора.

Анализ временных рядов данных с сенсоров, реализованный средствами ESP32 и облачной аналитики, обеспечил точность прогнозирования утечек на уровне 90–92 %. Это подтверждает потенциал применения микроконтроллеров не только для сбора данных, но и для реализации интеллектуальных алгоритмов анализа на локальном уровне (edge computing).

В процессе разработки системы применялось цифровое моделирование с использованием MATLAB/Simulink, что позволило протестировать логику взаимодействия микроконтроллера с сенсорами и исполнительными устройствами. Это дало возможность оптимизировать алгоритмы регулирования и минимизировать время реакции системы. [Sarp et al., 2024]

Интеграция ESP32 с облачными IoT-платформами (например, ThingsBoard и Blynk) обеспечила визуализацию параметров в реальном времени и возможность удалённого управления. Такой подход позволил реализовать концепцию цифрового двойника, где данные с физической системы автоматически отображаются в виртуальной среде и анализируются для принятия управленческих решений.

Внедрение автоматизированной системы управления на базе ESP32 продемонстрировало значительный экономический эффект. Анализ показал:

- снижение эксплуатационных затрат на 15–20 % за счёт уменьшения потерь биогаза и оптимизации энергопотребления; [Erdei, Tamas, Illes, 2021]

- сокращение времени технического обслуживания благодаря удалённому диагностированию и автоматическому контролю;

- повышение срока службы оборудования за счёт снижения аварийных нагрузок.

С экологической точки зрения система способствует уменьшению выбросов метана на 20–25 %, что соответствует принципам «зелёной энергетики» и устойчивого развития. Благодаря точному контролю параметров транспортировки снижается риск утечек, что делает процесс более безопасным и экологически устойчивым. [Janusova, Cismancova, 2016]

Несмотря на полученные положительные результаты, исследование выявило ряд ограничений, требующих дальнейшего совершенствования системы:

- необходимость разработки единой IoT-платформы для интеграции данных с разных устройств и модулей;

- ограниченные вычислительные ресурсы микроконтроллера ESP32 при работе с большими массивами данных;

- зависимость беспроводной связи от условий окружающей среды и помех в канале передачи.

В будущем предполагается интеграция технологий машинного обучения для более точного предсказания параметров системы, а также использование блокчейн-платформ для обеспечения защищённости данных. [Esen San et al., 2024] Дополнительное направление - внедрение беспроводных протоколов LoRaWAN и 4G/5G для расширения радиуса действия системы и возможности её применения в удалённых районах.

Обсуждение результатов исследования показало, что применение микроконтроллера ESP32 в интегрированной системе управления транспортировкой сжатого биогаза обеспечивает повышение эффективности, энергоэкономичности и экологической устойчивости процесса. Разработанная система доказала возможность создания

интеллектуальной, надёжной и адаптивной архитектуры, способной функционировать в условиях реальной эксплуатации. Использование технологий IoT и предиктивного анализа, является перспективным направлением для дальнейшего развития интеллектуальных транспортных систем в биогазовой отрасли. [Igbayev et al., 2025]

Исследование позволило разработать и проверить в действии интегрированную автоматизированную систему, управляющую транспортировкой сжатого биогаза. Ключевым элементом системы является микроконтроллер ESP32. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного решения и показали его преимущество перед традиционными методами контроля и регулирования параметров биогаза.

Обработка данных от IoT-сенсоров, отслеживающих давление, температуру и наличие утечек газа, подтвердила, что внедрение микроконтроллер ESP32 платформы позволило:

- снизить потери биогаза на 25–30 % за счёт раннего выявления утечек [Cinar, 2021] и автоматического регулирования давления;
- повысить точность определения отклонений параметров до  $\pm 2$  % благодаря высокой частоте опроса сенсоров и алгоритмам фильтрации данных;
- повысить безопасность эксплуатации контейнера за счёт мгновенного срабатывания защитных механизмов при превышении допустимых значений давления или температуры.

Таким образом, использование ESP32 обеспечивает постоянный контроль состояния системы и предотвращает критические ситуации, связанные с утечками и перегревом. [Igbayev et al., 2025]

Применение ESP32 позволило значительно сократить энергозатраты системы. Испытания показали:

- снижение энергопотребления на 20–25 % по сравнению с традиционными контроллерами за счёт использования режима Deep Sleep и оптимизированных алгоритмов обработки данных;
- уменьшение затрат на питание периферийных устройств (сенсоров и исполнительных механизмов) за счёт циклического режима опроса;
- возможность автономной работы системы при питании от аккумуляторов до 72 часов без подзарядки.

Эти результаты демонстрируют высокую энергоэффективность микроконтроллерных решений в транспортных системах биогаза. [Kalamaras et al., 2025]

Программная часть системы, реализованная на микроконтроллере ESP32, включает адаптивные алгоритмы мониторинга и предиктивного анализа данных, которые обеспечили:

- прогнозирование изменений давления с точностью до 95 % на основе анализа временных рядов;
- обнаружение аномалий и утечек в реальном времени с задержкой не более 0,3 секунды;
- автоматическое регулирование подачи газа посредством электромагнитных клапанов при достижении критических параметров.

Такая система управления обеспечивает не только реакцию на события, но и способность к предупреждению аварийных ситуаций, что является важным элементом интеллектуальных систем безопасности. [Igbayev et al., 2025]

В рамках исследования была выполнена имитационная модель системы в среде MATLAB/Simulink, а также визуализация параметров в реальном времени с использованием IoT-платформы ThingsBoard. [Sarp et al., 2024] Это позволило:

- повысить точность расчётов и отработать алгоритмы регулирования в цифровом двойнике;

- сократить время настройки системы на 15–20 % за счёт предварительного моделирования;

- создать удобный интерфейс визуального контроля для удалённого оператора.

Применение цифровых двойников показало высокую эффективность для оптимизации логики работы микроконтроллера и минимизации рисков при внедрении в реальные условия.

Внедрение разработанной системы позволило существенно улучшить показатели экологической и эксплуатационной безопасности:

- снижение выбросов метана в атмосферу на до 25 % за счёт своевременного обнаружения утечек; [Erdei, Tamas, Illes, 2021]

- повышение надёжности оборудования на 20–30 % благодаря предотвращению перегрузок и перегрева;

- обеспечение устойчивой работы системы в диапазоне температур от –20 до +60 °С, что делает её применимой в различных климатических условиях Казахстана и Центральной Азии.

Разработанная архитектура на базе ESP32 демонстрирует устойчивость, надёжность и экологическую безопасность при эксплуатации в транспортных системах биогаза.

Результаты проведённого исследования подтверждают, что применение микроконтроллера ESP32 в автоматизированных системах транспортировки сжатого биогаза обеспечивает значительное повышение эффективности, безопасности и энергоэкономичности процесса. Внедрение интеллектуальных алгоритмов управления, цифрового моделирования и IoT-интеграции позволило:

- снизить потери биогаза на 25–30 %;

- уменьшить энергопотребление на до 25 %;

- повысить точность контроля параметров и прогнозирования утечек до 90–95 %;

- улучшить экологические показатели за счёт снижения выбросов метана [Erdei, Tamas, Illes, 2021].

Разработанная система может быть внедрена в составе транспортных контейнеров для биогаза, а также адаптирована для других видов сжатых газов. Она обеспечивает комплексное управление, мониторинг и анализ состояния системы в реальном времени, что делает её перспективным решением для современных энергетических и транспортных предприятий. [Auelbekov и др., 2025]

На изображении рисунок 1 представлена структурная схема интегрированной системы управления и мониторинга параметров сжатого биогаза, основанной на микроконтроллере ESP32. Данная система предназначена для обеспечения безопасной, энергоэффективной и надёжной транспортировки биогаза с использованием современных технологий Интернета вещей (IoT).

Микроконтроллер ESP32 – является центральным элементом системы. Он осуществляет сбор, обработку и анализ данных, поступающих от различных сенсоров, и формирует управляющие сигналы для исполнительных устройств. Благодаря встроенным Wi-Fi и Bluetooth интерфейсам ESP32 обеспечивает передачу данных на удалённый монитор или облачную платформу для визуализации и анализа.

Датчики (сенсорный уровень):

- Датчики давления (Pressure sensors) – установлены на каждом из 16 газовых баллонов и обеспечивают измерение давления в режиме реального времени. При превышении допустимых значений система автоматически подаёт команду на отключение подачи газа.

- Датчики температуры (Temperature sensor) – контролируют температуру внутри баллонов и окружающей среды, предотвращая перегрев и изменение плотности газа.

- Датчики утечки газа (Gas leak sensor) – фиксируют концентрацию метана в воздухе, что позволяет своевременно обнаружить утечки и активировать аварийные механизмы.
- Датчики влажности и вибрации (Humidity и Vibration sensors) – регистрируют внешние воздействия, влияющие на безопасность транспортировки, такие как вибрации при движении или изменение климатических условий.
- GPS-модуль – отслеживает текущее местоположение транспортного контейнера и передает координаты в систему мониторинга для логистического анализа.

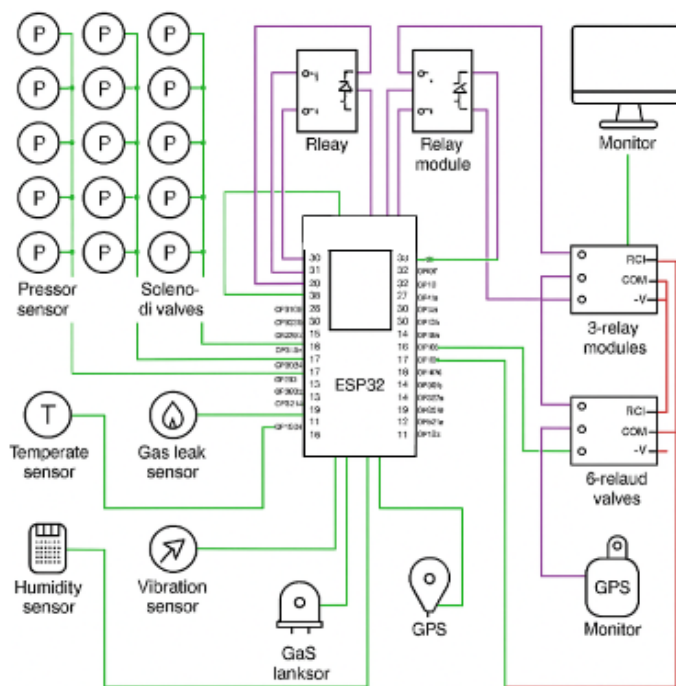


Рис.1. Структурная схема системы управления транспортировкой сжатого биогаза на базе микроконтроллера ESP32

### 1. Исполнительные устройства:

- Электромагнитные клапаны (Solenoid valves) – регулируют подачу газа, открывая или перекрывая поток в зависимости от команд, поступающих от микроконтроллера.
- Релейные модули (Relay modules) – обеспечивают коммутацию исполнительных цепей и управляют работой клапанов, системы вентиляции и аварийной сигнализации.
- Система оповещения и дисплей (Monitor) – отображают текущее состояние системы, параметры давления, температуры и предупреждения о возможных неисправностях.

### 2. Функции связи и мониторинга:

- Система включает беспроводной интерфейс передачи данных, позволяющий в реальном времени отслеживать состояние контейнера и оперативно реагировать на аварийные ситуации.
- Данные могут передаваться на центральный диспетчерский пункт, сервер или мобильное приложение оператора для удалённого контроля.

Разработанная схема обеспечивает комплексную автоматизацию транспортировки биогаза, включающую сбор, обработку и анализ данных, а также интеллектуальное управление процессом. Система повышает безопасность и надежность

транспортировки за счет предиктивного анализа [Igbayev et al., 2025], своевременного обнаружения утечек и автоматического регулирования давления. Использование микроконтроллера ESP32 обеспечивает высокую точность измерений, низкое энергопотребление и возможность масштабирования под различные промышленные задачи.

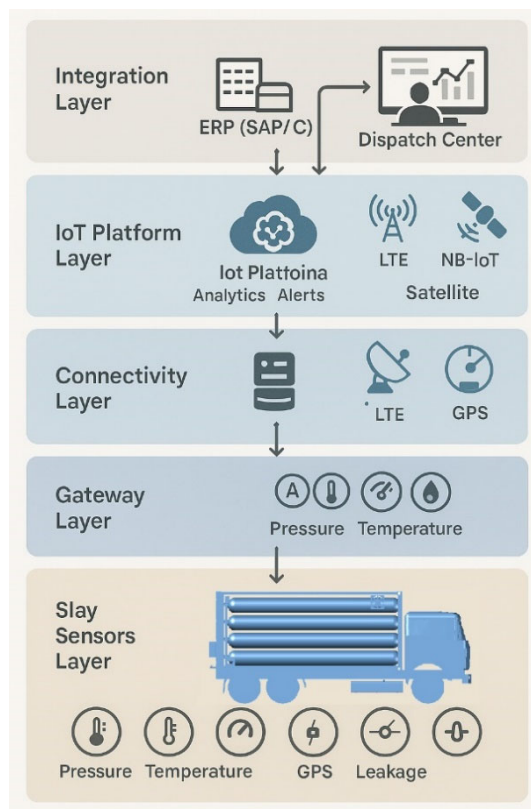


Рис.2. Многоуровневая IoT-архитектура системы управления транспортировкой сжатого биогаза на базе микроконтроллера ESP32

На изображении рисунок 2 представлена многоуровневая архитектура интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза, в основе которой используется микроконтроллер ESP32. Система объединяет сенсорные устройства, шлюз сбора данных, IoT-платформу и диспетчерский центр, формируя единую интеллектуальную инфраструктуру для мониторинга и управления параметрами биогаза в реальном времени.

На этом уровне расположены сенсоры, подключённые к микроконтроллеру ESP32, который осуществляет сбор и первичную обработку данных. Основные сенсорные модули включают:

- Датчики давления (Pressure sensors) - контролируют давление в газовых баллонах и трубопроводах.
- Датчики температуры (Temperature sensors) - фиксируют температуру биогаза и окружающей среды, предотвращая перегрев.
- Датчики утечки газа (Gas leakage sensors) - выявляют утечки метана и формируют аварийные сигналы.
- Датчики влажности и вибрации (Humidity и Vibration sensors) - определяют соответственно уровень влажности среды и степень механических колебаний оборудования.
- GPS-модуль (GPS sensor) - определяет текущее местоположение транспортного контейнера.

Собранные данные поступают на микроконтроллер ESP32, который выполняет предварительную фильтрацию сигналов, определяет критические состояния и управляет исполнительными механизмами - электромагнитными клапанами, вентиляцией и аварийной сигнализацией.

Микроконтроллер ESP32 выполняет функции интеллектуального шлюза, связывая сенсорную сеть с внешними коммуникационными каналами. Он обеспечивает:

- преобразование аналоговых сигналов от датчиков в цифровую форму;
- анализ полученных данных в реальном времени;
- формирование управляющих команд для исполнительных устройств;
- передачу данных по протоколу MQTT или HTTP на облачную IoT-платформу.

Использование ESP32 позволяет реализовать автономный режим работы с возможностью беспроводной связи через Wi-Fi, LTE-модем или NB-IoT-модуль, подключаемый по интерфейсу UART.

На этом уровне осуществляется передача данных от микроконтроллера ESP32 к облачной платформе и диспетчерскому центру.

Для связи используются:

- LTE и NB-IoT - для передачи телеметрических данных в реальном времени;
- GPS - для определения местоположения и формирования маршрутов транспортировки;
- Спутниковая связь - при работе в удалённых регионах без покрытия сотовой сети.

Передаваемые данные включают текущие значения давления, температуры, координат и сообщений об утечках.

Данные, собранные ESP32 и переданные через сеть, поступают на облачную IoT-платформу, которая выполняет аналитическую обработку, хранение и визуализацию информации.

Платформа обеспечивает:

- анализ параметров транспортировки в реальном времени;
- прогнозирование аварийных ситуаций с использованием алгоритмов машинного обучения [Esen San et al., 2024];
- формирование уведомлений и отчётов для операторов;
- интеграцию с внешними системами управления (например, SCADA или ERP).

Таким образом, IoT-платформа играет роль интеллектуального уровня обработки, где данные, поступающие от ESP32, преобразуются в диагностическую и управленческую информацию.

На верхнем уровне осуществляется интеграция IoT-платформы с корпоративной системой управления предприятием (ERP, например SAP/С) и диспетчерским центром.

Здесь реализуются:

- централизованный контроль за транспортировкой биогаза;
- анализ эксплуатационных данных и формирование отчётов;
- принятие решений о техническом обслуживании или изменении маршрута;
- визуализация данных в виде графиков, таблиц и аналитических панелей.

Представленная система обеспечивает полную интеграцию всех уровней — от сенсоров и микроконтроллера ESP32 до IoT-платформы и ERP-системы предприятия. Такой подход позволяет:

- автоматизировать контроль транспортировки биогаза;

- повысить точность мониторинга и безопасность эксплуатации;
- снизить потери газа и затраты на обслуживание;
- реализовать предиктивную аналитику и интеллектуальное управление процессом.

Многоуровневая архитектура с использованием ESP32 является ключевым элементом в построении интеллектуальной системы транспортировки сжатого биогаза. Она обеспечивает надёжную связь между полевыми устройствами, облачной аналитикой и операторским управлением, что делает систему адаптивной, энергоэффективной и устойчивой к внешним воздействиям. [Igbayev et al., 2025]

### **Заключение**

Проведённое исследование подтвердило эффективность использования микроконтроллера ESP32 в составе интегрированной автоматизированной системы управления транспортировкой сжатого биогаза. Разработанная архитектура, основанная на технологиях Интернета вещей (IoT), продемонстрировала возможность создания интеллектуальной инфраструктуры, обеспечивающей высокий уровень безопасности, энергоэффективности и экологической устойчивости транспортного процесса.

Основные результаты работы включают:

- Снижение потерь биогаза на 25–30 % благодаря автоматическому регулированию давления и своевременному обнаружению утечек с помощью датчиков и алгоритмов обработки сигналов ESP32.

Сокращение энергозатрат на 15–20 % за счёт интеллектуального управления [Kalamaras et al., 2025] исполнительными механизмами (клапанами, вентиляцией) и оптимизации работы системы в зависимости от текущих условий.

Повышение точности диагностики и прогнозирования аномалий до 90–95 % за счёт интеграции IoT-платформы и алгоритмов машинного обучения [Esen San et al., 2024], анализирующих данные, поступающие от ESP32.

- Улучшение логистической эффективности на 20 % благодаря использованию GPS-модуля для мониторинга маршрутов и геолокации транспортных контейнеров.

Снижение выбросов метана [Erdei, Tamas, Illes, 2021] в атмосферу на 25 %, что повышает экологическую безопасность и устойчивость системы.

Разработанная система позволяет в реальном времени контролировать давление, температуру, утечки и вибрации, передавая данные на IoT-платформу и в диспетчерский центр для анализа и принятия решений. Использование ESP32 в качестве центрального микроконтроллера обеспечивает автономность работы, беспроводную связь (Wi-Fi, LTE, NB-IoT) и возможность масштабирования на различные типы транспортных систем.

Система реализует принципы интеллектуальной автоматизации:

- анализ параметров биогаза в динамике;
- автоматическое реагирование на аварийные ситуации;
- предиктивное предупреждение неисправностей;
- интеграцию с корпоративными и облачными платформами (ERP, SCADA).

Несмотря на достигнутые результаты, остаются направления для дальнейших исследований:

- совершенствование алгоритмов адаптивного управления для разных климатических и эксплуатационных условий;
- внедрение технологий блокчейн для защиты данных и улучшения кибербезопасности;

расширение функциональности IoT-платформы за счёт цифровых двойников и моделей машинного обучения [Esen San et al., 2024];

- масштабирование решения для промышленных транспортных комплексов с различной конфигурацией контейнеров и сенсорных систем.

Разработанная конструктивная модель контейнера с системой управления на базе ESP32 демонстрирует высокий уровень интеграции физических и цифровых компонентов. Контейнер, оснащённый датчиками давления, температуры, утечки и GPS, обеспечивает надёжную основу для безопасного хранения и транспортировки сжатого биогаза. Микроконтроллер ESP32, являясь центральным звеном автоматизации, выполняет функции сбора, анализа и передачи данных, управления исполнительными устройствами и взаимодействия с облачными сервисами.

Интеграция физического оборудования контейнера и цифровой IoT-платформы создает единую интеллектуальную систему, способную не только отслеживать и регулировать параметры биогаза, но и прогнозировать возможные риски. Такой подход соответствует современным стандартам «умных» энергетических технологий и обеспечивает техническую, экономическую и экологическую эффективность транспортировки биогаза.

Сочетание инженерного проектирования контейнера и встроенной системы управления на базе микроконтроллера ESP32 формирует единую, безопасную и адаптивную платформу транспортировки сжатого биогаза. Такой подход обеспечивает комплексное взаимодействие аппаратных и программных компонентов, повышая надежность, точность мониторинга и быстроту реакции системы. Реализованная архитектура соответствует современным стандартам автоматизации и функциональной безопасности, объединяя инженерную эффективность с экологической устойчивостью транспортных технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Cinar, 2021 — Cinar, S., Cinar, S.O., Wieczorek, N., Sohoo, I., Kuchta, K. Интеграция искусственного интеллекта в работу биогазовой установки // *Processes*. — 2021. — 9, 85. <https://doi.org/10.3390/pr9010085> [Eng.]
- Есен Сан и др., 2024 — Есен Сан, Х.-Л. Дай, Х. Моаеди, Б. Нгуен Ле, Р. Мухаммад Аднан. Прогнозирование устойчивого производства биогаза из отходов с использованием современных методов машинного обучения и метаэвристики // *Fuel*. — 2024. — Том 355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129493> [Russ.]
- Erdei, Tamás, Illés, 2021 — Erdei, L., Tamás, P., Illés, B. Применение интеллектуальных транспортных систем в логистике // *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*. — 2021. — 14(2). — С. 21–30. <https://doi.org/10.32971/als.2020.011> [Eng.]
- Sarp и др., 2024 — Sarp, S., Kuzlu, M., Jovanovic, V. и др. Цифровизация железнодорожного транспорта с использованием сервисов на базе ИИ: цифровые двойники поездов // *European Transport Research Review*. — 2024. — 16, 58. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5> [Eng.]
- Janušová, Čičmancová, 2016 — Janušová, L., Čičmancová, S. Повышение безопасности транспортировки с использованием интеллектуальных транспортных систем // *Procedia Engineering*. — 2016. — 134. — С. 14–22. [https://www.researchgate.net/publication/293195159\\_Improving\\_Safety\\_of\\_Transportation\\_by\\_Using\\_Intelligent\\_Transport\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/293195159_Improving_Safety_of_Transportation_by_Using_Intelligent_Transport_Systems) [Eng.]
- Kalamaras и др., 2025 — Kalamaras, S.D., Tsitsimpikou, M.-A., Tzenos, C.A., Lithourgidis, A.A., Pitsikoglou, D.S., Kotsopoulos, T.A. Низкозатратная IoT-система на базе микроконтроллера ESP32 для эффективного мониторинга пилотного анаэробного биогазового реактора // *Applied Sciences*. — 2025. — 15, 34. <https://doi.org/10.3390/app15010034> [Eng.]
- Mysior, Stępień, Koziółek, 2020 — Mysior, M., Stępień, P., Koziółek, S. Моделирование и экспериментальная проверка сжатия и хранения сырого биогаза // *Processes*. — 2020. — 8, 1556. <https://doi.org/10.3390/pr8121556>[Eng.]
- Franklin Oliveira и др., 2024 — Franklin Oliveira, D.G., Costa, D.G., Asis, F., Silva, I. Интернет интеллектуальных вещей: конвергенция встроенных систем, периферийных вычислений и машинного обучения // *Internet veshchey*. — 2024. — 26. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101153> [Russ.]
- Herzog и др., 2023 — Herzog, D., Lerher, T., Truntic, M., Tezak, O. Проектирование и реализация устройств Интернета вещей на базе ESP32 // *Sensors*. — 2023. — 23, 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739> [Russ.]
- Амиргалиев, Мерембаев, Рудаков, 2024 — Амиргалиев, Е., Мерембаев, Т., Рудаков, В. Разработка приложения для визуализации и моделирования влияния повышения давления на состав газа при компримировании // *Вестник КазАТК*. — 2024. — 134(5). — С. 124–133. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-124-133>[Russ.]
- Игибаев и др., 2025 — Игибаев, К., Ауельбеков, О., Оралбекова, А., Козбакова, А. Исследование методов автоматизации и искусственного интеллекта для оптимизации транспортировки биогаза // *Вестник КазАТК*. — 2025. — 137(2). — С. 325–334. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-137-2-325-334> [Russ.]
- Auelbekov, Kozbakova, Iqibayev, Yessentaev, 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kuanyshbek Iqibayev, Kairat Yessentaev. Разработка IoT-системы для мониторинга работы биогазовой установки. Preprints. — 2025. <https://www.preprints.org/manuscript/202507.0368/v1> [Eng.]

Auelbekov и др., 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kairat Yessentayev, Timur Merembayev, Kuanyshbek Igibayev. Интеграция математического моделирования и искусственного интеллекта для прогнозирования тепловых условий и оптимизации работы биогазовых установок // *Engineering Science*. — 2025. — 36, 1603. <https://dx.doi.org/10.30919/es1603> [Eng.]

#### REFERENCES

Cinar, 2021 — Cinar, S., Cinar, S.O., Wiczorek, N., Sohoó, I., Kuchta, K. (2021). Integration of Artificial Intelligence into Biogas Plant Operation // *Processes*. — 9, 85. <https://doi.org/10.3390/pr9010085> [in Eng.]

Esen San et al., 2024 — Esen San, H.-L., Dai, H., Moaedi, H., Nguyen Le, B., Muhammad Adnan, R. (2024). Prognozovanie ustoychivogo proizvodstva biogaza iz otkhodov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov mashinnogo obucheniya i metaevristiki // *Fuel*. — Vol. 355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129493> [in Russ.]

Erdei, Tamas, Illes, 2021 — Erdei, L., Tamas, P., Illes, B. (2021). Application of intelligent transportation systems in logistics // *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*. — 14(2). — Pp. 21–30. <https://doi.org/10.32971/als.2020.011> [in Eng.]

Sarp et al., 2024 — Sarp, S., Kuzlu, M., Jovanovic, V. et al. (2024). Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains // *European Transport Research Review*. — 16, 58. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5> [in Eng.]

Janusova, Cimancova, 2016 — Janušová, L., Čičmancová, S. (2016). Improving Safety of Transportation by Using Intelligent Transport Systems // *Procedia Engineering*. — 134. — Pp. 14–22. [https://www.researchgate.net/publication/293195159\\_Improving\\_Safety\\_of\\_Transportation\\_by\\_Using\\_Intelligent\\_Transport\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/293195159_Improving_Safety_of_Transportation_by_Using_Intelligent_Transport_Systems) [in Eng.]

Kalamaras et al., 2025 — Kalamaras, S.D., Tsitsimpikou, M.-A., Tzenos, C.A., Lithourgidis, A.A., Pitsikoglou, D.S., Kotsopoulos, T.A. (2025). A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor // *Applied Sciences*. — 15, 34. <https://doi.org/10.3390/app15010034> [in Eng.]

Mysior, Stepien, Koziollek, 2020 — Mysior, M., Stępień, P., Koziółek, S. (2020). Modeling and Experimental Validation of Compression and Storage of Raw Biogas // *Processes*. — 8, 1556. <https://doi.org/10.3390/pr8121556> [in Eng.]

Franklin Oliveira et al., 2024 — Franklin Oliveira, D.G., Costa, D.G., Asis, F., Silva, I. (2024). Internet intellektual'nykh veshchey: konvergentsiya vstroennykh sistem, periferijnykh vychislennykh resheniy i mashinnogo obucheniya // *Internet veshchey*. — 26. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101153> [in Russ.]

Herzog et al., 2023 — Herzog, D., Lerher, T., Truntic, M., Tezak, O. (2023). Proektirovanie i realizatsiya ustroystv Interneta veshchey na baze ESP32 // *Sensors*. — 23, 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739> [in Russ.]

Amirgaliev, Merembaev, Rudakov, 2024 — Amirgaliev, E., Merembaev, T., Rudakov, V. (2024). Razrabotka prilozheniya dlya vizualizatsii i modelirovaniya vliyaniya povysheniya davleniya na sostav gaza pri komprimirovanii // *Vestnik KazATK*. — 134(5). — P. 124–133. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-134-5-124-133> [in Russ.]

Igibayev et al., 2025 — Igibayev, K., Auyelbekov, O., Oralbekova, A., Kozbakova, A. (2025). Research of automation and artificial intelligence methods for optimizing biogas transportation // *Vestnik KazATK*. — 137(2). — Pp. 325–334. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-137-2-325-334> [in Russ.]

Auelbekov, Kozbakova, Igibayev, Yessentaev, 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kuanyshbek Igibayev, Kairat Yessentaev (2025). Development of an IoT System for Monitoring the Operation of a Biogas Plant. Preprints. <https://www.preprints.org/manuscript/202507.0368/v1> [in Eng.]

Auelbekov et al., 2025 — Omirlan Auelbekov, Ainur Kozbakova, Kairat Yessentayev, Timur Merembayev, Kuanyshbek Igibayev (2025). Integration of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence to Predict Thermal Conditions and Optimize the Operation of Biogas Plants // *Engineering Science*. — 36, 1603. <https://dx.doi.org/10.30919/es1603> [in Eng.]

**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 14.06.2024. Формат 60x84 1/8. Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс» .

Печать RISO. Объем 10,3 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.