

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

Industrial Transport of Kazakhstan

ISSN 1814-5787 (print)

ISSN 3006-0273 (online)

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

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

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

UDC / УДК / ЭОЖ 625.161:656.25:004.9

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

*A.E. Kassymova**

M. Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan.

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

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

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

© A.E. Kassymova

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



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

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

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

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

*A.E. Касымова**

АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Қазақстан.

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

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

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

© А.Е. Касымова

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

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

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

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

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

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

*А.Е. Касымова**

АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

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

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

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

© А.Е. Касымова

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

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

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

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

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

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

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

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

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

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

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

Задачи исследования:

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

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

Материалы и методы.

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

Применены следующие методы исследования:

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

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

Результаты исследования.

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

К основным автоматическим ограждающим устройствам дистанции относятся:

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

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

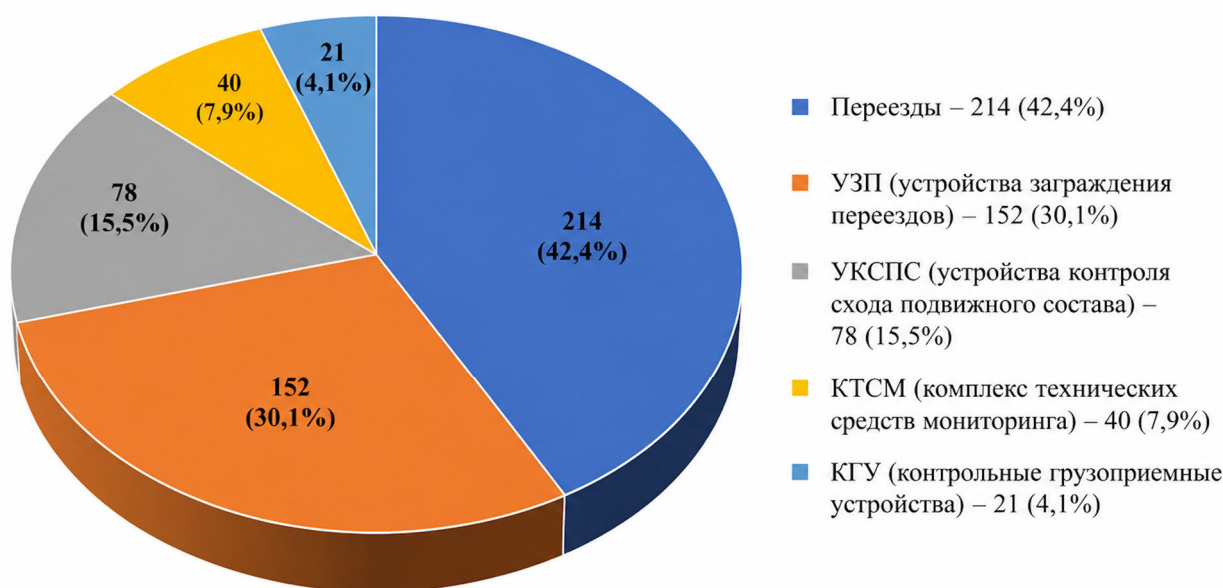


Рис. 1. Соотношение ограждающих устройств, дислоцированных на базе Алматинской дистанции сигнализации и связи

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

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

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

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

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

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

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

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

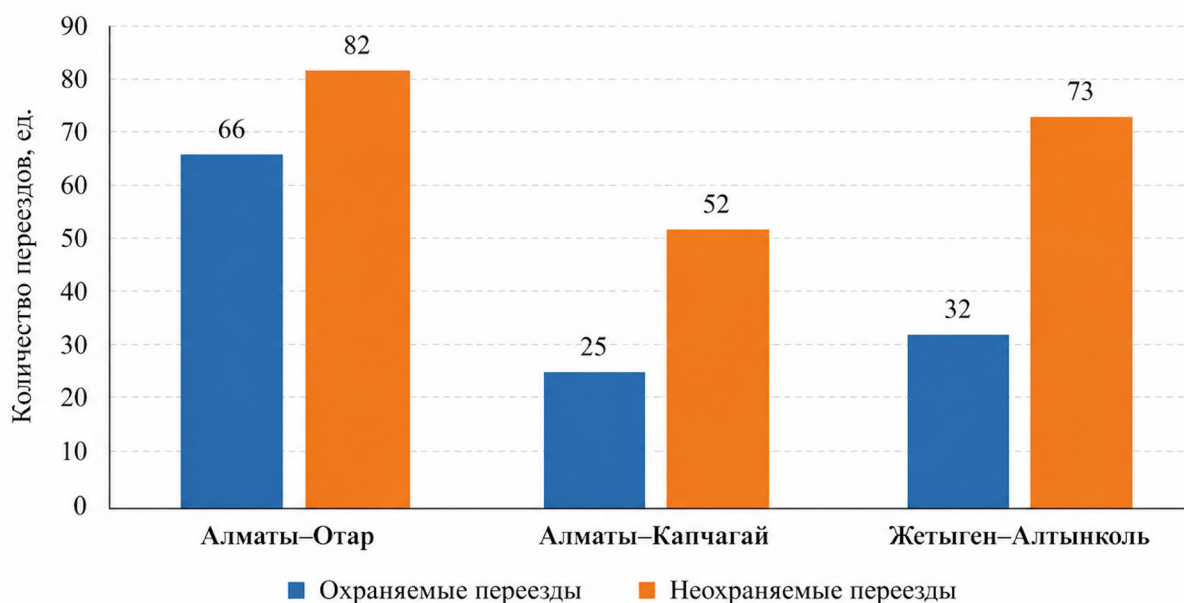


Рис. 2. Количество охраняемых и неохранных переездов по Алматинской дистанции СиС в разрезе обслуживаемых участков

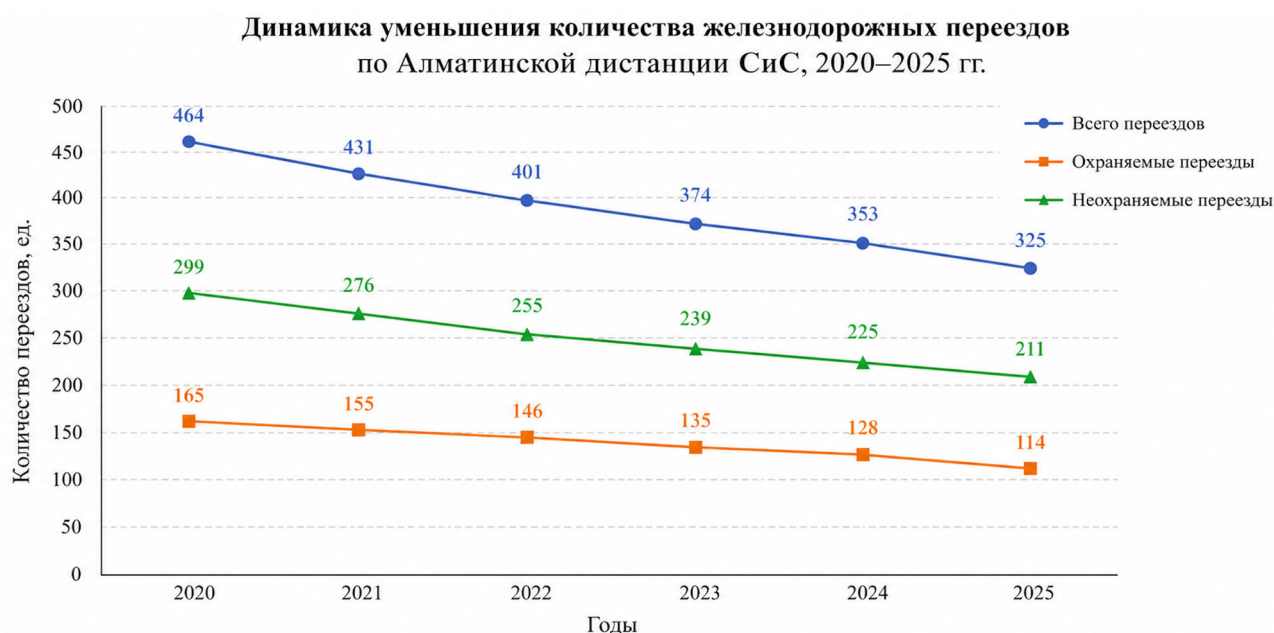


Рис. 3. Динамика уменьшения количества железнодорожных переездов по Алматинской дистанции СпС, 2020–2025 гг.

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

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

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

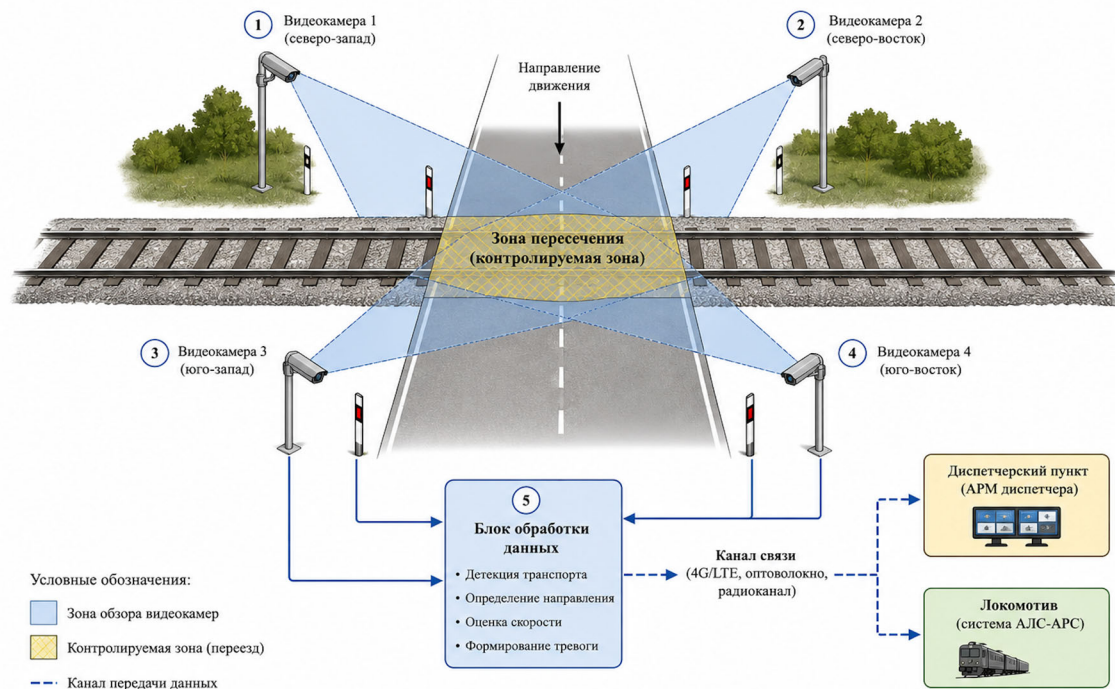


Рис. 4. Схема установки системы видеонаблюдения на неохраняемом переезде

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



Рис. 5. Схема установки зеркал на переезде

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

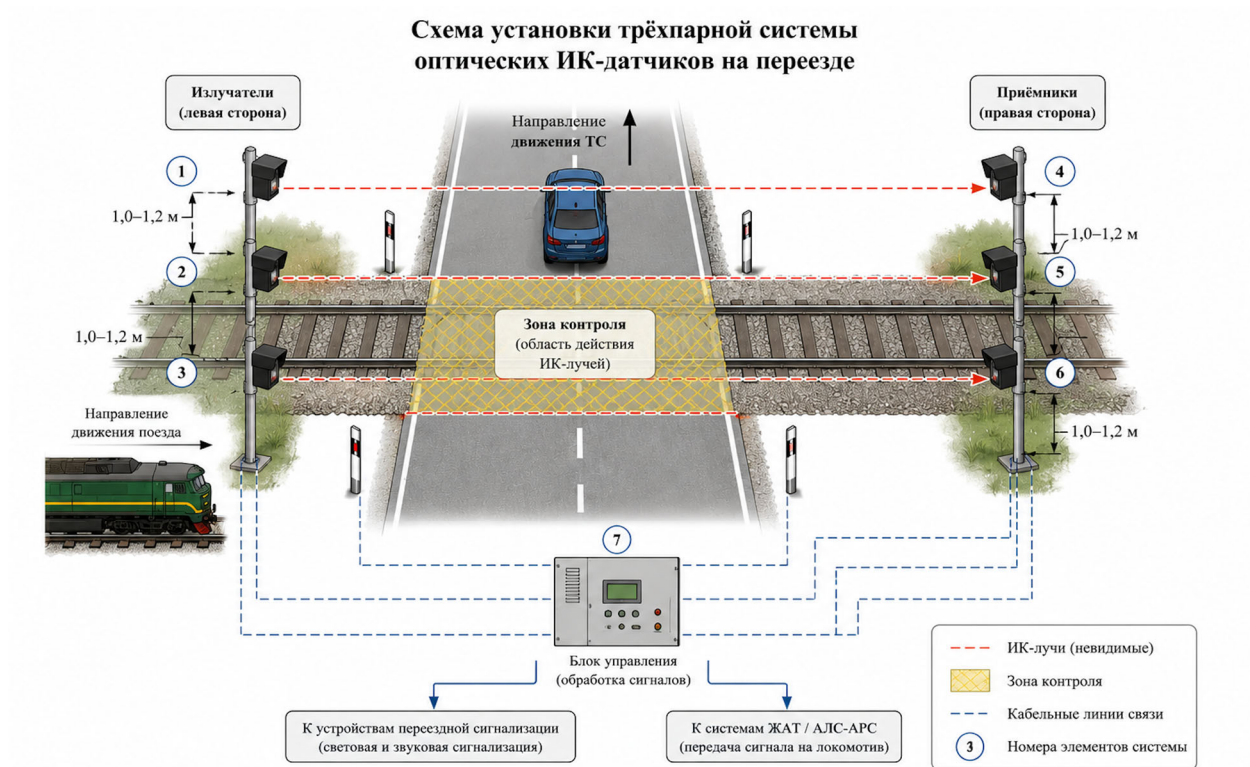


Рис. 6. Схема установки трёхпарной системы оптических ИК-датчиков на переезде

По последовательности перекрытия инфракрасных лучей блок управления определяет:

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

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

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

- длину транспортного средства $L_{ТС}$:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таблица 3 – Сравнительная оценка технических решений для неохранных переездов

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

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

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

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

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

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



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

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

Заключение.

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

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

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

ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

REFERENCES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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