Статья поступила в редакцию: 18.09.2026
Статья принята к публикации: 19.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 656.2.08:621.39

Повышение безопасности путевых работников на основе технологий железнодорожной мобильной связи и принципа ALARP

Яронова Наталья Валерьевна
канд. техн. наук, доц.
Ташкентский государственный транспортный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: yaronovanatalya@gmail.com

Кудайбергенов Нурлан Жанабергенович
магистрант
Ташкентский государственный транспортный университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: nurlan2162@gmail.com

Enhancing the safety of railway track workers through railway mobile communication technologies and the ALARP principle

Yaronova Natalya Valeryevna
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Transport University
Uzbekistan, Tashkent

Kudaybergenov Nurlan Janabergenovich
master's Student
Tashkent State Transport University
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования является повышение безопасности работников железнодорожного транспорта на основе применения принципа ALARP (As Low As Reasonably Practicable) и современных технологий мобильной связи GSM-R, LTE-R и FRMCS. В работе рассмотрены существующие подходы к управлению производственными рисками на объектах железнодорожной инфраструктуры и предложена концепция мобильной системы оповещения персонала, обеспечивающей своевременное предупреждение о возникновении опасных ситуаций. Методология исследования основана на риск-ориентированном подходе и включает разработку математической модели интегральной оценки риска с учётом вероятности опасного события, тяжести его последствий и коэффициента влияния технологического процесса, характеризующего отклонение параметров выполняемых работ

Библиографическое описание: Яронова Н.В., Кудайбергенов Н.Ж. Повышение безопасности путевых работников на основе технологий железнодорожной мобильной связи и принципа ALARP // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23445

от нормативных значений. Для оценки эффективности предложенного решения выполнено моделирование условий проведения путевых работ с использованием разработанного алгоритма оценки риска. Полученные результаты показали, что при внедрении мобильной системы оповещения интегральный показатель риска снижается с 0,54 до 0,46, что соответствует уменьшению уровня риска примерно на 15 %. Установлено, что использование технологий LTE-R и FRMCS позволяет повысить оперативность передачи предупреждений и точность определения местоположения работников. Результаты исследования подтверждают эффективность применения принципа ALARP и современных мобильных технологий связи для предупреждения производственного травматизма на железнодорожном транспорте.

Abstract

The purpose of this study is to improve the safety of railway workers through the application of the ALARP (As Low As Reasonably Practicable) principle and modern railway mobile communication technologies, including GSM-R, LTE-R, and FRMCS. The paper examines existing approaches to occupational risk management in railway infrastructure and proposes a mobile warning system designed to provide timely alerts about hazardous situations. The research methodology is based on a risk-oriented approach and includes the development of a mathematical model for integrated risk assessment that considers the probability of hazardous events, the severity of their consequences, and a technological process influence coefficient reflecting deviations of operational parameters from regulatory requirements. To evaluate the effectiveness of the proposed solution, a simulation of railway track maintenance activities was conducted using the developed risk assessment algorithm. The results demonstrate that the implementation of the mobile warning system reduces the integrated risk indicator from 0.54 to 0.46, corresponding to an approximately 15 % reduction in risk level. It was also established that LTE-R and FRMCS technologies improve the speed of warning message delivery and the accuracy of worker location tracking. The findings confirm the effectiveness of combining the ALARP principle with advanced mobile communication technologies to reduce occupational hazards and enhance safety in railway operations.

Ключевые слова: ALARP, безопасность труда, железнодорожный транспорт, мобильная система оповещения, FRMCS, LTE-R, GSM-R, управление рисками, производственная безопасность, технологический процесс, радиоэлектронные системы, мониторинг.

Keywords: ALARP, occupational safety, railway transport, mobile warning system, FRMCS, LTE-R, GSM-R, risk management, industrial safety, technological process, radio electronic systems, monitoring.

Введение

Железнодорожный транспорт является одной из важнейших отраслей экономики, обеспечивающей безопасную и бесперебойную перевозку пассажиров и грузов. Вместе с тем объекты железнодорожной инфраструктуры относятся к категории повышенной опасности, поскольку выполнение работ по техническому обслуживанию и ремонту пути, устройств сигнализации и связи, систем электроснабжения и других элементов инфраструктуры связано с воздействием множества производственных рисков. К основным опасным

факторам относятся движение подвижного состава, ограниченная видимость, человеческий фактор, нарушение технологических процессов, а также недостаточное время предупреждения работников о приближении поезда.

В современных условиях обеспечение безопасности труда на железнодорожном транспорте основывается на риск-ориентированном подходе, предусматривающем выявление, анализ и снижение уровня риска до приемлемых значений. Одним из наиболее распространённых международных подходов к управлению рисками является принцип ALARP (As Low As Reasonably Practicable – «настолько низкий уровень риска, насколько это практически достижимо»). Данный принцип предполагает снижение риска до такого уровня, при котором дальнейшее уменьшение становится экономически или технически нецелесообразным по сравнению с получаемым эффектом повышения безопасности. В железнодорожной отрасли концепция ALARP широко применяется при оценке безопасности инфраструктуры, технических систем и производственных процессов [6].

Развитие цифровых технологий и современных средств связи открывает новые возможности для повышения уровня безопасности работников железнодорожного транспорта. В последние годы активно внедряются системы мобильной связи нового поколения, включая LTE-R, 5G и перспективную систему железнодорожной связи FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), предназначенную для обеспечения надёжного и оперативного обмена данными между объектами железнодорожной инфраструктуры, подвижным составом и обслуживающим персоналом. Использование данных технологий позволяет организовать передачу предупреждающих сообщений в режиме реального времени, осуществлять мониторинг местоположения работников и контролировать их нахождение в опасных зонах.

Особую актуальность данная задача приобретает для железных дорог Узбекистана, где проводится масштабная модернизация транспортной инфраструктуры и внедрение современных информационно-коммуникационных технологий. Несмотря на существующие организационные и технические меры обеспечения безопасности, сохраняется необходимость дальнейшего снижения производственного травматизма и предотвращения происшествий, связанных с выполнением работ вблизи железнодорожных путей и движущегося подвижного состава.

В связи с этим перспективным направлением является разработка мобильной системы предупреждения работников железнодорожного транспорта, функционирующей на основе принципа ALARP и современных технологий беспроводной связи. Применение такой системы позволит своевременно информировать персонал о возникновении опасных ситуаций, повысить оперативность реагирования и обеспечить дополнительный уровень защиты работников при выполнении производственных задач [8].

Обзор литературы и существующих решений

В ряде исследований отмечается, что применение ALARP позволяет не только количественно оценивать уровень риска, но и обосновывать необходимость внедрения дополнительных технических и организационных мер безопасности. Особое внимание

уделяется защите работников, выполняющих работы на железнодорожных путях, поскольку именно эта категория персонала подвергается наибольшему воздействию опасных производственных факторов.

В рамках европейского проекта ALARP была предложена автоматическая система предупреждения путевых работников (Automatic Track Warning System – ATWS), основанная на использовании персональных мобильных терминалов. Система обеспечивает передачу предупреждений о приближении поездов, контроль местоположения работников и мониторинг состояния оборудования в режиме реального времени [7].

На протяжении последних двух десятилетий основой железнодорожной радиосвязи во многих странах мира является технология GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway). Данная система разработана на базе стандарта GSM и адаптирована для решения специфических задач железнодорожного транспорта. GSM-R обеспечивает голосовую связь между машинистами, диспетчерами и эксплуатационным персоналом, а также передачу данных для систем управления движением поездов ETCS и ERTMS. К основным преимуществам GSM-R относятся высокая надёжность, поддержка групповых вызовов, приоритетная обработка аварийных сообщений и устойчивое функционирование при скоростях движения поездов до 500 км/ч. Однако ограниченная пропускная способность сети и использование технологий второго поколения не позволяют в полной мере удовлетворять требованиям современных цифровых железных дорог. Кроме того, GSM-R ориентирована преимущественно на передачу голосовых сообщений и небольших объёмов данных, что затрудняет внедрение сервисов видеонаблюдения, мониторинга в реальном времени и интеллектуальных систем поддержки принятия решений. В связи с этим в последние годы активно ведётся поиск технологий следующего поколения для железнодорожной отрасли.

Одним из направлений модернизации железнодорожной радиосвязи стала технология LTE-R (Long Term Evolution for Railway), основанная на стандартах сетей четвёртого поколения. Использование LTE-R обеспечивает существенное увеличение скорости передачи данных, снижение задержек и возможность организации широкополосных сервисов связи. Преимуществами LTE-R являются поддержка видеопотоков высокой чёткости, удалённого мониторинга инфраструктуры, передачи телеметрической информации и взаимодействия между различными элементами железнодорожной системы в режиме реального времени. Данная технология получила практическое применение в ряде стран, включая Южную Корею, где LTE-R рассматривается как основа цифровой железной дороги нового поколения [11].

Несмотря на значительные преимущества по сравнению с GSM-R, технология LTE-R рассматривается в качестве переходного решения, поскольку дальнейшее развитие железнодорожной связи связано с внедрением архитектуры пятого поколения и концепции FRMCS.

Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) является перспективной международной системой железнодорожной связи, разрабатываемой Международным союзом железных дорог (UIC) как преемник GSM-R. Основу FRMCS составляют технологии 5G, обеспечивающие сверхнадёжную связь с малой задержкой, поддержку большого количества устройств и высокую скорость передачи данных. В отличие от GSM-R, новая система ориентирована не только на обеспечение голосовой связи и передачу сигналов

управления движением поездов, но и на поддержку интеллектуальных сервисов мониторинга инфраструктуры, видеонаблюдения, автоматизации процессов обслуживания, интернета вещей и систем обеспечения безопасности персонала. Особое значение FRMCS имеет для реализации концепции цифровой железной дороги, в которой все объекты инфраструктуры объединяются в единую информационную среду. Это создаёт предпосылки для внедрения персональных мобильных систем предупреждения работников, функционирующих в режиме реального времени и обеспечивающих оперативное реагирование на возникновение опасных ситуаций [10].

Анализ существующих решений показывает, что в настоящее время для защиты работников железнодорожной инфраструктуры используются организационные, технические и автоматизированные методы предупреждения опасных ситуаций.

К традиционным решениям относятся визуальные и звуковые сигналы, переносные средства оповещения и выделение специальных наблюдателей, контролирующих приближение поездов. Однако эффективность таких методов во многом зависит от человеческого фактора и условий окружающей среды. Более современным направлением являются автоматические системы предупреждения путевых работников (ATWS), использующие датчики обнаружения поездов, беспроводные каналы передачи данных и персональные устройства оповещения. Такие системы позволяют автоматически формировать предупреждения и передавать их непосредственно работникам, находящимся в опасной зоне.

Материалы и методы исследования

Основной задачей системы является своевременное информирование персонала о возникновении потенциально опасных событий и снижение вероятности травматизма при выполнении работ на железнодорожной инфраструктуре.

В состав системы входят следующие основные элементы: диспетчерский сервер мониторинга безопасности; мобильные терминалы работников; модуль определения местоположения (GPS/ГЛОНАСС); базовая станция сети GSM-R, LTE-R или FRMCS; база данных технологических процессов; модуль оценки риска и принятия решений. Система осуществляет непрерывный сбор данных о местоположении работников, параметрах движения поездов, характеристиках выполняемых работ и внешних условиях. На основании полученной информации рассчитывается уровень риска и формируются предупреждающие сообщения, передаваемые на мобильные устройства персонала. Структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке 1.

В соответствии с концепцией ALARP риск рассматривается как функция вероятности возникновения опасного события и тяжести его последствий. Базовая оценка риска определяется выражением:

$$R = P \cdot C,$$

где R – уровень риска; P– вероятность возникновения опасного события; C – тяжесть возможных последствий [1].

Полученное значение сравнивается с установленными пороговыми уровнями риска: допустимый риск; зона ALARP; недопустимый риск.

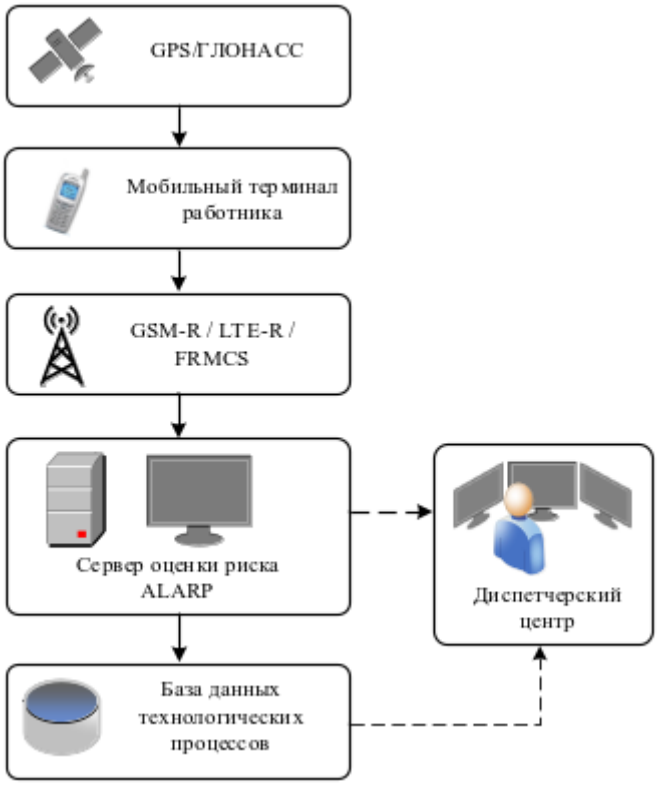

Рисунок 1. Структурная схема системы мобильного оповещения работников железнодорожного транспорта

Если рассчитанный риск попадает в зону ALARP, система анализирует возможность внедрения дополнительных технических мероприятий по его снижению. Однако для железнодорожного транспорта вероятность возникновения опасного события зависит не только от внешних факторов, но и от особенностей выполняемого технологического процесса. Поэтому в работе предлагается дополнительно учитывать коэффициент влияния технологического процесса. Для количественной оценки воздействия технологического процесса на безопасность вводится коэффициент влияния технологического процесса $K_{\text{ТП}}$. Данный коэффициент характеризует степень отклонения параметров выполняемого технологического процесса от нормативных значений и определяется выражением:

$$K_{\text{ТП}} = \frac{\Delta X}{X_{\text{норм}}},$$

где $K_{\text{ТП}}$ – коэффициент влияния технологического процесса; ΔX - абсолютное отклонение контролируемого параметра от нормативного значения; $X_{\text{норм}}$ –нормативное значение параметра [3].

В качестве контролируемых параметров могут использоваться: время нахождения работника в опасной зоне; расстояние до движущегося подвижного состава; количество работников на участке; уровень радиосвязи; соблюдение требований технологического регламента.

При полном соответствии технологического процесса нормативным требованиям коэффициент стремится к нулю: $K_{\text{ТП}} \to 0$. Увеличение отклонений приводит к росту значения коэффициента и, соответственно, к повышению уровня риска. Для учёта особенностей технологического процесса предлагается использовать интегральный показатель риска:

$$R_{ALARP} = w_1 P + w_2 C + w_3 K_{\text{ТП}},$$

где R_{ALARP} – интегральный показатель риска; P – вероятность опасного события; C – тяжесть последствий; $K_{\text{ТП}}$ – коэффициент влияния технологического процесса; w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты удовлетворяют условию:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad .$$

Предлагаемая модель позволяет учитывать не только вероятность и последствия опасного события, но и влияние конкретных условий выполнения работ [9].

Работа системы мобильного оповещения осуществляется в следующей последовательности (рис. 2):

1. Получение координат работников и поездов.
2. Сбор данных о параметрах технологического процесса.
3. Расчёт коэффициента $K_{\text{ТП}}$.
4. Определение вероятности опасного события P.
5. Оценка тяжести возможных последствий C.
6. Расчёт интегрального показателя риска R_{ALARP}.
7. Сравнение полученного значения с установленными порогами безопасности.
8. Формирование предупреждающего сообщения.
9. Передача уведомления на мобильные терминалы работников и диспетчера [4].

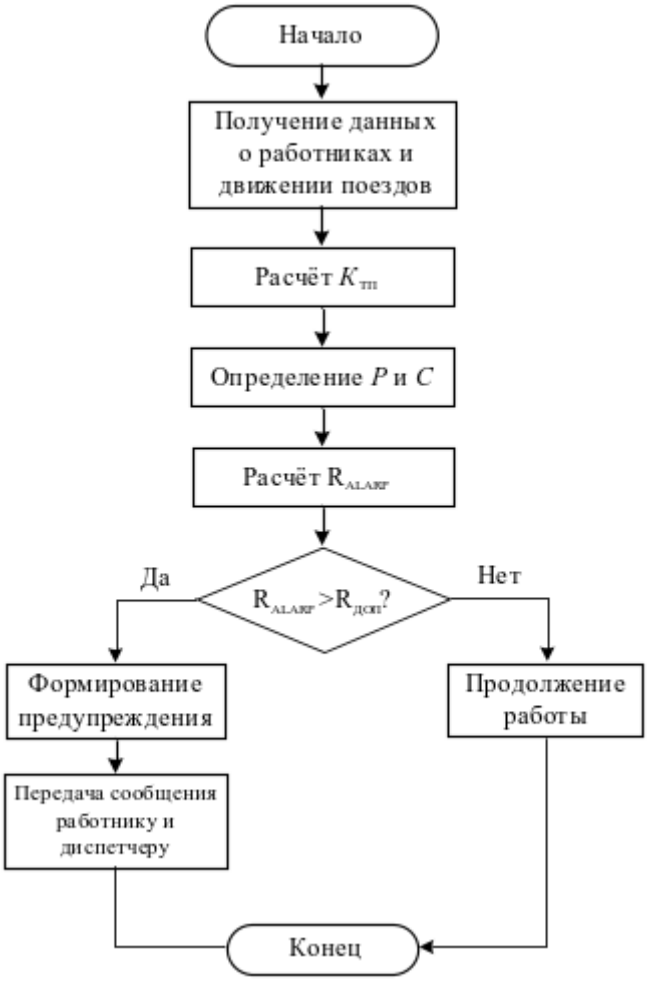

Рисунок 2. Алгоритм оценки риска на основе принципа ALARP

Результаты моделирования и обсуждение

Для оценки эффективности предлагаемой системы мобильного оповещения было проведено моделирование условий выполнения путевых работ на железнодорожном участке. В качестве исходных данных рассматривались следующие факторы: вероятность возникновения опасной ситуации при выполнении работ на пути; тяжесть возможных последствий; отклонения параметров технологического процесса от нормативных значений; наличие или отсутствие системы мобильного оповещения.

В качестве примера рассмотрим выполнение ремонтных работ вблизи действующего железнодорожного пути. Нормативное время нахождения работника в опасной зоне составляет: $X_{норм} = 10$ мин. Фактическое время выполнения работ: $X_{факт} = 14$ мин. Тогда отклонение от нормативного значения составит: $\Delta X = X_{факт} - X_{норм} = 14 - 10 = 4$. Коэффициент влияния технологического процесса определяется: $K_{ТП} = \frac{\Delta X}{X_{норм}} = \frac{4}{10} = 0,4$. Полученное значение показывают о наличии отклонений технологического процесса, способных увеличить уровень производственного риска [5].

Для проведения расчётов примем следующие значения параметров: $P = 0,35$, $C = 0,80$, $K_{ТП} = 0,40$, $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,4$, $w_3 = 0,2$. Интегральный показатель риска составит: $R_{ALARP} = 0,4 \cdot 0,35 + 0,4 \cdot 0,80 + 0,2 \cdot 0,40 = 0,54$. Полученное значение соответствует зоне ALARP и требует реализации дополнительных мер по снижению риска.

После внедрения мобильной системы оповещения вероятность опасного события уменьшается: $P = 0,15$. Тогда $R_{ALARP} = 0,4 \cdot 0,15 + 0,4 \cdot 0,80 + 0,2 \cdot 0,40 = 0,46$. Применение системы позволяет перевести риск в область допустимых значений. Все значения представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Классификация уровней риска

Значение риска	Уровень риска	Необходимые действия
0–0,30	Допустимый	Дополнительные меры не требуются
0,31–0,60	Зона ALARP	Необходимо снижение риска
Более 0,60	Недопустимый	Выполнение работ запрещается

Таблица 2. Результаты оценки риска

Показатель	Без системы	С системой
Вероятность события P	0,35	0,15
Тяжесть последствий C	0,80	0,80
Коэффициент КТП	0,40	0,40
Интегральный риск RALARP	0,54	0,46

Относительное снижение риска определяется выражением:

$$E = \frac{R_{\text{до}} - R_{\text{после}}}{R_{\text{до}}} \cdot 100\% = \frac{0,54 - 0,46}{0,54} \cdot 100\% = 14,8\%.$$

Следовательно, использование предлагаемой системы мобильного оповещения обеспечивает снижение интегрального уровня риска приблизительно на 15 %. При увеличении числа контролируемых параметров и использовании технологий LTE-R или FRMCS эффективность системы может быть ещё выше за счёт уменьшения времени доставки предупреждений и повышения точности определения местоположения работников [2].

Заключение

В работе рассмотрены возможности применения принципа ALARP для повышения безопасности работников железнодорожного транспорта с использованием современных технологий мобильной связи. Проведён анализ существующих подходов к обеспечению безопасности путевого персонала, а также исследованы возможности использования железнодорожных систем связи GSM-R, LTE-R и перспективной технологии FRMCS для организации оперативного обмена информацией между работниками и диспетчерскими центрами.

Предложена концепция мобильной системы оповещения работников железнодорожного транспорта, основанная на непрерывном мониторинге производственной обстановки и динамической оценке риска. В отличие от традиционных методов предупреждения опасных ситуаций, предлагаемое решение предусматривает автоматизированный анализ параметров выполняемого технологического процесса, определение уровня риска и передачу

предупреждающих сообщений непосредственно на мобильные терминалы персонала. Для учёта особенностей выполнения работ введён коэффициент влияния технологического процесса, позволяющий количественно оценивать отклонение контролируемых параметров от нормативных значений. На основе принципа ALARP разработана интегральная модель риска, учитывающая вероятность возникновения опасного события, тяжесть его последствий и влияние технологического процесса на уровень безопасности. Результаты моделирования показали, что использование предлагаемой системы мобильного оповещения позволяет снизить интегральный показатель риска примерно на 15 % по сравнению с традиционной организацией работ. Полученные результаты подтверждают эффективность применения риск-ориентированного подхода и современных мобильных технологий связи для предупреждения происшествий на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. 3GPP. Use of 3GPP Technologies by Railways. Release 19. – Sophia Antipolis: 3GPP, 2024.
2. Capgemini Engineering. Future Railway Mobile Communication Systems: Position Paper. – Paris: Capgemini Engineering, 2023. – 28 P.
3. Daw S., Grace D., Taylor D. Migrating from GSM-R to FRMCS // Rail Engineer. – 2023. – № 206. – P. 34–41.
4. EN 50126-1:2017+A1:2021. Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Generic RAMS Process. – Brussels: CENELEC, 2021.
5. EN 50126-2:2017+A1:2021. Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 2: Systems Approach to Safety. – Brussels: CENELEC, 2021.
6. Ferrari A. ter Beek M.H. Formal Methods in Railways: A Systematic Mapping Study // ACM Computing Surveys. – 2022. – T. 55, № 4. – P. 1–37. – DOI: 10.1145/3520480.
7. Habib A., El Falou A., Langlais C., Berbineau M. Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Railway Communications: A Survey // IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2307.04438.
8. Hu J., Liu G., Li Y., Ma Z., Wang W., Liang C., Yu F.R., Fan P. Off-Network Communications for Future Railway Mobile Communication Systems: Challenges and Opportunities // IEEE Communications Magazine. – 2022. – T. 60, № 10. – P. 64–70. – DOI: 10.1109/MCOM.001.2101081.
9. IEC 62278-2:2025. Railway Applications – Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 2: Systems Approach to Safety. – Geneva: IEC, 2025.
10. International Union of Railways (UIC). FRMCS – Future Railway Mobile Communication System. – Paris: UIC, 2023.
11. Liu C., He R., Niu Y., Han Z., Gao M., Ma Z., Wang G., Zhong Z. Reconfigurable Intelligent Surface Assisted High-Speed Train Communications: Coverage Performance Analysis and Placement Optimization // IEEE Access. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2310.12429.