4 *Маликова, Т. Е.* Имитационная модель престакинга на контейнерном терминале морского порта / Т. Е. Маликова, Е. Е. Петрова // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2024. – № 3. – С. 379–390.

5 *Кузнецов, А. Л.* Моделирование погрузоразгрузочных работ на контейнерном терминале / А. Л. Кузнецов, Е. А. Давыденко // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 205–207.

6 *Малышев, Н. В.* К вопросу роботизации тыловых контейнерных терминалов / Н. В. Малышев, Е. К. Коровяковский // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 1. – С. 15–25.

7 *Кекиш, Н. А.* Согласование критериев и наборов исходных данных при создании модели оптимальной обработки контейнеров на терминале / Н. А. Кекиш, В. Г. Пищик // Известия Транссиба. – 2025. – № 1. – С. 68–77.

8 *Пищик, В. Г.* Теоретическое обоснование зонирования контейнерного терминала по степени надежности прогнозирования технологической цепочки обработки / В. Г. Пищик // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2023. – № 1. – С. 157–165.

V. G. PISHCHIC

MODELING OF CONTAINER TERMINAL OPERATION: OPTIMIZATION ALGORITHMS AND PROCESS MANAGEMENT

The article addresses the relevant problem of improving the efficiency of container terminals amidst growing cargo flow volatility. The study identifies the key challenge of synchronizing the work all terminal subsystems. As a solution, a comprehensive simulation model is proposed, implementing a sequential action plan that includes configuring a terminal digital twin, integrating with control systems, forming a distance matrix, and developing container handling optimization algorithms. The practical significance of the research is confirmed by the developed mechanisms for accounting for constraints and risks, as well as the capabilities for scenario analysis to support well-founded managerial decision-making.

Получено 29.10.2025

ISSN 2664-5025. Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. Вып. 7. Гомель, 2025

УДК 656.222.6

В. В. ПОЛЬЯНОВ, С. А. БЕССОНЕНКО
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
polyanovvv@mail.ru, bessonenko@stu.ru

СНИЖЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ РАДИОСВЯЗИ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОЕЗДОВ НА ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Исследуются особенности технологии обращения длинносоставных контейнерных поездов, приводящей к возникновению инфраструктурных ограничений и значитель-

ным изменениям в технологических процессах железнодорожных станций. Одним из ключевых среди них является ограничение дальности станционной радиосвязи при выполнении маневровых работ с составами длиной до 130 условных вагонов, что создает риски в оперативности и безопасности операций, поскольку традиционные системы связи не справляются с увеличенной протяженностью поездов. Предложенные меры позволяют не только устранить текущие ограничения, но и обеспечить масштабируемость системы для будущих увеличений длины поездов, способствуя повышению общей эффективности контейнерных перевозок на международных транспортных коридорах.

В условиях логистических вызовов организация перевозок длинносоставными поездами выходит на уровень стратегического приоритета: она радикально усиливает рациональность эксплуатации инфраструктуры, повышает провозную способность и обеспечивает повышение эффективности по объемам перевозки грузов. Как свидетельствуют отраслевые аналитические отчеты, сектор контейнерных перевозок переживает бурный рост, при этом составы удлиняются до 130 условных вагонов, что эквивалентно 2 км в длину. Данные факторы кардинально меняют парадигму станционной работы [1]. Поезда, предназначенные для массовой транспортировки грузов в контейнерах, требуют специальных подходов к их обращению на станциях: от приемоотправочных до сложных маневровых операций, включая объединение и деление составов, перестановку вагонов и закрепление. Тип маневровых устройств (локомотивы, тормозные площадки, стрелочные переводы) в сочетании с местными условиями станции (рельеф местности, длина путей, наличие инженерных сооружений) определяют уникальность технологии производства работ на отдельно взятой станции при обязательном обеспечении безопасности поездной и маневровой работы.

При прогнозируемом росте средней длины поездов (по планам РЖД, к 2030 году доля длинносоставных контейнерных поездов достигнет 30–40 % от общего трафика) актуальным направлением является адаптация станционной радиосвязи, учитывающая специфику технологического процесса и особенности построения сетей. В соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог [2] передача всех указаний и команд при маневровой работе осуществляется с использованием станционной радиосвязи. Эта система обеспечивает голосовую связь в УКВ-диапазоне (160 МГц) между участниками маневровых передвижений: составителями поездов, машинистами и дежурными по станции.

Следует отметить, что существующие решения в построении сетей радиосвязи разрабатывались для поездов нормативной длины участка (как правило, 58–75 условных вагонов) и учитывают изменения, вызванные внедрением длинносоставных формирований. Это приводит к ограничениям в качестве и оперативности маневровых операций: задержки в передаче команд, потеря сигнала из-за экранирования вагонами и металлическими конструкциями.

Проведен анализ соответствия станционной сети радиосвязи к обработке длинносоставных поездов и предложены практические рекомендации для внедрения на железнодорожных станциях. В результате было выявлено, что построение и оптимизация сетей радиосвязи на железнодорожных станциях всегда осуществляется с учетом трех ключевых аспектов:

− особенностей технологического процесса (интенсивность маневров, зоны покрытия);

− технических характеристик используемых устройств (мощность передатчиков, чувствительность приемников, тип антенн);

− электромагнитной обстановки (помехи от оборудования, экранирование сигнала).

Для определения дальности радиосвязи в условиях, типичных для сложной среды распространения волн на станциях, в работе [3] рекомендовано использовать квадратичную формулу для расчета действующего значения напряженности электрического поля в приёмной точке, известную как формула Введенского. Эта модель, основанная на уравнениях Максвелла и приближениях, применимых в ближней зоне распространения радиоволн, выражается следующим образом:

$$E_{\text{П}} = \frac{173\sqrt{P_1 D_1}\, h_1 h_2}{r^2 \lambda}, \qquad (1)$$

где $E_{\text{п}}$ – значение напряженности электромагнитного поля в точке приема, мВ/м; P_1 – мощность передатчика, Вт; D_1 – коэффициент усиления передающей антенны; h_1, h_2 – высота подъема антенны передающей, приемной радиостанции соответственно, м; r – протяженность линии радиосвязи (дальность), км; λ – длина волны, м.

Формула (1) отражает зависимость дальности радиосвязи от основных параметров передатчика, таких как геометрия радиотрассы, тип и характеристики антенн, а также мощность передатчика. Тем не менее в условиях железнодорожной инфраструктуры она требует доработки, поскольку не учитывает влияние факторов электромагнитной обстановки: отражения от металлических конструкций, поглощение сигнала атмосферой и динамическое экранирование подвижным составом.

В таблице 1 приведены эмпирические коэффициенты ослабления, подробно описанные в методических указаниях [4].

Таблица 1 – **Значения ослабляющих коэффициентов**

Коэффициент	Значение, дБ
Коэффициент ослабления сигнала контактной сетью, B_{kc}	1−3
Коэффициент ослабления сигнала корпусом локомотива, B_k	5−10
Коэффициент ослабления сигнала низким расположением антенн, B_h	2−4
Коэффициент ослабления в каналах с носимыми радиостанциями, $B_{рн}$	6−15

Последний коэффициент наиболее точно отражает отсутствие прямой радиовидимости между приемником и передатчиком. На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования дальности радиосвязи между носимой радиостанцией составителя поездов (РН) и локомотивной радиостанцией машиниста (РВ) в условных вагонах.

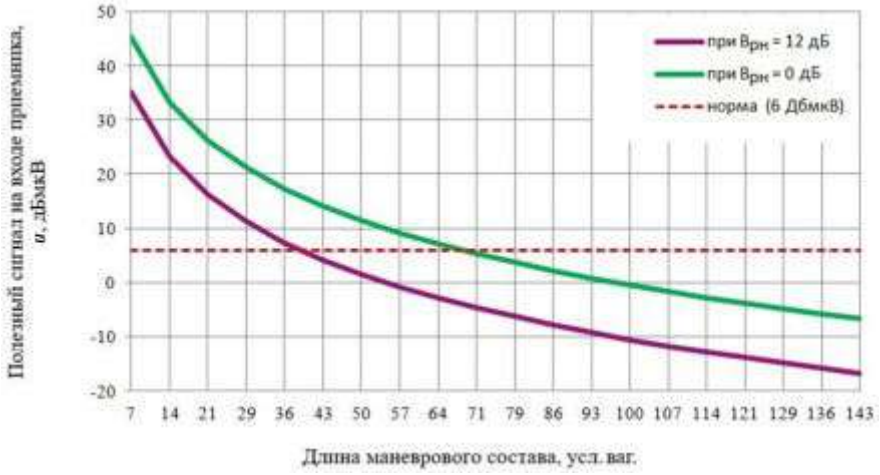


Рисунок 1 – Зависимость уровня полезного сигнала от дальности связи

Расчет выполнен с использованием формулы (1), при этом сигнал на входе приемника приведен к минимально необходимому уровню полезного сигнала в 0,5 мкВ для обеспечения устойчивой связи, с учетом ослабляющих коэффициентов из работы [4]. Параметры модели: P_t = 5 Вт, G_t = 2,15, $h_t = h_r$ = 2 м, f = 150 МГц ($\lambda \approx 2$ м), общие потери 10−15 дБ.

В соответствии с расчетной зависимостью, построенной без учета экранирующего влияния подвижного состава ($B_{рн}$ = 0 дБ, обеспечивающей идеальные условия прямой видимости), предел дальности радиосвязи между носимой и локомотивной радиостанцией достигает дальности порядка 70 условных вагонов, что эквивалентно 980 метрам. Данное значение соответствует максимальным дистанционным показателям, характерным для стандартных железнодорожных составов. Тем не менее в маневровых ситуациях, при которых линия прямой видимости радиосигнала подвергается пересечению подвижным составом или фиксированных инфраструктурных элементов (характеризуемых коэффициентом ослабления $B_{рн}$ = 12 дБ), наблюдается существенное сокращение зоны устойчивой связи, уменьшающейся до дальности в 38–39 вагонов (530–546 м соответственно). Полученный результат свидетельствует о значительном влиянии локального экранирующего эффекта на качество и протяжённость станционной радиосвязи, что требует внедрения корректирующих коэффициентов в модели прогнозирования. Физически это оз-

начает наличие «мертвых зон» радиопокрытия на концах длинных составов, где составитель теряет связь с машинистом, что критично для координации торможения, наката на башмаки или расцепа. Аналогичные ограничения наблюдаются на станциях с высокой занятостью путей, где смежные составы усиливают взаимное экранирование. Таким образом, без модернизации текущие системы радиосвязи становятся ограничением для внедрения длинносоставных поездов, требуя мер по расширению покрытия.

Анализ надежности радиоканала в рамках технологического процесса железнодорожной станции требует учета внутренней стохастической динамики функционирования объекта. Деятельность составителя поездов характеризуется непрерывным перемещением внутри маневровых зон – от приемоотправочных путей до сортировочных горок − при этом его позиция в конкретной расчетной точке (например, у торца подвижного состава) является случайной величиной, описываемой вероятностными распределениями. Такая стохастическая природа движения вносит существенную неопределенность в обеспечение устойчивой радиосвязи, выражающуюся через коэффициент готовности системы ($K_г$). Данный параметр количественно характеризует вероятность доступности канала связи в произвольный момент времени и его способность к стабильной работе на заданной позиции.

Исследования, посвященные оценке надежности радиосетей в подобных условиях [5, 6], показывают, что простое повышение мощности передающих устройств не обеспечивает существенного улучшения качества связи. Вместо этого более эффективным подходом является интеграция дополнительных, параллельно функционирующих компонентов и построение резервных коммутационных путей, что способствует повышению устойчивости и надежности канала посредством создания избыточных маршрутов передачи сигнала. В теории сетей коэффициент готовности для такой конфигурации определяется формулой полного охвата отказов [7]:

$$K_г = \prod_{i=1}^{n} K_{г_i}. \quad (2)$$

В случае параллельного соединения компонентов, формирующих резервные каналы коэффициент готовности системы рассчитывается по формуле

$$K_г = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - K_{г_i}).$$

Иными словами, общая готовность системы равна вероятности того, что хотя бы один из резервных каналов функционирует корректно. Математически это выражается через дополнение до единицы произведения вероятностей отказов всех каналов [2].

В общем случае канал радиосвязи между составителем и машинистом может быть представлен в виде блочно-графовой модели, схема которой приведена на рисунке 2.

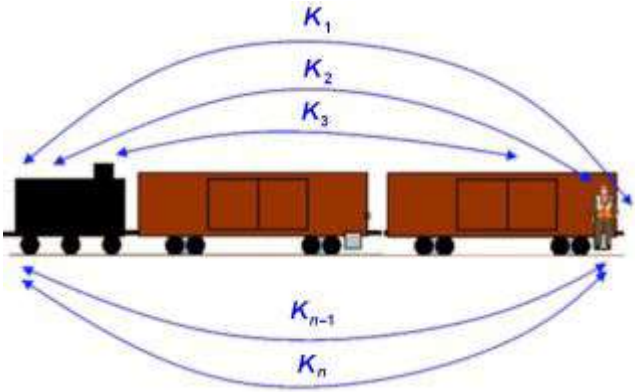


Рисунок 2 – Схема замещения канала радиосвязи

В таблице 2 представлены результаты поэтапного итеративного вычисления коэффициента готовности сети «составитель-машинист» с учетом варьирования числа внедряемых резервных (обходных) связей.

Таблица 2 – **Результаты расчета коэффициента готовности**

Количество связей	K_0	$K_{0,1}$	$K_{0,1,2}$	$K_{0,1,2,3}$	$K_{0,1,2,3,4}$
$K_г$ сети радиосвязи	0,95	0,9975	0,999875	0,999994	0,99999969

Результаты проведенного численного моделирования показывают целесообразность введения дополнительных связей: уже с одним обходным каналом $K_г$ возрастает до 99,75 %, а с тремя − превышает 99,999 %, что соответствует требованиям для критически важных систем (например, по ГОСТ Р 27.002−2009).

Технически такая схема реализуется установкой ретранслятора – стационарной радиостанции промежуточного типа, которая принимает ослабленный радиосигнал от РН, усиливает его до 20−30 дБ без искажений и транслирует в эфир. Ретранслятор размещается на возвышенностях или мачтах с высотой 10−15 м для минимизации экранирования, с питанием от основной сети станции и резервным аккумулятором. Внедрение такого устройства не только повышает покрытие на 30−50 % по длине состава, но и снижает зависимость от таких погодных факторов, как дождь или снег, интегрируясь в существующую инфраструктуру без полной замены оборудования.

Дополнительно стоит отметить, что оценка надежности должна включать симуляцию сценариев, например, с помощью программного обеспечения MATLAB или специализированных пакетов для моделирования распространения волн (Wireless InSite), где учитываются многолучевое распространение и доплеровские сдвиги от движения поезда (скорость до 10−15 км/ч в маневрах). Такие модели подтверждают, что ретрансляторы эффективны на станциях с длиной путей более 1000 м, где базовое покрытие падает ниже 80 %.

Таким образом, процесс выбора и внедрения технических мер по модернизации радиосетей железнодорожных станций должен базироваться на детальных расчетах радиуса действия канала связи, а также на комплексном анализе факторов, влияющих на качество передачи сигнала. При этом необходимо учитывать как статические параметры среды топографические особенности, стационарные инженерные конструкции), так и динамические события (перемещение подвижного состава, мобильность персонала), которые существенно влияют на устойчивость и надежность радиоканала. Результаты проведенных в работе оценочных расчетов однозначно показывают, что наиболее эффективными способами преодоления ограничений является создание зон прямой видимости радиосигнала путем оптимизации размещения антенн (например, перенос на крыши зданий) и увеличение высоты установки антенн. Введение дополнительных узлов в радиосеть для формирования резервированных каналов позволит существенно расширить рабочую дальность РН-РВ до 100 вагонов и более при минимальных потерях сигнала.

Обеспечение покрытия радиосвязью всей территории станции, включая тупиковые участки и сортировочные горки, сопряжено с существенными экономическими и организационно-техническими затратами. Эти расходы охватывают приобретение необходимого оборудования, его установку, а также последующий ввод в эксплуатацию. Кроме того, добавление дополнительных узлов связи приводит к увеличению числа передатчиков на объекте, что повлечет за собой повышение общего энергопотребления и риск возникновения электромагнитных помех на сопредельные системы безопасности и сигнализации. Поэтому для практического применения таких систем необходимо проводить дальнейшие исследования по разработке интегрированных моделей на основе искусственного интеллекта для предиктивного анализа покрытия, а также полевые испытания ретрансляторов на пилотных станциях с экономической оценкой их окупаемости. Комплексный подход позволит инфраструктуре станции адаптироваться к технологии работы с длинносоставными поездами, обеспечивая ее безопасность и эффективность в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Оленцевич, В. А.* Анализ влияния пропуска длинносоставных поездов на участке железнодорожного пути на качественные показатели графика движения поездов и безопасность перевозочного процесса / В. А. Оленцевич, Н. В. Власова, Е. В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. − 2022. − № 3 (75). − С. 149–158.

2 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. − URL: https://www.tdesant.ru/info/item/316 (дата обращения: 20.09.2025).

3 *Долуханов, М. П.* Распространение радиоволн : учеб. / М. П. Долуханов. – 4-е изд. – М. : Связь, 1972. – 336 с.

4 *Художитков, П. И.* Расчет дальности станционной радиосвязи / П. И. Художитков. − Екатеринбург : УрГУПС, 2006. − 15 с. − URL: https://scbist.com/scb/uploaded/ 36366_1682796762.pdf (дата обращения: 20.09.2025).

5 *Роенков, Д. Н.* Способ оценки надежности сети поездной радиосвязи / Д. Н. Роенков, П. А. Плеханов, Н. В. Яронова // Современные технологии – транспорту. − 2017. − № 3. − С. 461−470.

6 *Польянов, В. В.* Снижение инфраструктурных ограничений радиосвязи на участках обращения длинносоставных поездов / В. В. Польянов // Железная дорога: путь в будущее : Сб. материалов II Междунар. науч. конф. аспирантов и молодых ученых к 80-летию аспирантуры и научного центра «Экономика комплексных проектов и тарифообразования» АО «ВНИИЖТ», Москва, 18 апреля 2024 года. – М. : Инфра-М, 2024. – С. 400−405.

7 *Рогинский, В. Н.* Теория сетей связи : учеб. для вузов связи / В. Н. Рогинский, А. Д. Харкевич, М. А. Шнепс [и др.]. − М. : Радио и связь, 1981. − 192 с.

8 *Polyanov, V. V.* Stochastic timetable disturbances in heavy haul and extra-long train traffic / V. V. Polyanov, V. V. Atuchin, S. A. Bessonenko // T-Comm. – 2025. – Vol. 19, № 2. – P. 53−60.

V. V. POLYANOV, S. A. BESSONENKO

MITIGATING INFRASTRUCTURE LIMITATIONS OF RADIO COMMUNICATION FOR CONTAINER TRAIN OPERATIONS AT CLASSIFICATION YARDS

The features of technology of the reference for handling long container trains resulting in occurrence of infrastuctural restrictions and significant changes in technological processes of railway stations are investigated. One of key among them is the restriction of range a station radio communication at performance shunting of works with structures length up to 130 conditional cars, that creates risks in efficiency and safety of operations, as the traditional systems of communication do not consult with the increased extent of trains. The offered measures allow not only to remove the current restrictions, but also to ensure scalability of system for the future increases length of trains, promoting increase of a general efficiency container transportations on the international transport corridors.

Получено 21.10.2025

УДК 656.212.5:625.1

Е. Н. ПОТЫЛКИН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
ugkr@bsut.by

РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ПЕРИОДА ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ПОДАЧАМИ ВАГОНОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Представлена методика расчета среднего периода времени между подачами вагонов на железнодорожный путь необщего пользования в условиях использования