

Стандарты сетей связи 5G/5G-Advanced для цифровой трансформации железных дорог и развития интеллектуальных транспортных систем

С.В. Мартынов, А.В. Осовский, Д.В. Кутузов

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – В статье рассмотрены вопросы перехода от существующей системы железнодорожной радиосвязи GSM-R к перспективной системе FRMCS на базе технологий LTE/5G как необходимого условия для реализации высоких уровней автоматизации движения поездов (GoA3/GoA4). Проанализированы работы по стандартизации требований к системе и оборудованию FRMCS в рамках Международного союза железных дорог (UIC), консорциума 3GPP и Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI. Представлен обзор эволюции стандарта GSM-R, показаны его архитектурные ограничения в контексте требований перспективных сервисов управления движением и автономного вождения. Проведена сравнительная характеристика GSM-R, LTE-R, 5G и 5G-Advanced применительно к задачам высокоскоростных железных дорог. Показана прямая зависимость между уровнем автоматизации (GoA) и требованиями к характеристикам канала связи «поезд–земля».

Ключевые слова – высокоскоростные железные дороги, 5G-Advanced, FRMCS, GoA3/GoA4, GSM-R.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитию крупных агломераций в условиях сырьевой экономики способствуют не автобаны, а высокоскоростные железные дороги (ВСЖД). В настоящее время ВСЖД конкурирует с авиаперевозчиками за пассажиров. Между большинством российских крупных городов расстояния составляют от 300 до 800 километров. На таких расстояниях авиация не даёт большого преимущества в скорости, поскольку самолет летит недолго (от 0,5 до 1,5 ч), но существенное время затрачивается пассажирами, чтобы зарегистрироваться на рейс и добраться до аэропорта (в среднем 1,5 ч). Кроме того, пассажирам необходимо время, чтобы снова добраться до центра города. В целом, это занимает не меньше четырёх часов. Автобан позволяет проехать со скоростью 150 км/ч, пока пассажир не въехал в пригород, а при приближении к центру скорость резко падает из-за городского и пригородного

транспорта. В результате 300 километров от центра одного города до центра другого пассажир меньше чем за четыре часа не преодолеет, не говоря уже о расстояниях 800 км: там шесть-семь часов в лучшем случае. А с ВСЖД на таких расстояниях при скоростях поездов 350–400 км/ч между всеми агломерациями можно обеспечить расстояние двухчасовой доступности. Крупные города сливаются в единую рыночную систему, и люди спокойно в течение дня могут перемещаться туда-обратно, обеспечивая так называемую маятниковую миграцию. Таким образом, ВСЖД обеспечивают синергетический эффект в экономике за счёт резкого всплеска деловой активности между агломерациями. Обеспечение пассажиров ВСЖД бесперебойной связью и высокоскоростным интернетом на всём пути следования является не просто дополнительным сервисом по развлечению пассажиров информационным контентом в дороге, что тоже немаловажно для комфортной поездки, но и возможностью продолжать экономическую деятельность во время перемещения между агломерациями.

Связь «поезд–земля» является важным направлением в исследованиях вокруг ВСЖД из-за высокой скорости и возникающих из-за этого сложностей для беспроводных систем связи. Традиционные методы связи не могли поддерживать развертывание высокоскоростных железных дорог. Европейская система управления поездами (European Train Control System, ETCS) была первой, кто подробно изучил эту проблему, и попыталась её решить, имея стандартный цифровой метод связи для всех поездов в Европе. В то время в Европе существовало 14 различных аналоговых систем связи «поезд–земля», и впоследствии все они были заменены ETCS и GSM-R.

GSM-R (Global System for Mobile Communications, Railway) – это наиболее широко используемая железнодорожная система связи во всем мире, которая используется уже несколько десятилетий и до сих пор работает во многих железнодорожных системах.

Стандарт GSM-R был создан как расширение GSM с упором на железнодорожную сеть и для предоставления стандартизированного протокола цифровой связи, который будет совместим и экономически эффективен. Необходимо было заменить аналоговые системы, традиционно используемые в железнодорожной среде, на современные беспроводные полностью цифровые системы. Но сеть должна была соответствовать некоторым основным требованиям к железнодорожной связи, таким как связь, управляемая контроллером, автоматическое управление поездом, возможности маневрирования и телеметрии, аварийное дистанционное вещание, локальная связь, пассажирские услуги, адресация в зависимости от местоположения. Это позволяет сети отдавать приоритет данным уровня управления над данными уровня пользователя. Это узкополосная технология, определённая для работы в диапазоне 800–900 МГц [1]. Система позволяет сети лучше осуществлять передачу в макросотах, имея базовые станции, расположенные на расстоянии примерно 6–10 км друг от друга. Она поддерживает максимальную скорость 500 км/ч и обеспечивает покрытие в разных странах благодаря своему стандартизированному диапазону частот. Пиковая скорость передачи данных GSM-R по восходящей/нисходящей линии связи (UL/DL) составляет 172 Кбит/с. Типичные железнодорожные услуги, предлагаемые GSM-R, включают Voice Group Call Service (VGCS) и позволяют пользователям общаться с группой абонентов одновременно; Enhanced Multi-Level Precedence and Preemption (eMLPP) позволяют назначать различные уровни приоритета вызовам и абонентам для обеспечения непрерывности связи в условиях перегрузки сети, функциональную адресацию и адресацию, зависящую от местоположения [2]. В целом, большинство из вышеперечисленных услуг не требуют скорости передачи данных на уровне Мбит/с. Долгое время этого было достаточно: железнодорожная связь выполняла роль выделенного «канала управления» и не рассматривалась как универсальная цифровая инфраструктура.

Поезд считается высокоскоростным, если он способен развивать скорость более 200 км/ч. На этой скорости сложно поддерживать стабильную сеть связи между базовой станцией (BS) и поездом из-за эффектов распространения и канала, передачи сот и т.д. В ближайшем будущем в высокоскоростных железнодорожных системах появятся такие возможности, как разработка полностью автоматизированной работы поездов, мониторинг в реальном времени, высокоточная информация о пассажирах и прогнозное планирование технического обслуживания. Все это услуги в интеллектуальных железнодорожных системах, целью которых является не только улучшение мобильности, безопасности и надежности работы, но и улучшение качества

обслуживания, экологичности, комфорта и экономической эффективности. Для «умного» железнодорожного транспорта необходимо более широкое покрытие датчиками, поезд, грузы и пассажиры должны быть более взаимосвязаны, а операторам нужны более интеллектуальные методы работы с данными датчиков. Всё это требует наличия специальной системы беспроводной связи, которая может поддерживать большое количество датчиков, обеспечивать задержку на уровне миллисекунд, сверхнадёжность или скорость передачи данных до 1 Гбит/с при скорости поезда более 450 км/ч. Цифровая трансформация железных дорог расширила перечень задач: беспилотные режимы (GoA3/4), высокоплотное движение, видеоаналитика, телеметрия и диагностика, IoT датчики, высокоточное позиционирование и развитие ETCS до Уровня 3 (Level 3) [3].

Ограничения GSMR в этом контексте носят не эксплуатационный, а архитектурный характер. Теоретический максимум скорости передачи данных в GSMR оценивается как 172 кбит/с, а в реальных условиях пакетный трафик ограничивается от единиц до десятков кбит/с, при этом задержка может достигать 400–500 мс [4]. Такие значения плохо совместимы с требованиями критических сервисов, для которых в документах 3GPP (Техническая спецификация TS 22.289) фигурируют целевые классы задержки меньше или равной 10 мс и крайне высокой надёжности доставки [5].

На этом фоне международный союз железных дорог (UIC) инициировал создание перспективной системы мобильной связи Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) на базе сетей радиодоступа 4G и 5G, транспортных сетей связи и серверов приложений сети для железных дорог [6]. FRMCS – это отраслевой профиль и архитектурная модель, описывающая сервисы, интерфейсы и требования железной дороги, тогда как стандарт 5GAdvanced [7] выступает технологической платформой, на которой эти требования могут быть реализованы с заданными ключевыми показателями эффективности [8].

II. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цифровая трансформация железных дорог представляет собой системный переход от традиционной модели управления железнодорожным транспортом, основанной на изолированных аналоговых и ранних цифровых подсистемах, к интегрированной цифровой экосистеме, в которой данные, алгоритмы и коммуникации становятся основой принятия решений на всех уровнях – от управления движением отдельного поезда до планирования работы всей сети.

Исторически железнодорожные системы строились по принципу функциональной изоляции: сигнализация,

связь, тяга, диагностика, управление расписанием и пассажирские сервисы разрабатывались и эксплуатировались как отдельные, слабо связанные между собой контуры. Каждый из них имел собственные стандарты, протоколы, каналы передачи данных и жизненные циклы оборудования. Такая архитектура обеспечивала высокую надёжность отдельных подсистем, однако ограничивала возможности для оптимизации системы в целом: данные одного контура были недоступны другому, а координация между подсистемами осуществлялась преимущественно через человека – машиниста, диспетчера, обходчика.

Цифровая трансформация меняет эту парадигму по нескольким направлениям одновременно.

Интеграция данных и принятия решений. Вместо изолированных контуров формируется единое цифровое пространство, в котором данные о состоянии пути, подвижного состава, систем электроснабжения, погодных условиях, пассажиропотоке и расписании доступны для совместного анализа. Это позволяет, например, корректировать режим движения поезда не только по сигналам светофора, но и с учётом текущего состояния пути впереди, прогноза энергопотребления, фактического расписания соседних поездов и данных о загрузке станций.

Автоматизация эксплуатационных процессов. Цифровые технологии позволяют последовательно автоматизировать функции, ранее выполнявшиеся персоналом: от автоматического ведения поезда (Automatic Train Operation, ATO) и автоматического управления движением на участке (Automatic Train Supervision, ATS) до предсказывающего технического обслуживания (Condition-Based Maintenance, CBM), при котором ремонт выполняется не по жёсткому графику, а по фактическому состоянию оборудования, определяемому непрерывным мониторингом.

Переход к управлению на основе связи. Ключевой элемент цифровой трансформации – замена физической инфраструктуры определения местоположения поезда (рельсовые цепи, счётчики осей) на системы, основанные на радиосвязи и бортовом позиционировании. Этот переход, реализуемый в рамках эволюции ETCS от Level 2 к Level 3, позволяет перейти от фиксированных блок-участков к подвижным, что существенно повышает пропускную способность линии. Но он же превращает канал связи из вспомогательного элемента в критический компонент системы безопасности.

Расширение сенсорного покрытия. Современный высокоскоростной поезд и путевая инфраструктура оснащаются сотнями и тысячами датчиков: вибрации ходовой части, температуры букс, состояния контактной сети, геометрии пути, аэродинамических нагрузок, параметров тяговых преобразователей. Данные этих датчиков формируют основу для предсказывающей диагностики и цифровых двойников

– виртуальных моделей поезда и инфраструктуры, непрерывно обновляемых по данным реальных измерений. Передача этого объёма данных требует широкополосных каналов связи, принципиально недоступных в рамках GSM-R.

Цифровая трансформация открывает возможности для эксплуатационных моделей, невозможных в аналоговом стандарте. К ним относятся: виртуальная сцепка (Virtual Coupling) – координированное движение поездов на сокращённых интервалах без физического соединения; полностью беспилотная эксплуатация (GoA4) на магистральных линиях; динамическое управление расписанием в реальном времени с учётом фактической обстановки; интеграция железнодорожного транспорта в мультимодальные цифровые платформы мобильности (Mobility-as-a-Service, MaaS).

Помимо технологических задач, цифровая трансформация включает создание непрерывной цифровой среды для пассажиров: высокоскоростной интернет на борту, информирование в реальном времени, мобильные приложения для покупки билетов и навигации, а также системы связи пассажир–оператор, которые при беспилотной эксплуатации замещают функции бортового персонала.

Все перечисленные направления объединяет одно общее требование: наличие надёжной, широкополосной и управляемой системы связи, способной одновременно обслуживать критические контуры управления и безопасности, технологические потоки данных и пассажирские сервисы – при высокой скорости движения и в сложных условиях распространения радиосигнала. Таким образом, встает задача перехода от GSM-R к FRMCS и цифровой трансформации железных дорог в целом.

III. АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСНОВЫ FRMCS

Архитектурная идея FRMCS состоит в разделении того, что относительно стабильно в железнодорожной отрасли (сервисы, интерфейсы, требования), и того, что быстро меняется в телеком-технологиях (поколения радиосистем и реализация ядра сети). Такая логика зафиксирована в ETSI TR 103 459, где используется трёхуровневая модель: логический, технический и физический уровни [9].

На логическом уровне (Рис.1) FRMCS описывает прикладные сервисы и взаимодействие компонентов: голосовая связь, передача данных для управления, сервисы персонала, видео, диагностика и другие приложения. Здесь важно, что требования формулируются без привязки к конкретной радиотехнологии: задача: определить, какие сервисы должны работать и какие ключевые показатели эффективности (КПЭ) они должны выполнять.

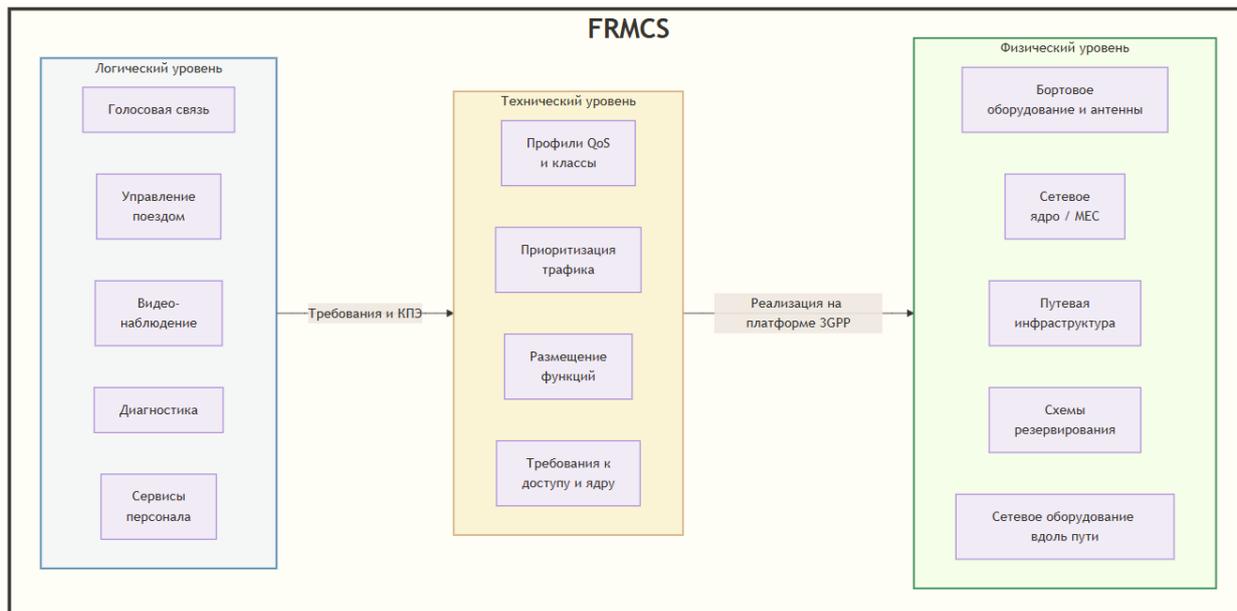


Рис. 1. Архитектурные основы FRMCS

На техническом уровне логические требования сопоставляются с возможностями платформы 3GPP: профили качества обслуживания, приоритеты, механизмы разделения трафика по классам, а также варианты размещения функций в сети. Это позволяет выражать требования железной дороги в терминах, которые затем можно реализовать настройкой сети 5G/5G Advanced.

На физическом уровне описывается практическая реализация: расположение оборудования на борту поезда, вдоль линии, на технологических площадках, а также схема резервирования и плотность размещения инфраструктуры. Для высокоскоростных линий этот уровень критичен: именно здесь проявляются эффекты мобильности и частых переключений между сотами.

IV. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Переход от GSM-R к FRMCS не является заменой одной радиотехнологии на другую. Это переход от старой узкоспециальной сети (только голос + немного данных) к полноценной современной цифровой платформе на базе обычного 5G. Всё, что даёт прирост скорости, надёжности и минимальную задержку – это стандартный 5G. А FRMCS – это набор чётких железнодорожных требований и сервисов, которые заставляют эту сеть работать именно так, как нужно поездам, а не как обычному смартфону в руках пассажира.

Для железной дороги на высоких скоростях «качество связи» – это не только скорость передачи. Критично, чтобы сеть гарантировала нужные показатели именно в сложные моменты: при переключениях между

базовыми станциями, в тоннелях, на границах покрытия и при смешанной нагрузке. Поэтому важно различать:

- радиозадержку между поездом и базовой станцией;
- сквозную задержку E2E (время от приложения до приложения, включая транспортную сеть и обработку на серверах).

Одна и та же радиотехнология может давать разные E2E результаты в зависимости от архитектуры. Например, если критические данные обрабатываются в удалённом датацентре, пакет проходит длинный маршрут и несколько узлов обработки; это увеличивает задержку и делает её менее стабильной. Если же приложение размещено на ближайшем технологическом узле вдоль линии, маршрут короче, и E2E-задержка становится меньше и предсказуемее. Поэтому сравнение технологий для высокоскоростных линий всегда должно включать архитектурный аспект: где находится «точка принятия решения» и как проходит трафик.

В Табл. I показано сравнение GSM-R, LTE-ориентированных решений и платформы 3GPP 5G/5G-Advanced с позиции пригодности для ВСЖД. Из сравнения видно, что GSM-R, будучи изначально системой для надёжной голосовой связи и ограниченного объёма данных сигнализации, имеет архитектурные ограничения по пакетной передаче данных и задержке, что затрудняет поддержку современных цифровых сервисов и параллельных потоков данных. LTE-ориентированные решения существенно расширяют доступную полосу и снижают задержку до десятков миллисекунд, что делает возможными широкополосные сервисы (видео, диагностика), однако для перспективных контуров

ТАБЛИЦА I
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ СВЯЗИ ДЛЯ ВСЖД

Параметр	GSM-R	LTE-R	5G (NR)	5G-Advanced (5G-A)	FRMCS (на базе 5G/5G-A)
Технологическая основа	2G (GSM)	4G (LTE)	5G NR (Rel.15–17)	5G NR (Rel.18+)	Архитектурный профиль ETSI/3GPP
Пик. скорость DL	≤171 кбит/с	100–300 Мбит/с	1–2 Гбит/с	3–10 Гбит/с	Определяется 5G-A
Пик. скорость UL	≤14,4 кбит/с	50–150 Мбит/с	0,5–1 Гбит/с	0,7–2+ Гбит/с	Определяется 5G-A
Типовая задержка	400–500 мс	20–50 мс	1–10 мс (uRLLC)	<10 мс (eURLLC)	≤10 мс (требование для крит. сервисов)
Надёжность/уровень сервиса	Высокая (голос)	Умеренная/высокая	Высокая (изоляция трафика)	Крайне высокая	Целевой уровень до 99,9999%
Ключевые сервисы	Голос, баз. данные	VoLTE, HD-видео	eMBB, mMTC, uRLLC	RedCap, ISAC, AI/ML	MCX, ETCS L3, ATO, Virtual Coupling
Статус для ВСЖД	Массовое (2000-е)	Пилоты/нишевые	Пилоты	Коммерция (отд. рынки)	Планируемое внедрение (горизонт ~2035)

автоматизации и управления движением на ВСЖД ключевым становится не столько «средняя задержка», сколько устойчивое выполнение требований в условиях высокой мобильности и частых переключений между сотами.

В строке «Ключевые сервисы» таблицы использованы типовые классы услуг 5G. Широкополосная мобильная связь (eMBB) относится к приложениям, где важна высокая пропускная способность, например, пассажирский интернет, видеопотоки, часть задач видеонаблюдения. Массовое подключение устройств (mMTC) соответствует сценариям с большим числом датчиков и телеметрией, характерным для мониторинга инфраструктуры и подвижного состава. Сверхнадёжная связь с малой задержкой (uRLLC) относится к критическим по времени приложениям, где важны минимальная задержка и высокая вероятность доставки сообщений «в срок». Для 5G-Advanced дополнительно отмечены направления развития, повышающие практическую применимость платформы в железнодорожной среде: облегчённые устройства для технологического мониторинга (RedCap) технологии «Интернета вещей», перспективные функции совместного использования радиосети для связи и зондирования (ISAC) и расширение автоматизации управления радиосетью с применением алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения (AI/ML).

FRMCS представляет собой отраслевой набор требований и сервисов железнодорожной связи, реализуемый на базе сетей 3GPP. В этот набор входят критически важная связь для персонала (MCX), функции управления движением (включая развитие ETCS до уровня 3), автоматическое управление поездом (ATO) и перспективные кооперативные режимы, такие как «виртуальная сцепка» (Virtual Coupling). В итоге, 5G/5G-Advanced задаёт технологическую платформу (радиодоступ и ядро

сети), а FRMCS – состав железнодорожных сервисов и целевые показатели их качества.

Виртуальная сцепка (Virtual Coupling) – это инновационная концепция, позволяющая поездам работать в скоординированных виртуальных колоннах без физического соединения. Она использует связь между поездами, бортовые датчики и передовые системы управления для обеспечения синхронного движения независимых поездов на относительно небольших расстояниях друг от друга, тем самым увеличивая пропускную способность путей. Это следующий крупный шаг вперед в управлении железнодорожными перевозками, оптимизирующий операции, а также повышающий совместимость, гибкость и надёжность расписаний движения поездов. Виртуальная сцепка обеспечивает решение проблемы за счёт сокращения интервалов между поездами, динамического формирования колонн и стратегий совместного управления. Эти инновации увеличивают пропускную способность линии без дополнительных путей, обеспечивают большую операционную гибкость за счёт динамической сцепки и расцепки, позволяют экономить энергию за счёт скоординированных маневров, а также повышают надёжность и пунктуальность обслуживания.

V. ЭВОЛЮЦИЯ 5G И ФУНКЦИИ, ВАЖНЫЕ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Внедрение 5G Advanced в железнодорожной сфере ориентировано прежде всего на обеспечение стабильного и предсказуемого качества связи в эксплуатации, а не только на рост максимальной пропускной способности. Для высокоскоростной железной дороги ключевой вопрос состоит в том, сможет ли сеть устойчиво удерживать заданные ключевые показатели эффективности, например, E2E задержку порядка 10 мс для критических сообщений и высокую вероятность доставки «в срок» при скорости

300–350 км/ч, в моменты переключений между сотами и при фоновой нагрузке от видео и сервисных данных [10].

Важны не только средние значения, но и «хвосты» распределений: что происходит с задержкой и потерями в редких неблагоприятных ситуациях. Именно поэтому верификация для железной дороги должна опираться на перцентили задержки (P95/P99 и при возможности выше), а не только на среднее.

На Рис. 2 приведено сопоставление возможностей 5G (Rel.15–17) и 5G Advanced (Rel.18+) по пяти направлениям, которые наиболее критичны для ВСЖД: задержка, мобильность, управление приоритетами трафика, поддержка массовых датчиков и позиционирование [11].

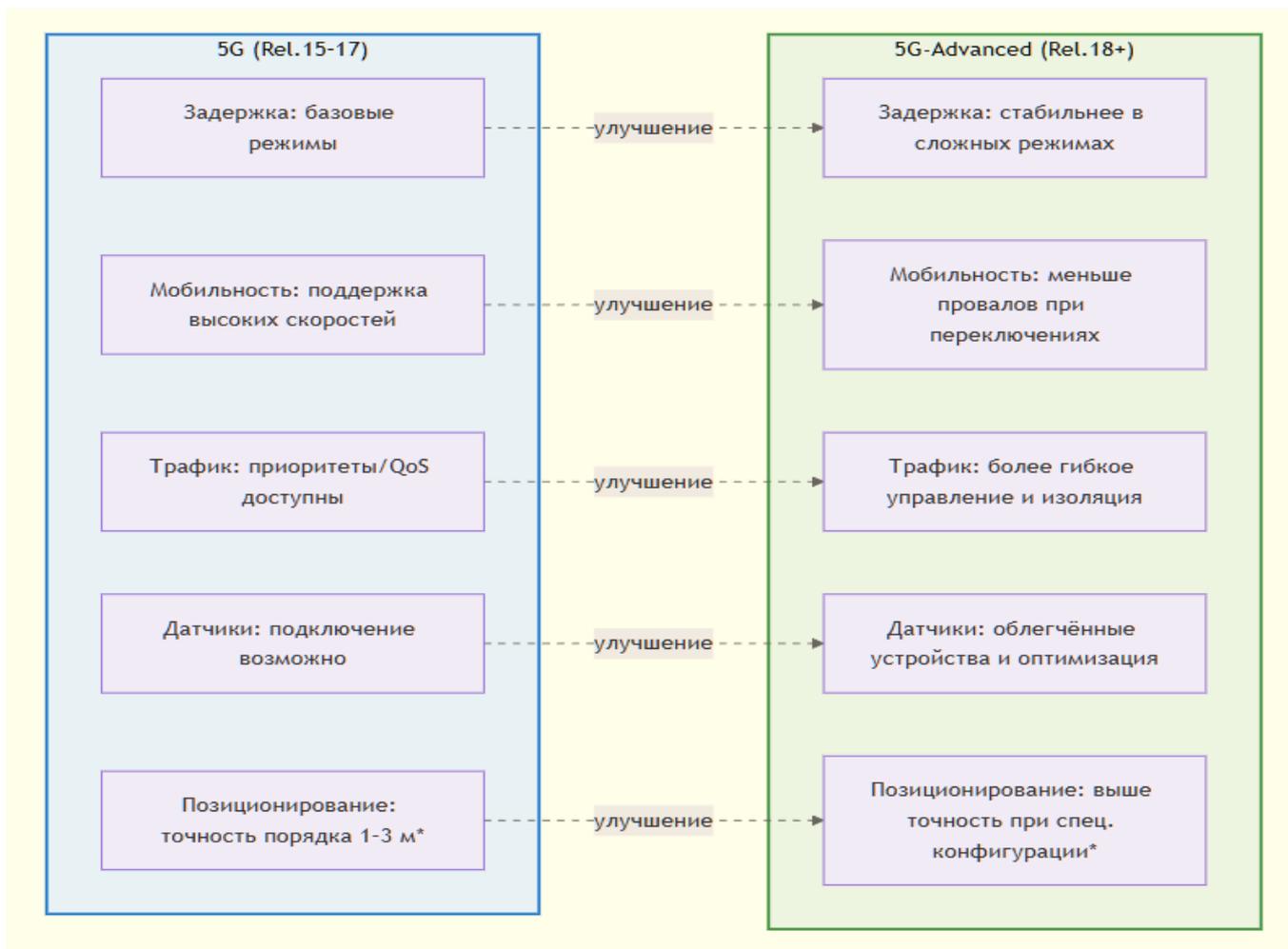


Рис. 2. Технологии 5G и 5G-Advanced: ключевые отличия для ВСЖД

На Рис. 2 показан базовый уровень функций, доступный в ранних релизах 5G и развитие этих функций в 5G-Advanced с акцентом на эксплуатационную устойчивость. Для железнодорожных сценариев ключевым является не достижение минимальных значений в условиях, близких к идеальным, а более стабильное выполнение КПЭ при высокой скорости и частых переключениях между сотами, а также возможность отделить критический трафик управления от широкополосных потоков (видео, пассажирские сервисы). Дополнительно 5G-Advanced расширяет практическую

поддержку технологического мониторинга за счёт оптимизаций для подключаемых устройств и повышает точность позиционирования при соответствующей конфигурации сети.

VI. СЦЕНАРИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И СООТВЕТСТВИЕ ВОЗМОЖНОСТЯМ 5G-ADVANCED

Задачи цифровизации железнодорожной инфраструктуры крайне разнообразны и предъявляют различные требования к сети. Часть

трафика относится к критическим контурам управления и безопасности, часть – к связи персонала, часть – к широкополосным и поддерживающим приложениям (видео, диагностика, пассажирские сервисы). Поэтому сравнение технологий связи по «пиковым скоростям» мало что говорит о пригодности для железной дороги. На передний план выходит задача обеспечения заданных параметров качества (QoS) для различных категорий сервисов. Необходимо гарантировать, что менее приоритетный трафик (общего пользования) не будет ограничивать ресурсы, выделенные для выполнения критических функций управления и безопасности

Например, видеонаблюдение требует высокой и стабильной пропускной способности, особенно в направлении uplink – от поезда к сети, но допускает большую задержку. Данные управления движением и автоматического управления поездом, наоборот, требуют малой и стабильной задержки и высокой вероятности доставки сообщений в заданное время, особенно во время переключений между сотами либо хэндоверами вдоль полотна ВСЖД [12].

В Табл. II приведена увязка типовых железнодорожных сценариев с показателями качества и механизмами сети.

ТАБЛИЦА II
СОПОСТАВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ ВСЖД С КЛЮЧЕВЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯМИ К НАСТРОЙКЕ СЕТИ

Сценарий	Тип трафика	Главные КПЭ	Что в сети должно быть настроено/обеспечено
Управление движением (эволюция ETCS к уровню 3)	Критические данные	E2Задержка (например, ≤ 10 мс по P95/P99 для заданных условий), доставка «в срок», высокая доступность	Приоритет и защита ресурса для критического трафика; отдельные профили качества; минимизация E2Маршрута (в т.ч. размещение серверов ближе к линии при необходимости)
Автоматическое управление поездом (АТО)	Критическое управление + телеметрия	Малые задержки и их стабильность; устойчивость на переключениях	Профили качества для управления; настройки мобильности и резервирование; контроль качества на хэндоверах
«Виртуальная сцепка» (VirtualCoupling)	Кооперативный обмен данными	Сверхвысокая надёжность доставки «в срок», минимальная задержка	Максимальная приоритизация; резервирование; плотное покрытие и контроль качества на хэндоверах
Видеонаблюдение	Широкополосные данные	Стабильная пропускная способность, особенно uplink	Отдельные профили качества; приоритеты по классам; при необходимости обработка видео на ближайших узлах
Диагностика и мониторинг (датчики)	Технологические данные	Надёжность доставки, масштабируемость	Профили качества для технологических данных; оптимизация подключения большого числа устройств
Связь для персонала (критически важно)	Голос/данные	Приоритет, групповая связь, доступность	Приоритет/вытеснение не критического трафика; гарантированный доступ при перегрузке
Пассажирские сервисы	Широкополосный трафик	Высокая скорость без влияния на критический трафик	Изоляция пассажирского трафика от критического; политика управления ресурсами

Таким образом, 5G-Advanced для ВСЖД определяется не только пиковыми скоростями, а способностью сети одновременно обеспечить разные профили качества для критических и некритических сервисов и удерживать их в высокоподвижных режимах.

VII. БЕСПИЛОТНЫЕ РЕЖИМЫ GOA3/GOA4

Автоматизация железнодорожного движения эволюционировала от ручного управления, поддерживаемого путевой сигнализацией, к последовательно более высоким уровням бортовой цифровой мощности обработки данных, чему в основном способствовали требования по безопасности, пропускной способности и энергоэффективности. Ранние внедрения были сосредоточены на кабинной сигнализации и системах автоматической поездной защиты (Automatic Train Protection, ATP),

обеспечивающих непрерывный контроль скорости и принудительное применение торможения при нарушении эксплуатационных ограничений. Поверх такого защитного уровня автоматическое ведение поезда Automatic Train Operation (АТО) обеспечило автоматическое выполнение режимов движения таких как тяга, выбег, торможение, точная остановка, улучшая пунктуальность, комфорт и показатели энергопотребления. В последние годы переход к цифровым экосистемам управления поездом – например «управление движением поездов на основе радиосвязи» (Communication-Based Train Control, CBTC) в метрополитенах и Европейская система управления движением поездов (European Train Control System ETCS) на магистральных и высокоскоростных линиях – сделал возможной более тесную интеграцию между защитными ограничениями, диспетчерским управлением и бортовым контуром управления.

Степень автоматизации обычно описывается классификацией Grade of Automation (GoA),

определённой в стандарте IEC 62290-1 [13] и включающей пять уровней:

- GoA0 – ручное управление на линию прямой видимости без какой-либо бортовой автоматической защиты. Машинист самостоятельно определяет допустимую скорость по напольным сигналам и несёт полную ответственность за безопасное ведение поезда. Данный уровень характерен для трамвайных линий и отдельных маневровых зон.

- GoA1 – ручное управление с автоматической защитой (АТР). Машинист управляет тягой и торможением, однако бортовая система непрерывно контролирует соблюдение допустимой скорости и разрешения на движение; при нарушении ограничений автоматически инициируется принудительное торможение. Этот уровень соответствует большинству современных магистральных линий, оборудованных, например, ETCS Level 1 или Level 2.

- GoA2 – полуавтоматическое ведение (Semi-Automatic Train Operation, STO). АТО выполняет управление тягой, выбегом и торможением, включая точную остановку у платформы; машинист присутствует в кабине, контролирует состояние дверей, подаёт команду на отправление и вмешивается при нештатных ситуациях. Данный уровень широко применяется в метрополитенах и пилотных проектах АТО over ETCS на магистральных линиях.

- GoA3 – автоматическое ведение в штатных режимах при наличии персонала на борту (Driverless Train Operation – DTO). Поезд автоматически осуществляет движение, включая управление дверями и отправление, однако на борту сохраняется оператор (trainattendant), выполняющий функции при нештатных режимах: эвакуация пассажиров, ручное управление при деградированных режимах, взаимодействие с диспетчерским центром.

- GoA4 – полностью необслуживаемая эксплуатация (Unattended Train Operation – UTO). Персонал на борту отсутствует, поэтому система управления должна автономно покрывать существенно более широкий набор ситуаций, включая безопасные переходы между режимами, реакции на отказы и процедуры восстановления, при возможной поддержке удалённого надзора.

А. Ключевые инженерные вызовы GoA3/GoA4

Достижение GoA3/GoA4 на высокоскоростных и магистральных линиях остаётся сложной задачей из-за следующих причин.

- Вычисления оптимального профиля скорости/позиции по нескольким показателям при строгих ограничениях ETCS и физических ограничениях поезда.

- Устойчивого слежения за траекторией при нелинейности модели и внешних/параметрических

возмущениях (сцепление, уклон/кривая, насыщение приводов).

- Управления переходами режимов при защитных вмешательствах ETCS и при отказах-ограничениях оборудования.

- Сертификационных и кибербезопасностных ограничений.

Распространённым подходом к решению указанных задач является иерархическая архитектура, объединяющая планирование траектории в реальном времени, контур слежения с учётом ограничений и неопределённостей, а также супервизорный уровень (часто реализуемый на основе конечного автомата) для управления логикой режимов и обеспечения плавных переключений между контроллерами без скачков управляющего сигнала. В отличие от метрополитена, где реализация GoA4 во многом упрощается благодаря замкнутой и строго контролируемой эксплуатационной среде, на магистральных и высокоскоростных линиях внедрение, как правило, осуществляется в рамках концепции АТО, работающий в пределах ограничений ETCS, в которой ETCS задаёт и контролирует защитные ограничения, а АТО обеспечивает оптимальное и нормативно-совместимое ведение поезда в пределах этих ограничений.

В. Роль канала связи в контуре управления и ограничения GSM-R

Каждая из перечисленных задач автоматизации неявно предполагает наличие надёжного, предсказуемого и достаточно широкополосного канала связи между поездом и путевой инфраструктурой. На уровнях GoA1–GoA2 роль этого канала относительно ограничена: он используется преимущественно для передачи разрешений на движение (Movement Authority, MA), обновлений ограничений скорости и отчётов о позиции поезда в рамках ETCS Level 2 [14]. Объём передаваемых данных невелик (порядка единиц килобайт на сообщение), частота обмена – единицы Герц, а допустимая задержка измеряется сотнями миллисекунд. В этих условиях GSM-R, спроектированный именно как выделенный узкополосный канал для голосовой связи и ограниченного объёма данных сигнализации, был архитектурно адекватен решаемой задаче [15].

С переходом к GoA3 и особенно GoA4 характер взаимодействия поезда с инфраструктурой принципиально меняется, и канал связи из вспомогательного элемента превращается в критический компонент контура управления. Это обусловлено несколькими факторами.

Во-первых, при отсутствии машиниста (GoA4) или при ограничении его функций до надзорных (GoA3) бортовая система АТО должна в реальном времени получать актуальные данные от центра управления движением (Traffic Management System, TMS) и от путевого оборудования ETCS: обновлённые

разрешения на движение, оперативные корректировки графика, временные ограничения скорости, информацию о состоянии маршрута. В отличие от GoA1/GoA2, где задержка в получении этих данных компенсируется реакцией машиниста, в автоматическом режиме любая задержка или потеря сообщения непосредственно влияет на качество управления – а в предельном случае вынуждает систему перейти в безопасное состояние (как правило, контролируемую остановку), что снижает эксплуатационную доступность линии.

Во-вторых, GoA3/GoA4 требуют устойчивой обратной связи от поезда к инфраструктуре. Бортовая система должна непрерывно передавать отчёты о позиции, скорости, состоянии тормозной и тяговой систем, а также диагностическую телеметрию, необходимую для удалённого надзора. При GoA4 к этому добавляются потоки видеонаблюдения из кабины и салона (для дистанционного контроля обстановки оператором из центра управления), чтократно увеличивает требования к пропускной способности восходящего канала (uplink) – параметру, в котором GSM-R наиболее ограничен (теоретический максимум 14,4 кбит/с в направлении от поезда к сети) [16-17].

В-третьих, перспективные концепции повышения пропускной способности – прежде всего ETCS Level 3 с подвижными блок-участками и виртуальная сцепка (Virtual Coupling) – предъявляют качественно новые требования к каналу связи. ETCS Level 3 предполагает, что определение свободности пути основывается на отчётах самих поездов о своей позиции, а не на стационарных рельсовых цепях или счётчиках осей [6]. Это означает, что надёжность и своевременность доставки отчётов о позиции становятся элементами цепи обеспечения безопасности (safety-critical). Виртуальная сцепка идёт ещё дальше: координированное движение поездов на сокращённых интервалах требует прямого обмена данными между составами (V2V) с задержкой порядка единиц миллисекунд и вероятностью доставки «в срок», измеряемой величинами 99,999% и выше [18-19]. Ни один из этих сценариев не реализуем в рамках архитектуры GSM-R.

В-четвёртых, системы автоматического управления GoA3/GoA4 порождают значительно более разнообразный и объёмный трафик, чем традиционная связь ETCS Level 2. Помимо критических данных управления движением, сеть должна одновременно обслуживать потоки диагностики и предиктивного мониторинга (Condition-Based Maintenance – CBM), массовую телеметрию от бортовых и путевых IoT-датчиков, видеопотоки для удалённого надзора и обнаружения препятствий, а также обеспечивать связь пассажир-центр управления, замещающую функции отсутствующего бортового персонала. Эти потоки различаются по требованиям к задержке, надёжности и

пропускной способности, и ключевой задачей становится не просто «передача данных», а гарантированное разделение сервисов по классам качества – с тем, чтобы широкополосный трафик видеонаблюдения или пассажирского интернета не мог повлиять на своевременную доставку критических сообщений управления.

Именно здесь ограничения GSM-R приобретают не эксплуатационный, а архитектурный характер. Теоретический максимум скорости передачи данных GSM-R составляет 172 кбит/с по нисходящей линии (DL), однако в реальных условиях пакетный трафик через GPRS ограничивается от единиц до десятков кбит/с, а задержка может достигать 400–500 мс. Эти значения несовместимы с целевыми показателями критических сервисов, определёнными в документах 3GPP (TS 22.289) для перспективных железнодорожных приложений: задержка менее 10 мс по высоким перцентильям и вероятность доставки «в срок» порядка 99,999%. Более того, GSM-R не поддерживает развитые механизмы разграничения QoS и логической изоляции ресурсов, сопоставимые с 4G/5G (QoS flows, GBR-профили, admission control по SLA, сетевой слайсинг). В результате при наличии конкурирующей нагрузки обеспечить предсказуемые задержки и гарантированную пропускную способность для критически важных сервисов существенно сложнее, чем в 5G.

Таким образом, переход к высоким уровням автоматизации (GoA3/GoA4) создаёт системное требование к каналу связи, которое не может быть удовлетворено эволюционным развитием GSM-R. Необходима платформа, способная одновременно обеспечивать следующее.

1. Малую и стабильную сквозную задержку (E2E менее 10 мс) для критических контуров управления движением и АТО.
2. Высокую и предсказуемую пропускную способность, особенно в восходящем направлении (uplink), для видеонаблюдения, телеметрии и удалённого надзора.
3. Гарантированное разделение сервисов по классам качества, обеспечивающее защиту критического трафика от влияния широкополосных потоков.
4. Устойчивое выполнение указанных показателей при высокой мобильности (300–350 км/ч), в моменты переключений между сотами (хэндоверов) и в сложных условиях распространения (тоннели, виадуки, встречный разъезд составов).
5. Масштабируемость для подключения большого числа бортовых и путевых датчиков.
6. Архитектурную поддержку прямого обмена данными между поездами (V2V) для перспективных кооперативных режимов.

Именно эти требования легли в основу концепции FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), инициированной Международным союзом железных

дорог (UIC) и реализуемой как отраслевой профиль на платформе 3GPP 5G/5G-Advanced.

Таким образом, связь между уровнем автоматизации и требованиями к системе связи, является не косвенной, а прямой и усиливающейся: чем выше GoA, тем более критичным элементом контура управления становится канал связи, и тем жёстче требования к его характеристикам [19-20]. Внедрение FRMCS на базе 5G/5G-Advanced открывает практическую возможность реализации ETCS Level 3, АТО GoA3/GoA4 и Virtual Coupling – ключевых концепций будущей эксплуатации высокоскоростных железных дорог.

VIII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Канал связи как критический элемент системы управления. Переход к автоматическому управлению поездом (GoA3/GoA4), подвижным блок-участкам (ETCS Level 3) и виртуальной сцепке превращает канал связи «поезд–земля» из вспомогательного средства в компонент контура безопасности, от которого непосредственно зависят эксплуатационная доступность и пропускная способность линии.

2. GSM-R архитектурно исчерпана. Ограничения GSM-R – пиковая скорость 172 кбит/с (DL) и 14,4 кбит/с (UL), задержка 400–500 мс, отсутствие механизмов управления приоритетами и разграничения трафика — несовместимы с требованиями перспективных сервисов (E2E-задержка менее 10 мс, широкополосная телеметрия, разделение критического и некритического трафика) и не могут быть устранены эволюционным развитием стандарта.

3. FRMCS – это архитектурный профиль, а не радиотехнология. Трёхуровневая архитектура FRMCS разделяет стабильные железнодорожные требования (сервисы, интерфейсы, КПЭ) и быстро сменяющиеся телекоммуникационные платформы, что защищает инвестиции от технологического устаревания и обеспечивает эволюционный путь развития.

4. 5G/5G-Advanced обеспечивает технологическую базу для реализации FRMCS. Для ВСЖД критичны не пиковые скорости, а устойчивое выполнение КПЭ при скоростях 300–400 км/ч, частых хэндоверах и смешанной нагрузке. 5G-Advanced усиливает базовый 5G NR в ключевых для железной дороги направлениях: стабильность задержки при высокой мобильности, поддержка массовых датчиков (RedCap), точное позиционирование и автоматизация управления сетью (AI/ML).

5. Ключевое требование – способность сети обслуживать разнородные сервисы с гарантированным качеством для каждого из них. Пригодность системы связи для ВСЖД определяется способностью одновременно обеспечивать различные профили качества: малую задержку для управления движением, высокую пропускную способность для видео и диагностики, масштабируемость для IoT-

датчиков – при гарантированной изоляции критического трафика от пассажирских и широкополосных потоков.

6. Уровень автоматизации прямо определяет требования к связи. Зависимость между GoA и характеристиками канала связи является прямой и усиливающейся: чем выше степень автоматизации, тем больше функций делегируется автоматической системе, тем критичнее роль связи и тем жёстче требования к задержке, надёжности и пропускной способности.

7. Переход к FRMCS – необходимое условие цифровой трансформации. Внедрение FRMCS на базе 5G/5G-Advanced является не отдельным телекоммуникационным проектом, а инфраструктурным условием для реализации всей совокупности целей: от беспилотной эксплуатации и повышения пропускной способности до обеспечения пассажиров высокоскоростным интернетом, поддерживающим экономическую активность при перемещении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Use of 3GPP Technologies by Railways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.3gpp.org/technologies/railways1> (дата обращения: 21.02.2026).
- [2] International Union of Railways (UIC). European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Functional Requirements Specification (FRS). Version 8.1.0 (EIRENE FRS-8.1.0). Version 1.0.0. February 2023. — Paris: UIC, 2023. — 130 p. — ISBN 2-7461-1831-7 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index032_-_EIRENE_FRS_v810.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [3] Knutsen D., Olsson NOE, Fu J. ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future // Journal of Intelligent and Connected Vehicles. — 2023. — No. 6(1). — Pp. 34-45. — <https://doi.org/10.26599/JICV.2023.9210003>.
- [4] Kaifeng Wang, Hui Li, Qi Zhang. Parallel Redundancy Protocol for Railway Wireless Data Communication Network // First published: — 05 April 2022. — <https://doi.org/10.1155/2022/3312569>.
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 22.289 Mobile communication system for railways: архив спецификаций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.289/ (дата обращения: 21.02.2026)
- [6] International Union of Railways (UIC). FRMCS: Future Railway Mobile Communication System [Электронный ресурс]. — 19.09.2023. URL: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs> (дата обращения: 21.02.2026).
- [7] Тихвинский В., Девяткин Е., Белявский В. По пути от 5G к 5G Advanced: Релизы 17 и 18 // Первая миля. — 2021. — №. 6. — С. 38-47.
- [8] ETSI. ETSI TR 103 459 V1.2.1 (2020-08) Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture [Электронный ресурс]. — 2020. — 73 p. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103400_103499/103459/01_02_01_60/tr_103459v010201p.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [9] Rastoceanu F., Grozea C., Enache M., Nelega R., Kovacs G., Puschita E. Mission-Critical Services in 4G/5G and Beyond: Standardization, Key Challenges, and Future Perspectives // Sensors. — 2025. — V. 25. — 5156. — doi: 10.3390/s25165156.
- [10] Ai B., Molisch A. F., Rupp M., Zhong Z.-D. 5G Key Technologies for Smart Railways // Proceedings of the IEEE. 2020. Vol. 108, No. 6. Pp. 856–893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595.

- [11] 3GPP. RAN1, 5G-Advanced and Rel-18 Completion [Электронный ресурс] / Younsun Kim, Xiaodong Xu, David Mazzaresse. — 10.03.2024. — Обновлено: 03.04.2025. — URL: <https://www.3gpp.org/technologies/ran1-rel18> (дата обращения: 21.02.2026).
- [12] Brillhante D. da S., de Rezende J. F., Marchetti N. Handover optimisation for high-capacity low-latency 5G NR mmWave communication // *Ad Hoc Networks*. 2024. Vol. 153. Art. 103328. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103328.
- [13] Samsung Newsroom (Samsung Global Newsroom). World's First LTE-Railway Service on High-speed Train Goes Live in Korea, Supplied by Samsung and KT [Электронный ресурс]. — 21.12.2017. — URL: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt> (дата обращения: 23.02.2026).
- [14] Zhang X., He R., Ai B., Yang M., Ding J., Gao S., Qi Z., Zhang Z., Zhong Z. Cluster-Based Time-Variant Channel Characterization and Modeling for 5G-Railways: arXiv:2412.20943v1 [cs.IT]. — 30.12.2024 [Электронный ресурс]. — DOI: 10.48550/arXiv.2412.20943. — URL: <https://arxiv.org/abs/2412.20943v1> (дата обращения: 23.02.2026).
- [15] Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale // *Communications of the ACM*, – 2013. – No. 56(2). – Pp. 74–80.
- [16] Balasingam et al. Application-Level Service Assurance with 5G RAN Slicing (NSDI/USENIX, 2024).
- [17] ETSI TS 122 002 V19.0.0 (2025-10). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); UMTS; Circuit Bearer Services (BS) supported by a PLMN (3GPP TS 22.002 Release 19) [Электронный ресурс]. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122000_122099/122002/19_00.00_60/ts_122002v190000p.pdf (дата обращения: 23.02.2026).
- [18] Caro J.B., Ansari J., Sachs J., de Bruin P., Sivri S., Grosjean L., König N., Schmitt R.H. Empirical Study on 5G NR Cochannel Coexistence // *Electronics*. — 2022. — Vol. 11, No. 11. — Art. 1676. — DOI: 10.3390/electronics11111676.
- [19] Тихвинский В., Портной С. Перспективы создания и внедрения сетей мобильной железнодорожной связи FRMCS // ПЕРВАЯ МИЛИА. 2021. № 3 С. 54–64.
- [20] Тихвинский В.О., Портной С.Л., Сивицкий П.А., Тихонюк А.И. Эволюция технологий сети FRMCS в релизах 3GPP: вызовы и перспективы // ПЕРВАЯ МИЛИА. 2023. № 2 С. 56–64.

Информация об авторах

Мартынов Сергей Владимирович – магистрант направления подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, sergeytm@mail.ru.

Осовский Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Кутузов Денис Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, d_kutuzov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7963-1259

5G/5G-Advanced network standards for digital transformation of railways and the development of intelligent transport systems

S.V. Martynov, A.V. Osovsky, D.V. Kutuzov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – Transition from the contemporary GSM-R railway communication system to the future FRMCS on LTE/5G technologies as a necessary condition of implementing high levels for train automation (GoA3/GoA4) was described. Papers standardizing FRMCS system and equipment requirements within the International Union of Railways (UIC), the 3GPP consortium, and the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) was reviewed. An overview of the GSM-R standard evolution is presented. Its architectural limitations in the issues of the requirements of future traffic control and autonomous driving services were highlighted. A comparative analysis of GSM-R, LTE-R, 5G, and 5G-Advanced was provided for high-speed railway applications. We show a direct relationship between the grade of automation (GoA) and the requirements for the train-to-ground communication channel.

Keywords – high-speed railway, 5G-Advanced, FRMCS, GoA3/GoA4, GSM-R.

References

- [1] Use of 3GPP Technologies by Railways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.3gpp.org/technologies/railways1> (дата обращения: 21.02.2026).
- [2] International Union of Railways (UIC). European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE). Functional Requirements Specification (FRS). Version 8.1.0 (EIRENE FRS-8.1.0). Version 1.0.0. February 2023. — Paris: UIC, 2023. — 130 p. — ISBN 2-7461-1831-7 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index032_-_EIRENE_FRS_v810.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [3] Knutsen D., Olsson NOE, Fu J. ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future // *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*. – 2023. – No. 6(1). – Pp. 34–45. — <https://doi.org/10.26599/JICV.2023.9210003>.
- [4] Kaifeng Wang, Hui Li, Qi Zhang. Parallel Redundancy Protocol for Railway Wireless Data Communication Network // First published: – 05 April 2022. — <https://doi.org/10.1155/2022/3312569>.
- [5] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 22.289 Mobile communication system for railways: архив спецификаций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.289/ (дата обращения: 21.02.2026).
- [6] International Union of Railways (UIC). FRMCS: Future Railway Mobile Communication System [Электронный ресурс]. — 19.09.2023. URL: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs> (дата обращения: 21.02.2026).
- [7] Tihvinskij V., Devyatkin E., Belyavskij V. Po puti ot 5G k 5G Advanced: Relizy 17 i 18 // *Pervaya milya*. – 2021. – №. 6. – S. 38–47.
- [8] ETSI. ETSI TR 103 459 V1.2.1 (2020-08) Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture [Электронный ресурс]. — 2020. — 73 p. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103400_103499/103459/01_02_01_60/tr_103459v010201r.pdf (дата обращения: 21.02.2026).
- [9] Rastoceanu F., Grozea C., Enache M., Nelega R., Kovacs G., Puschita E. Mission-Critical Services in 4G/5G and Beyond:

- Standardization, Key Challenges, and Future Perspectives // Sensors. – 2025. – V. 25. – 5156. – doi: 10.3390/s25165156.
- [10] Ai B., Molisch A. F., Rupp M., Zhong Z.-D. 5G Key Technologies for Smart Railways // Proceedings of the IEEE. 2020. Vol. 108, No. 6. Pp. 856–893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595.
- [11] 3GPP. RAN1, 5G-Advanced and Rel-18 Completion [Электронный ресурс] / Younsun Kim, Xiaodong Xu, David Mazzaresse. — 10.03.2024. — Обновлено: 03.04.2025. — URL: <https://www.3gpp.org/technologies/ran1-rel18> (дата обращения: 21.02.2026).
- [12] Brilhante D. da S., de Rezende J. F., Marchetti N. Handover optimisation for high-capacity low-latency 5G NR mmWave communication // Ad Hoc Networks. 2024. Vol. 153. Art. 103328. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103328.
- [13] Samsung Newsroom (Samsung Global Newsroom). World's First LTE-Railway Service on High-speed Train Goes Live in Korea, Supplied by Samsung and KT [Электронный ресурс]. — 21.12.2017. — URL: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt> (дата обращения: 23.02.2026).
- [14] Zhang X., He R., Ai B., Yang M., Ding J., Gao S., Qi Z., Zhang Z., Zhong Z. Cluster-Based Time-Variant Channel Characterization and Modeling for 5G-Railways: arXiv:2412.20943v1 [cs.IT]. — 30.12.2024 [Электронный ресурс]. — DOI: 10.48550/arXiv.2412.20943. — URL: <https://arxiv.org/abs/2412.20943v1> (дата обращения: 23.02.2026).
- [15] Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale // Communications of the ACM, – 2013. – No. 56(2). – Pp. 74–80.
- [16] Balasingam et al. Application-Level Service Assurance with 5G RAN Slicing (NSDI/USENIX, 2024).
- [17] ETSI TS 122 002 V19.0.0 (2025-10). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); UMTS; Circuit Bearer Services (BS) supported by a PLMN (3GPP TS 22.002 Release 19) [Электронный ресурс]. — URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122000_122099/122002/19_00_00_60/ts_122002v190000p.pdf (дата обращения: 23.02.2026)
- [18] Caro J.B., Ansari J., Sachs J., de Bruin P., Sivri S., Grosjean L., König N., Schmitt R.H. Empirical Study on 5G NR Cochannel Coexistence // Electronics. — 2022. — Vol. 11, No. 11. — Art. 1676. — DOI: 10.3390/electronics11111676.
- [19] Tihvinskij V., Portnoj S. Perspektivy sozdaniya i vnedreniya setej mobil'noj zheleznodorozhnoj svyazi FRMCS // PERVAYa MILYa. 2021. № 3 S. 54–64.
- [20] Tihvinskij V.O., Portnoj S.L., Sivickij P.A., Tihonyuk A.I. Evolyuciya tekhnologij seti FRMCS v relizah 3GPP: vyzovy i perspektivy // PERVAYa MILYa. 2023. № 2 S. 56–64.

Information about the authors

Sergey V. Martynov – master's student in the program "Infocommunication Technologies and Communication Systems" of the Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, sergeytm@mail.ru.

Alexey V. Osovsky, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Denis V. Kutuzov, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, d_kutuzov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7963-1259