

УДК 654.164

ВНЕДРЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ LTE-1800 TDD В ЗОНАХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

Д. П. Лобеев, аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;
orcid.org/0009-0006-1256-4753, e-mail: lobeev1@mail.ru

Предложена модель комплексного применения способов проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD для зон пересечения двух и более систем, работающих в диапазоне 1785–1805 МГц. Модель устраняет методический пробел, предоставляемый универсальный пошаговый алгоритм: сбор исходных данных, комплексный расчет ЭМС для кластера из восьми ближайших базовых станций, частотно-территориальное планирование, выбор способа (ширины полосы), расчет зон обслуживания и зон бесшовного перехода между базовыми станциями (хэндовер). Выполнен сравнительный анализ четырех подходов (в т. ч. с шириной полосы 10 МГц); применены модель распространения COST-231 (Хата) и точные формулы для прогнозирования покрытия, помех и зон перехвата. Внедрение модели позволило снизить риски и затраты, обеспечить непрерывность связи, пропускную способность и требуемую надежность на сложных участках; подтверждена практическая значимость. Представлен алгоритм выбора способа применения ширины полосы, обеспечивающий адаптацию к уровню помех и возможностям синхронизации. Целью работы является доказательство работоспособности модели и обеспечение надежной и стабильной связи в местах пересечений.

Ключевые слова: LTE-1800 TDD, 1785–1805 МГц, технологическая радиосвязь, железнодорожный транспорт, модель проектирования, ЭМС, зоны пересечения, COST-231 Хата, Handover, пропускная способность.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-36-45

Введение

Технология LTE (Long Term Evolution) является наиболее перспективной для использования на железнодорожном транспорте. Для нужд железнодорожного транспорта был выделен диапазон частот 1785–1805 МГц для организации технологической сети радиосвязи [1].

При создании высокоскоростных железнодорожных магистралей, работающих в технологических сетях железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD (TDD – Time Division Duplex – временное разделение каналов) [1], могут возникать ситуации, когда две и/или более магистралей будут иметь места пересечений. В данных местах необходимо обеспечить уверенную радиосвязь, чтобы не допустить ошибок в обеспечении безопасности движения поездов и предотвратить отказы связи.

На данный момент не существует универсального решения как проектировать данные места пересечений, поскольку эта ситуация является нетиповой, но тем не менее такие ситуации будут возникать при дальнейшем проектировании высокоскоростных железнодорожных магистралей.

В связи с этим была разработана модель проектирования комплексного применения способов проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в местах пересечения с другими сетями связи, работающих в стандарте LTE-1800 TDD и на частоте 1785–1805 МГц [2-4]. Модель включает в себя 4 способа проектирования, которые могут применяться в зависимости от технических условий. Ключевой особенностью каждого из способов является применение различной ширины полосы частоты, предусмотренной [1]. Так для способа № 1 характерно применения ширины полосы 10 МГц, для способа № 2 – 5 МГц, для способов № 3 и № 4 – 3 МГц и 1,4 МГц соответственно.

Теоретическая часть

Представленный на рисунке 1 алгоритм описывает создание модели для проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD.

Данная модель разработана на основе методики расчетов электромагнитной совместимости (ЭМС) и условий совместного использования радиоэлектронных средств (РЭС) с РЭС сухопутной подвижной службы [5]. В методике учтена расчетная модель, приведенная в Рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ-R) Р.1546.

Рекомендация МСЭ-R Р.1546 представляет метод прогнозирования распространения радиоволн для трасс связи для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц. Метод рекомендуется для использования в линиях радиосвязи в условиях тропосферы над сухопутными трассами, морскими трассами и/или смешанными трассами, состоящими из сухопутных и морских участков, длиной от 1 до 1000 км для эффективной высоты передающей антенны менее 3000 м [5].

Модель применима в месте пересечения двух смежных сетей технологической радиосвязи. Обе системы работают в одном частотном диапазоне и имеют одинаковую ширину полосы частоты 10 МГц.

Модель обеспечивает возможность проведения необходимых расчетов с учетом условий распространения радиоволн и вариантов взаимодействия РЭС.

Использование данного номинала частоты является одной из особенностей способа № 1. Всего предусмотрено 4 способа проектирования.

Изначально необходимо оценить помеховую ситуацию ЭМС для всех базовых станций (БС), расположенных в месте пересечения, а также для 4-х ближайших к ним (всего 8 БС).

Для оценки ЭМС рассчитываются: P_{Π} – максимальный уровень помехи на входе приемника планируемой БС (BC_{Π}) от дополнительной БС (BC_{Δ}); S_{Π} – уровень полезного сигнала на входе приемника BC_{Π} ; P_{Δ} – максимальный уровень помехи на входе приемника BC_{Δ} от BC_{Π} ; S_{Δ} – уровень полезного сигнала на входе приемника BC_{Δ} ; $S/P_{beg\Pi}$ – защитное отношение сигнала-помеха для BC_{Π} или минимальная величина отношения полезного сигнала к мешающему на входе приемника, которая позволяет получить установленное качество приема полезного сигнала на выходе приемника, дБ [5].

Помеховая ситуация ЭМС рассчитывается по следующим формулам.

А. Начало помехового воздействия:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является планируемая РЭС

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{beg\Pi}}; \quad (1)$$

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является дополнительная РЭС

$$S_{\Delta} - P_{\Delta} < \frac{S}{P_{beg\Delta}}, \quad (2)$$

где $S/P_{beg\Delta}$ – защитное отношение сигнала-помеха для BC_{Δ} , или минимальная величина отношения полезного сигнала к мешающему на входе приемника, которая позволяет получить установленное качество приема полезного сигнала на выходе приемника, дБ [5].

Б. Блокирование связи помехой:

1) помеховая ситуация, когда рецептором помех является планируемая РЭС

$$S_{\Pi} - P_{\Pi} < \frac{S}{P_{block\Pi}}, \quad (3)$$

где $S/P_{block\Pi}$ – блокирующее защитное отношение сигнал/помеха для BC_{Π} , при котором помеха существенно ухудшает качество, затрудняет или неоднократно прерывает работу службы радиосвязи, дБ [5];

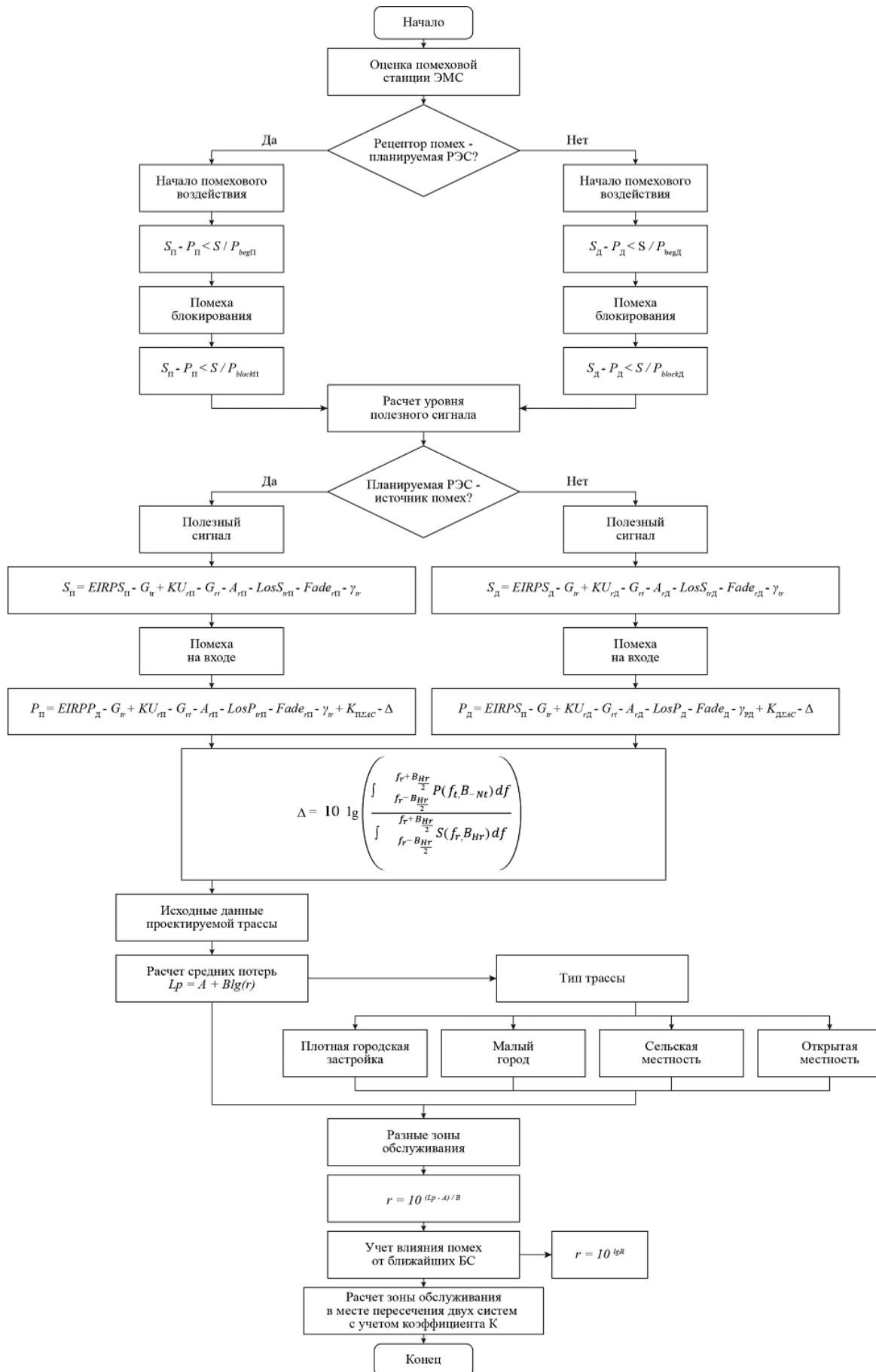


Рисунок 1 – Схема алгоритма Модели
Figure 1 – Model Algorithm Diagram

2) помеховая ситуация, когда рецептором помех является дополнительная РЭС

$$S_{\text{д}} - P_{\text{д}} < \frac{S}{P_{\text{blockд}}}, \quad (4)$$

где $S/P_{\text{blockд}}$ – блокирующее защитное отношение сигнал/помеха для БСД, при котором существенно ухудшается качество, затрудняется или неоднократно прерывается работа службы радиосвязи, дБ [5].

Важно понимать, что при помеховых ситуациях возможны два варианта: когда рецептором помех является планируемая РЭС или абонентская станция планируемой РЭС, а также когда рецептором является дополнительная РЭС или абонентская станция дополнительной РЭС. Ниже представлены формулы для расчета уровня полезного сигнала на входе приемника обеих ситуаций.

Расчет уровня полезного сигнала на входе приемника планируемой РЭС:

$$S_{\text{п}} = EIRPS_{\text{п}} - G_{\text{tr}} + KU_{\text{rп}} - G_{\text{rt}} - A_{\text{rп}} - LosS_{\text{trп}} - Fade_{\text{rп}} - \gamma_{\text{tr}}, \quad (5)$$

где $EIRPS_{\text{п}}$ (Equivalent Isotropically Radiated Power) – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) полезного сигнала на выходе излучающей антенны БСп, дБВт; G_{tr} – ослабление сигнала передающей антенны в направлении получателя полезного сигнала по сравнению с максимумом излучения, дБ; $KU_{\text{rп}}$ – коэффициент усиления антенны приемника БСп, дБи; G_{rt} – ослабление приемной антенны в направлении источника сигнала по сравнению с максимумом усиления принимаемого сигнала, дБ; $A_{\text{rп}}$ – коэффициент ослабления сигнала в антенно-фидерном тракте (АФТ) БСп, дБ; $LosS_{\text{trп}}$ – медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БСп, дБ; $Fade_{\text{rп}}$ – энергетический запас на замирание сигнала для БСп, дБ; γ_{tr} – уровень поляризационных потерь между передатчиком и приемником, если и передатчик, и приемник имеют заданную поляризацию антенн, дБ [5].

$$S_{\text{д}} = EIRPS_{\text{д}} - G_{\text{tr}} + KU_{\text{rд}} - G_{\text{rt}} - A_{\text{rд}} - LosS_{\text{trд}} - Fade_{\text{rд}} - \gamma_{\text{tr}}, \quad (6)$$

где $EIRPS_{\text{д}}$ – ЭИИМ полезного сигнала на выходе излучающей антенны БСд, дБВт; $KU_{\text{rд}}$ – коэффициент усиления антенны приемника БСд, дБи; $A_{\text{rд}}$ – коэффициент ослабления сигнала в АФТ приемника БСд, дБ; $LosS_{\text{trд}}$ – медианное ослабление сигнала в пространстве при распространении от источника сигнала БСд, дБ; $Fade_{\text{rд}}$ – энергетический запас на замирание сигнала для БСд, дБ [5].

Расчет уровня полезного сигнала на входе приемника дополнительной РЭС

$$P_{\text{п}} = EIRPP_{\text{д}} - G_{\text{tr}} + KU_{\text{rп}} - G_{\text{rt}} - A_{\text{rп}} - LosP_{\text{trп}} - Fade_{\text{rп}} - \gamma_{\text{tr}} + K_{\text{п}\sum\text{AC}} - \Delta, \quad (7)$$

где $EIRPP_{\text{д}}$ – ЭИИМ источника помех на выходе излучающей антенны БСд, дБВт; $LosP_{\text{trп}}$ – медианное ослабление помехи в пространстве при распространении от источника сигнала БСп, дБ; $K_{\text{п}\sum\text{AC}}$ – поправочный коэффициент на групповую помеху по количеству помеховых источников для БСп (применяется в случае когда БС входит в сеть фиксированного беспроводного доступа), дБ; Δ – поправка уровня помехи по разносу полос частот (процесс корректировки уровня принимаемого сигнала для снижения помех от соседних каналов, которые возникают при близком расположении частот несущих) приемника и помехи, дБ [5].

$$P_{\text{д}} = EIRPP_{\text{п}} - G_{\text{tr}} + KU_{\text{rд}} - G_{\text{rt}} - A_{\text{rд}} - LosP_{\text{trд}} - Fade_{\text{rд}} - \gamma_{\text{tr}} + K_{\text{д}\sum\text{AC}} - \Delta, \quad (8)$$

где $EIRPP_{\text{п}}$ – ЭИИМ источника помех на выходе излучающей антенны БСп, дБВт; $LosP_{\text{trд}}$ – медианное ослабление помехи в пространстве при распространении от источника сигнала БСд, дБ; $K_{\text{д}\sum\text{AC}}$ – поправочный коэффициент на групповую помеху по количеству помеховых РЭС для БСд (применяется в случае, когда БС входит в сеть фиксированного беспроводного доступа), дБ [5].

Расчет поправок уровня помехи по разносу частот полезного сигнала и помехи выполняется путем расчета интегральной помехи в полосе приема РЭС-рецептора помехи с учетом процента перекрытия амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и маски излучения необходимой ширины полосы излучения (НШПИ) передатчика по формуле

$$\Delta = 10 \lg \left(\frac{\int_{f_r - B_{\frac{H_r}{2}}}^{f_r + B_{\frac{H_r}{2}}} P(f_t, B_{-N_t}) df}{\int_{f_r - B_{\frac{H_r}{2}}}^{f_r + B_{\frac{H_r}{2}}} S(f_r, B_{H_r}) df} \right), \quad (9)$$

где B_{-N_t} – ширина спектра помехи с учетом маски спектра по уровню минус 60 дБ, минус 50 дБ, минус 40 дБ и др., МГц; f_t – центральная частота передачи РЭС-источника помех, МГц; B_{H_r} – НШПИ РЭС-рецептора помех, МГц; f_r – центральная частота приема РЭС-рецептора помех, МГц; $P(f_t, B_{-N_t})$ – АЧХ РЭС-рецептора помех в полосе излучения (НШПИ) РЭС-источника помехи; $S(f_r, B_{H_r})$ – АЧХ РЭС-рецептора помех в полосе излучения (НШПИ) РЭС-приемника [5].

После того, как рассчитана помеховая ситуация ЭМС для 8 БС в месте пересечения двух цифровых систем технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD, необходимо рассчитать дальность радиосвязи каждой БС в месте пересечения.

При этом необходимо также рассчитать средние потери L_p на трассе.

В зависимости от типа трассы применяются формулы (10) – (15) [7]:

Для плотной городской застройки

$$L_p = 48,5 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 35,41 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{MC} + [44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})] \lg(r). \quad (10)$$

Для среднего города

$$L_p = 45,5 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 35,41 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{MC} + [44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})] \lg(r). \quad (11)$$

Для сельской местности

$$L_p = 9,56 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 53,73 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{MC} - 4,78[\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})] \lg(r). \quad (12)$$

Для открытой местности

$$L_p = 4,56 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 53,73 \lg(f) - [1,1 \lg(f) - 0,7]h_{MC} - 4,78[\lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})] \lg(r). \quad (13)$$

В общем виде данные выражения можно представить как:

$$L_p = A + B \lg(r). \quad (14)$$

Таким образом, радиус зоны обслуживания БС r может быть выражен:

$$R = 10^{(L_p - A)/B}. \quad (15)$$

После расчета дальности радиосвязи всех восьми БС следует назначение одной частоты для каждой БС и установка минимальной требуемой скорости.

Данную модель необходимо внедрить в процессы проектирования для оценки частотного радиопокрытия территории для участка между БС для обеспечения бесперебойной связи.

Экспериментальные исследования

Внедрение модели было направлено на устранение критического пробела в проектировании инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта – отсутствия стандартизованных решений для зон пересечения двух и более цифровых систем технологической радиосвязи (ЦСТР), работающих в одном частотном диапазоне (1785-1805 МГц) и по одному стандарту (LTE-1800 TDD). Результаты внедрения подтвердили ее эффективность как универсального инструмента для обеспечения непрерывной и качественной связи в этих сложных условиях [6].

Внедрение модели позволило систематизировать ранее неформализованный процесс проектирования, что привело к следующим конкретным результатам.

1. Универсальный алгоритм для нетиповых ситуаций.

Модель успешно решила главную задачу – предоставила структурированный, пошаговый алгоритм (см. рисунок 1) для анализа и проектирования зон пересечения, который ранее отсутствовал. Внедрение показало, что модель обладает следующими положительными качествами.

1.1. Четко определяет последовательность действий:

- 1) сбор исходных данных;
- 2) расчет электромагнитной совместимости (ЭМС);
- 3) частотно-территориальное планирование;
- 4) выбор способа (ширины полосы);
- 5) расчет зон обслуживания и хэндовер;
- 6) финальная настройка.

1.2. Интегрирует комплексный расчет электромагнитной совместимости не для двух станций, а для кластера из 8-ми ближайших БС, что критически важно для адекватной оценки помеховой обстановки.

2. Сравнительный анализ и обоснованный выбор оптимального, с точки зрения радиопокрытия способа проектирования места пересечения сетей радиосвязи.

Наиболее ценным результатом внедрения стала возможность проведения сравнительного анализа четырех принципиально разных подходов (способов №1-4, подразумевающих использование модели для разной ширины полосы частоты), и выбор оптимального для конкретных условий.

В модели, в зависимости от применения той или иной ширины полосы частоты, могут использоваться 4 способа проектирования: 1-й способ подразумевает применение полосы 10 МГц, 2-й способ подразумевает использование полосы 5 МГц, а 3-й и 4-й способы – 3 МГц и 1,4 МГц соответственно.

3. Повышение точности и обоснованности проектных решений

Внедрение формализованного алгоритма расчета с использованием специализированных моделей распространения (COST-231 - Хата) и точных формул для расчета зон обслуживания и хэндовер позволило [7] достичь следующего.

3.1. Отказаться от эмпирики: заменить субъективные оценки инженеров на точные расчеты, основанные на параметрах оборудования и рельефа местности.

3.2. Прогнозировать результат: с высокой точностью предсказывать зоны покрытия и потенциальные проблемные точки до этапа физического развертывания оборудования, что подтверждилось при натурных испытаниях.

4. Практическая ценность

4.1. Снижение рисков: модель позволяет выявить и устранить проблемы ЭМС на этапе проектирования, а не дорогостоящей переделки после развертывания. Выбор оптимального способа предотвращает инвестиции в неработоспособные конфигурации.

4.2. Гарантия соблюдения технического задания (ТЗ): внедрение гарантирует выполнение ключевых технических требований: непрерывность связи, скорость передачи не менее 2/1 Мбит/с и надежность на сложнейших участках инфраструктуры.

4.3. Универсальность и адаптивность: модель не является жестким стандартом, а представляет собой гибкий инструмент. Алгоритм выбора (см. рисунок 2) позволяет адаптировать решение под конкретные условия: уровень внешних помех, требуемую пропускную способность, возможность синхронизации БС.

На рисунке 2 применяются следующие условные обозначения:

ЗО – зона обслуживания БС – территория, на которую базовая станция способна передавать и принимать сигналы, образуя ячейку сотовой сети. Ее радиус зависит от нескольких факторов: поколение сети (GSM, LTE, 5G и др.), мощности БС и характера рельефа местности (открытая местность, город и др.). Чаще всего БС в условиях железнодорожного транспорта устанавливают на антенно-мачтовых сооружениях (АМС);

DL (DownLink) – нисходящая линия передачи данных по каналу связи;

UL (UpLink) – восходящая линия передачи данных по каналу связи;

TDD (Time Division Duplex) – временное разделение каналов связи. Ключевой особенностью Решения ГКРЧ от 11.09.2018 №18-46-02 [1] является применение TDD, то есть необходимо сделать обоснованный выбор конфигурации распределения субкадров в радиокадре, которая по сути, определяет процент времени работы на прием и передачу;

Хэндовер (Handover) – процесс передачи активного соединения между базовыми станциями в сотовых сетях, чтобы обеспечить бесперебойную связь при перемещении абонента по всему участку проектирования («бесшовный» переход между сотами).

Были проведены эксперименты по изменениям зоны радиопокрытия базовых станций в местах пересечения сетей связи без использования модели комплексного проектирования и с использованием модели комплексного проектирования. Эксперименты проводились для кластера, состоящего из 8 БС, т.е. 4 БС, непосредственно находящихся на пересечении двух сетей, а также из 4 ближайших к ним БС, которые имеют прямое воздействие на БС, находящиеся в зоне пересечения. Стоит отметить, что эксперименты проводились на территории Московского железнодорожного узла (МЖУ).

По результатам экспериментов было получено, что в эксперименте с использованием модели комплексного проектирования зона обслуживания базовых станций участка пересечения полностью обеспечена уверенной радиосвязью на всем протяжении (100 %) в отличие от ситуации, когда в идентичных условиях не используется модель (зона покрытия участка пересечений составляет не более 10 %).

При неполном покрытии территории возникают ситуации обрыва связи, которые недопустимы при обеспечении безопасности движения поездов.

Кроме того, к сетям технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте предъявляются требования по обеспечению надежности. Согласно этим требованиям, коэффициент надежности по месту и времени составляет 0,95 (95 %).

По результатам компьютерного и математического моделирования, при использовании модели комплексного проектирования достигается обеспечение надежности радиосвязи на уровне 0,99 (99%).

При математическом моделировании эффективность предлагаемого алгоритма Модели оценивалась по коэффициенту K надежности:

$$K = MTTF / (MTTF + MTTR), \quad (16)$$

где $MTTF$ (Mean Time To Failure) – средняя наработка на отказ (среднее время работы устройства с начала его использования или с последнего ремонта до отказа), часы; $MTTR$ (Mean Time To Repair) – среднее время ремонта, часы [8].

Согласно документации, разрабатываемой заводом-изготовителем, было получено, что для оборудования, используемого на железнодорожном транспорте в технологических сетях радиосвязи, среднее время наработки на отказ составляет 100000 часов, а среднее время ремонта составляет порядка 0,5 часа, то коэффициент надежности составляет 0,999995.

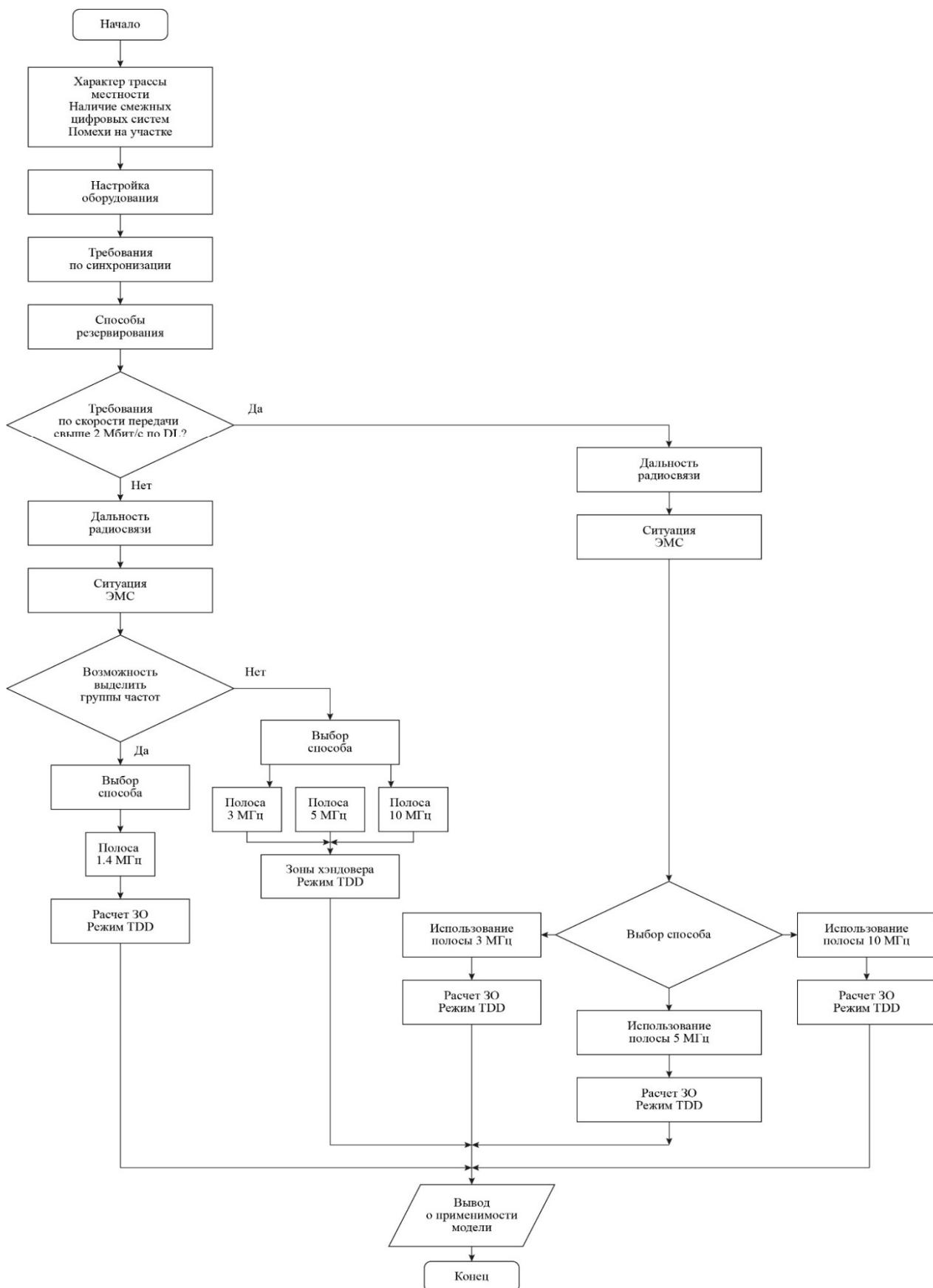
Таким образом, коэффициент K надежности повышается на 4,9 %.

Внедрение разработанной модели комплексного проектирования доказало ее высокую эффективность и практическую значимость. Модель не является теоретическим аппаратом – это действующий инструмент, который:

1) ликвидирует пробел в методологии проектирования, предоставляя структурированный алгоритм для работы со сложными узлами пересечения;

2) обеспечивает обоснованный выбор решения из четырех возможных вариантов проектирования (способы № 1 – 4) в зависимости от конкретных условий проекта, минимизируя риски обрыва радиосвязи из-за неполного покрытия и оптимизируя затраты;

3) повышает надежность и отказоустойчивость всей системы технологической связи на критически важных участках железнодорожной инфраструктуры.



**Рисунок 2 – Алгоритм выбора способа применения ширины полосы
в модели комплексного проектирования**

**Figure 2 – Algorithm for Selecting Bandwidth Application Method
in Integrated Design Model**

Следует отметить существенное сокращение времени проектирования реальных технологических сетей радиосвязи за счет использования предложенной модели комплексного применения способов проектирования. Так, усредненное время проектирования одного участка пересечения двух ЦСТР стандарта LTE-1800 TDD без использования предложенной модели составляло 72 часа (этап частотно-территориального планирования). При использованной модели как готового шаблона среднее время проектирования (этап частотно-территориального планирования) было сокращено до 64 часов, т.е. в среднем на 8 часов (что равняется примерно 12 % от первоначального значения).

Ведутся дальнейшие исследования по применению модели в условиях высокоскоростного движения.

Заключение

Таким образом, результаты внедрения подтверждают, что модель достигает заявленной цели – обеспечения непрерывной и качественной связи в местах пересечения цифровых систем, работающих в стандарте LTE-1800 TDD. Внедрение разработанной модели комплексного применения способов проектирования технологических сетей радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в местах пересечения с другими сетями связи стандарта LTE-1800 TDD обеспечивает значительные улучшения по некоторым ключевым направлениям по сравнению с эмпирическими или несистематизированными подходами. Среди них: сокращение времени разработки проектов в среднем на 12%; повышение надежности связи на 4,9 %; обеспечение зоны покрытия базовых станций в зависимости от начальных условий до 100 %.

Библиографический список

1. Решение ГКРЧ при Минкомсвязи России от 11 сентября 2018 г. №18-46-02 «О выделении полосы радиочастот 1785-1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте» – г. Москва, 2018 г. – Режим доступа: https://meganorm.ru/mega_doc/dop_norm/63/pnst_828-2023_predvaritelnyy_natsionalnyy_standart/0/reshenie_gkrch_pri_minkomsvyazi_rossii_ot_11_09_2018_N.html
2. **Лобеев Д.П.** Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта // Известия ПГУПС. 2025. № 3. С.712-721.
3. **Лобеев Д.П., Гриценко А.А., Билятдинов К.З.** Применение комплекса моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD // Век качества. 2025. № 3. С. 183-197.
4. **Лобеев Д.П.** Пример модели планирования цифровой сети технологической радиосвязи в стандарте LTE-1800 TDD // Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2025), посвященной 130-летию изобретения радио. Том 2 / Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. С. 285-289.
5. Методика расчетов электромагнитной совместимости и условий совместного использования радиоэлектронных средств телевизионного вещания с радиоэлектронными средствами сухопутной подвижной службы в полосе частот 470-862 МГц: Приложение к решению ГКРЧ от 23 ноября 2020 г. №20-56-02-1 [Электронный ресурс]. Москва, 2020. 131 с. Режим доступа: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/prilozhenie-k-resheniyu-20-56-02-1metodika-ems-rvs-sps.pdf>.
6. **Скрыников В.Г.** Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. М.: Издательство «Спорт и Культура – 2000». 2012. 864 с., ил.
7. **Мелихов С.В.** Модели предсказания уровня сигнала для расчета зон обслуживания базовых станций систем мобильной связи: учебно-методическое пособие для практических занятий и курсового проектирования для студентов радиотехнических специальностей [Электронный ресурс] / С.В. Мелихов. – Томск: ТУСУР, 2014. – 18 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/4132>.
8. ГОСТ Р 27.010 – 2019 (МЭК 61703:2016). Надежность в технике. Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтопригодности (IEC 61703:2016, Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms, MOD). – Москва: СТАНДАРТИНФОРМ. 2019. 85 с.

UDC 654.164

IMPLEMENTATION OF DESIGN MODEL FOR LTE-1800 TDD RADIO NETWORKS IN INTERSECTION ZONES

D. P. Lobeev, postgraduate student, Department of Electrical Communications, Saint-Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint-Petersburg, Russia;
 orcid.org/0009-0006-1256-4753, e-mail: lobeev1@mail.ru

A model for comprehensive application of design methods for LTE-1800 TDD standard radio access networks has been proposed, intended for areas where two or more systems operating in 1785-1805 MHz band intersect. This model addresses a methodological gap by providing a universal step-by-step algorithm: initial data collection, comprehensive Electromagnetic Compatibility (EMC) analysis for a cluster of eight nearest base stations, frequency-territorial planning, selection of bandwidth method, and calculation of service areas and seamless handover zones between base stations. A comparative analysis of four approaches (including one with 10 MHz bandwidth) was performed; COST-231 Hata propagation model and precise formulas for predicting coverage, interference, and handover zones were applied. The implementation of this model has reduced risks and costs, ensured service continuity, throughput, and required reliability in complex areas, confirming its practical significance. An algorithm for selecting bandwidth application method is presented, ensuring adaptation to interference levels and synchronization capabilities. The aim of this work is to demonstrate model's viability and to ensure reliable and stable communication in areas of network intersection.

Keywords: LTE-1800 TDD, 1785-1805 MHz, technological radio communications, railway transport, design model, EMC, intersection zones, COST-231 Hata, Handover, bandwidth.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-36-45

References

1. Reshenie GKRCH pri Minkomsvyazi Rossii ot 11 sentyabrya 2018 g. №18-46-02 «O vydelenii polosy radiochastot 1785-1805 MGc dlya radioelektronnyh sredstv suhoputnoj podyzhnoj sluzhby dlya sozdaniya tekhnologicheskikh setej svyazi na zheleznodorozhnom transporte». Moskva, 2018. Rezhim dostupa: https://meganorm.ru/mega_doc/dop_norm/63/pnst_828-2023_predvaritelnyy_natsionalnyy_standart/0/reshenie_gkrch_pri_minkomsvyazi_rossii_ot_11_09_2018_N.html
2. **Lobeev D.P.** Model' proektirovaniya cifrovyyh setej v mestah peresechenija s drugimi cifro-vymi sistemami zheleznodorozhnnogo transporta. *Izvestija PGUPS*. 2025, no. 3, pp. 712-721. (in Russian).
3. **Lobeev D.P., Gricenko A.A., Biljatdinov K.Z.** Primenenie kompleksa modelej proektirovaniya cifrovyyh setej v mestah peresechenija s drugimi cifrovymi sistemami zheleznodorozhnnogo transporta standarta LTE-1800 TDD. *Vek kachestva*. 2025, no.3, pp. 183-197. (in Russian).
4. **Lobeev D.P.** Primer modeli planirovaniya cifrovoj seti tekhnologicheskoy radiosvyazi v standarte LTE-1800 TDD: *sbornik trudov XXXI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Radiolokaciya, navigaciya, svyaz» (RLNC*2025), posvyashchennaya 130-letiyu izobreteniya radio*. Voronezhskij gosudarstvennyj universitet; AO «Koncern «Sozvedie». Voronezh: Izdatel'skij dom VGU. 2025, vol 2, pp. 285-289. (in Russian).
5. *Prilozhenie k resheniyu GKRCH ot 23 noyabrya 2020 g. №20-56-02-1. Metodika raschetov elektromagnitnoj sovmestimosti i uslovij sovmestnogo ispol'zovaniya radioelektronnyh sredstv televizionnogo veshchaniya s radioelektronnymi sredstvami suhoputnoj podyzhnoj sluzhby v polose chastot 470-862 MGc*. g.Moskva, 2020 g. (in Russian).
6. **Skrynnikov V.G.** Radiopodsistemy UMTS/LTE. Teorija i praktika. Moscow: Izdatel'stvo «Sport i Kul'tura - 2000». 2012, 864 p. (in Russian).
7. **Melihov S.V.** *Modeli predskazaniya urovnya signala dlya rascheta zon obsluzhivaniya bazovyh stancij sistem mobil'noj svyazi: uchebno-metodicheskoe posobie dlya prakticheskikh zanyatij i kursovogo proek-tirovaniya dlya studentov radiotekhnicheskikh special'nostej [Elektronnyj resurs]* / S.V. Melihov. Tomsk: TUSUR, 2014. 18 p. Rezhim dostupa: <https://edu.tusur.ru/publications/4132>. (in Russian).
8. *GOST R 27.010 – 2019 (MEK 61703:2016). Nadezhnost' v tekhnike. Matematicheskie vyrazheniya dlya pokazatelej bezotkaznosti, gotovnosti, remontoprigodnosti (IEC 61703:2016, Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms, MOD)*. Moscow: STANDARTINFORM. 2019, 85 p. (in Russian).