УДК 621.396

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РЭС НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

DOI 10.36994/2707-4110-2020-1-28-01

Попов В. И., д.ф.-м.н., проф, Рижский технический университет, г. Рига, Латвия

Шевченко А. В., Рижский технический университет, г. Рига, Латвия

Аннотация. В работе рассматриваются основные проблемы, связанные с электромагнитной совместимостью (ЭМС) радиоэлектронных систем (РЭС) на современном железнодорожном транспорте. Рассматриваются типичные внутренние электромагнитные помехи (EMI), вызванные высокой плотностью размещения оборудования в подвижном составе, и внешние электромагнитные помехи, создаваемые сетями мобильной сотовой связи общего пользования и другими системами радиосвязи. Результаты экспериментов по определению параметров сетей мобильной сотовой связи общего пользования вдоль выбранного участка железной дороги показывают довольно высокий уровень сигналов, которые являются EMI для GSM-R, WiFi и влияют на их EMC.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость (ЭМС), радиоэлектронные системы (РЭС), электромагнитные помехи (ЭМ поехи), гетерогенная сеть (ГС), радио-ресурс (PP), радиочастотный ресурс (PЧP), железнодорожный транспорт (ЖДТ)

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RES ON RAILWAY

Popov V., Dr.hab.phys., prof, Riga Technical University, Riga, Latvia

Shevchenko A., Riga Technical University, Riga, Latvia

Abstract. This work reviews the main related problems of electromagnetic compatibility (EMC) of the locomotive radio system GSM-R in modern railway transport. The typical internal electromagnetic interference (EMI), caused by the high density of the equipment layout in the rolling stock, and external electromagnetic interference generated by public cellular mobile communication networks and other radio systems are considered. The results of experiments to determine the parameters of public cellular mobile communication networks along the selected railway section show a rather high level of signals that are EMI for GSM-R and affecting on EMC.

Keywords: electromagnetic compatibility (EMC), radio electronic systems (RES), electromagnetic interference (EMI), heterogeneous network (HetNet), radio resource (RR), radio frequency resource (RFR), railway transport (railway)

Введение

Современные цифровые беспроводные сети мобильной связи типа GSM-Railway (2G), а в будущем возможно поколения 5G-R, а также сети WiFi, предъявляют повышенные требования к параметрам их электромагнитной совместимости, так как это связано с тем, что в железнодорожных составах (рис.0) разнообразные радиосвязные средств (PCC), различные датчики, микропроцессорные устройства управления и пр. укомплектованы с большой плотностью [1-4]. Следует отметить, что телекоммуникационные сети железнодорожного транспорта в основе своей гетерогенны [3], так как используют как кабельные, так и беспроводные линии связи, обеспечивающие передачу сигналов: речевой и цифровой информации, управления системами автоматики и телемеханики.

Поэтому для обеспечения безопасности, складывается такая электромагнитная обстановка (ЭМО), которая резко усложняет их совместное эффективное функционирование [4, 7-9]. При этом условия эксплуатации радиосвязных средств характеризуются своими особенностями). Одна из них заключается в наличии на подвижных составах разветвлённой сетевой архитектуры, состоящей из самих радиостанций, различных проводящих элементов, пантографа, и других компонентов, показанных на рис.1 и искажающих нормированные характеристики эксплуатируемых радиоприёмных и радиопередающих устройств.

Рис. 1. Электромагнитные помехи (Electromagnetic interferences (EMI)) на ERTMS ЖДТ [5]

Развитие высокоскоростных Европейских железных дорог, появление ERTMS и централизованного управления системами автоматики, телемеханики и связи, приводит к тому, что связь GSM-R становится все более уязвимой от внутренних и внешних помех. Поэтому при проектировании

таких систем необходимы проведения исследований соблюдения условий ЭМС, в соответствии с принятыми стандартами ETSI [1,2,4,5,8,9]. Следует отметить, что в странах Восточной Европы, на железных дорогах которых постепенно устанавливается стандарт GSM-R, до сих пор применяются аналоговые радиостанции в диапазонах 150, 300 и 450 МГц., в случае их использования, они также будут влиять на помеховую обстановку радиосвязных каналов стандарта GSM-R и WiFi. Дополнительно к этому, зоны железнодорожной радиосвязи попадают в кластеры радио-покрытия общественных сотовых сетей мобильной связи соответствующих поколений 2G, 3G, 4G.

Таким образом, проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС на железнодорожном транспорте в настоящее время стоит достаточно остро и требует минимизации внешних помеховых воздействий на условия функционирования РЭС (GSM-R, WiFi) [1-45].

Постановка задачи

Как известно [2], любое передающее радиосвязное средство ПРД1 (TR1 - источник полезного сигнала) создает электромагнитное поле, локализованное в пределах определенной области пространства $V_1(x,y,z)$ (диаграмма направленности антенны при соответствующей поляризации ЭМВ), в выбранной полосе рабочих радиочастот F_1 и в заданном интервале времени T_1 . Введем следующие допущения (рис.2 а,б):

Рис.2 а,б

Схема воздействия ЭМ помех на рецептор, соответственно, а) для случая GSM-R, и б) для случая WiFi (802.11).

Пусть источник полезного радиосигнала создает в пространстве объемом V_1 электромагнитное поле (ЭМП) радиосигнала объемом $V_{1s} = H_1 \cdot F_1 \cdot T_1$ при плотности потока мощности P_1 , т.е. источник сигнала создает подмножество:

$$\Omega_1 = V_1 \cdot V_{1s} \quad (1.1)$$

Пусть на вход радиоприемника (R_1 - рецептора) полезного радиосигнала ПРМ1 действуют источники ЭМ помех, из которых каждый создает ЭМ помехи в пространстве объемом V_j формируется

электромагнитное поле радиосигнала помех объемом $V_{js} = H_j \cdot F_j \cdot T_j$ при плотности потока мощности $\Pi_j(r_j)$, т.е. каждый источник помех создает подмножество

$$\Omega_j = V_j \cdot V_{js} \quad (1.2)$$

а в совокупности подмножество ЭМ помех определится в виде:

$$\Omega_{int} = \sum_{j=1}^{j=n} \Omega_j \quad (1.3)$$

тогда общее подмножество n-источников радиопомех составит:

$$\Omega_{int} = \sum_{j=1}^{j=n} \Omega_j = \sum_{j=1}^{j=n} V_j \cdot V_{js} \quad (1.4)$$

где суммирование реализуется от $j=1$ до $j=n$.

Можно считать, что ПРМ₁ – устройство – как рецептор, является объектом внешнего воздействия и должно обладать определенной пространственной, частотной и временной избирательностью, а также избирательностью по уровню сигнала и по плоскости поляризации. В свою очередь это можно интерпретировать как существование некоторой области Ω_1' в пространстве $V_1'(x,y,z) \cdot V_{1s}'$, в пределах которой данное приемное устройство способно реагировать на внешние электромагнитные воздействия.

Таким образом, область Ω_1' представляет собой «полосу прозрачности» рецептора, как фильтра с определенной избирательностью по пространственным координатам (ДН антенны и поляризация ЭМВ) и по объему сигнала. Если n - источников ЭМ помех создают на входе приемника сигналы помех, то это эквивалентно пересечению подмножеств

$$\Omega_{int} \cap \Omega_1 \quad (1.5)$$

При этом, если выполняется условие

$$\Omega_{int} \cap \Omega_1 = \emptyset \quad (1.6)$$

где $\emptyset$ - знак пустого пространства, то это свидетельствует об отсутствии ЭМ воздействия помех на рецептор и условия электромагнитной совместимости в канале радиосвязи ПРД₁→ПРМ₁ соблюдаются, а уровень ЭМП помехи соответствует естественному электромагнитному фону (например, $\Pi \approx 10 \text{ мкВт/см}^2$).

Если же выполняется условие

$$\Omega_{int} \cap \Omega_1 \neq \emptyset \quad (1.7)$$

то это свидетельствует об активном ЭМ воздействии источников помех на рецептор и о несоблюдении условий электромагнитной совместимости в канале радиосвязи ПРД₁□ПРМ₁.

Из выше изложенного следует, что совокупность радиосвязных систем, размещенных в пространстве, при условии непересекающихся подмножеств электромагнитных полей полезного сигнала и помех, можно определить, как радиочастотный ресурс, для которого соблюдаются условия ЭМС [1-5]. Поэтому целью обеспечения ЭМС радиосвязных систем является

рациональное использование радиочастотного ресурса, что может интерпретироваться как рациональное размещение подмножеств полезного сигнала и помех соответственно пространственным, частотным и временным координатам. Если представить множество радиосвязных средств в виде радиоканалов передачи и приема в пространственных, частотных и временных координатах (с учетом энергетических и поляризационных параметров), то можно ввести понятие Радио Ресурса (РР) – как совокупности возможностей размещения в пространственной, в частотной и во временной областях непересекающихся подмножеств и реализующих их электромагнитную совместимость.

Следовательно, ЭМС можно обеспечить:

– либо по радио частотному ресурсу (Рекомендации ITU, СЕРТ, WRC, FCC и др.),

– либо по энергетическому ресурсу,

– либо по пространственному ресурсу,

– либо по поляризационному ресурсу,

– либо по временному ресурсу,

– либо по комплексу выше перечисленных ресурсов.

Поэтому разрабатываются стратегии и алгоритмы для управления такими параметрами, как рабочие частоты каналов и мощности передачи, распределение пользователей, формирование диаграмм направленностей с соответствующей поляризацией ЭМВ, выбор скоростей передачи данных, схем кодирования ошибок и пр.

Источники помех на подвижных составах ЖДТ

На железнодорожном транспорте сложности по обеспечению ЭМС вызваны высокой плотностью компоновки оборудования на подвижном составе, где силовые устройства и системы управления располагаются рядом, движением тягового подвижного состава вблизи устройств связи и сигнализации, а также тем, что трассировка линий связи и СЦБ организуется параллельно контактной сети. Кроме того, на рецепторы воздействуют внешние непреднамеренные помехи от различных радиоустройств общественного пользования. Все эти факторы обусловили принятие на железных дорогах особо жестких норм, правил и технических требований как к оборудованию, так и к ЭМС. Знание источников и путей передачи помех является решающим в обеспечении электромагнитной совместимости устройств, так как дает возможность изолировать (экранировать) источники помех, повышать устойчивость устройства к внешним мешающим воздействиям и подавлять помехи на пути от их источника к приемнику. На ЖДТ существует четыре возможных пути передачи, соединяющие источники помех с рецептором: внутренние электромагнитные (ЭМ) помехи - емкостная, индуктивная и гальваническая связь, а также внутренние и внешние

радиопомехи [4]. Ёмкостная связь действует на небольшом расстоянии (до нескольких сантиметров) и опасна при параллельной прокладке проводов или кабелей, при этом емкостная связь между кабелями, а значит, и возможными источниками и приемниками помех особенно велика и проявляется в изменении постоянного и низкочастотного напряжения на входе рецептора. Существование индуктивной связи обусловлено токами, протекающими в проводниках, создающих магнитное поле, которое, вызывает индуцированные токи во входной цепи рецептора. Помимо перечисленных выше двух ЭМ помеховых источников, в проводящих цепях возникает гальваническая связь через любые токопроводящие соединения между источниками помех и входом рецептора (куда может входить и тракт заземления). Статические тяговые и вспомогательные преобразователи возбуждают в питающей их сети мешающие токи, которые через рельсы и контактную сеть передаются на тяговую подстанцию. Эти помехи содержат частоты от нескольких герц до 10 кГц. Они могут оказывать мешающее влияние на работу устройств СЦБ и связи, расположенных в зоне рельсов, особенно на рельсовые цепи, устройства АЛСН и приборы системы автоматического управления движением поездов. Эти помехи в основном не выходят за пределы железнодорожных устройств, за исключением телефонных линий. Большие нагрузки в системе электроснабжения вагонов, тяговые и тормозные токи с тактовым регулированием, а также емкостные токи, ответвляющиеся от цепей преобразователей в системы заземления, ведут к образованию магнитных полей в рельсах и подкузовной зоне подвижного состава. Эти ЭМ поля могут в значительной мере осложнять нормальное функционирование устройств СЦБ и радиосвязи, работающих на индуктивном принципе, например, счетчиков осей, точечных и шлейфовых систем АЛС, путевых приемоответчиков и др. Еще одной особенностью подвижного состава в отношении электромагнитной совместимости является близкое расположение элементов силовой электроники от устройств СЦБ и связи, работающих на индуктивном принципе. Крутизна фронта импульсов напряжения в тяговых преобразователях, работающих на запираемых тиристорах, составляет 0,5 – 1 кВ/мкс, а на биполярных транзисторах с изолированным затвором — от 3 до 10 кВ/мкс. Крутизна импульсов тока составляет соответственно 3 – 300 и 30 – 600 А/мкс. В промежуточном звене таких преобразователей напряжение постоянного тока может поддерживаться на уровне от 600 В до 2,8 кВ. В непосредственной близости от преобразователей и подключенных к ним тяговых двигателей, трансформаторов, тормозных резисторов и силовых кабелей должны надежно работать устройства систем СЦБ, рабочий уровень сигналов которых, в зависимости от частоты лежит между несколькими амперами и миллиамперами (или А/м и мА/м).

В последние годы роль электромагнитной совместимости значительно возросла в связи с использованием на подвижном составе компьютерных систем управления и статических преобразователей большой мощности.

Обеспечение электромагнитной совместимости на подвижном составе имеет существенные особенности, которые в значительной степени определяют ее концепцию.

Рис. 3. Схема классификации источников ЭМ помех на ЖДТ.

Таким образом, источники непреднамеренных внешних и внутренних ЭМ помех на подвижных составах ЖДТ для GSM-R можно классифицировать согласно схеме рис.3 на:

- внутренние ЭМ помехи от систем питания, автоматики и телемеханики, емкостные, индуктивные, контактные помехи, ЭМ помехи от аналоговых локомотивных радиостанций и WiFi сети;
- внешние радиопомехи: от систем поездной радиосвязи, от общественных сотовых сетей мобильной связи 2G, 3G, 4G; WiFi и WiMAX сетей, от УКВ общественной радиосвязи, от радиорелейных и радиолокационных станций и пр.

Особенности влияния ЭМ помех от постоянных токов и от низкочастотных помех на ЭМС

ЭМ помехи от систем питания, автоматики и телемеханики, емкостные, индуктивные и контактные помехи (в частотном диапазоне до 100 МГц) вызывают следующие влияния на параметры рецептора GSM-R:

- 1) Изменяются напряжения питания транзисторных каскадов рецептора;
- 2) изменяются статические и динамические их характеристики;
- 3) изменяются положения рабочих точек транзисторов, особенно входных СВЧ усилителей рецепторов и пр.

В конечном счете всё это приводит к нелинейным искажениям усиливаемых и демодулируемых речевых сигналов и сигналов передачи данных. Чем выше уровни данных ЭМ помех, тем выше степень нелинейных искажений. Так, например, исследования ЭМ помех тягового подвижного состава показывают, что особо важным фактором является интенсивность электромагнитных излучений, мешающих радиоприему рецептора. Уровни указанных ЭМ помех снижаются при тщательном заземлении устройств, экранировании, установке фильтров, прокладки силовых проводов и линий для систем управления и регулирования в виде кабелей различных категорий [1].

Рис.4 [1]

Особенности влияния ЭМ помех от радиостанций подвижного состава на ЭМС

Следует отметить, что радио помехи, возникают как внутри (электрические и электронные компоненты самого рецептора), так и вне рецептора GSM-R (обусловлены работой различных радиостанций в подвижном составе: аналоговые и цифровые поездные радиостанции (ПРС), дополнительно включенные за счет отличия от стандарта GSM-R, WiFi устройства (Рис.5а,б). Кроме того, ЭМ помехи генерируются общественными сотовыми сетями мобильной связи, радиорелейными линиями, радарам и пр. источниками. Главными помеховыми параметрами для GSM-R репитера, работающего в диапазоне радиочастот: 879-876 и 921-925 МГц (рис.6) и имеющего чувствительность приемника порядка (-100 дБм)), которые влияют на ЭМС, являются:

Рис. 5 а,б

Рис. 6

1) достаточно высокий уровень потоков мощности излучаемых антеннами аналоговых и цифровых радиостанций (как внутри, так и вне локомотива), которые попадая на вход рецептора, могут значительно превышать уровень полезного сигнала (например, внутри локомотива поездная радиостанция РВ-1, при выходной мощности порядка 10 Вт и средней частоте 150 МГц и цифровая радиостанция DRM, например, ретранслятор MOTOTRBO серии SLR 5000 (таблица 1) при выходной мощности порядка 60-50 Вт в диапазоне частот от 146 до 470 МГц, могут создавать значительного уровня ЭМ помехи, вызывая нелинейные искажения цифровых сигналов GSM-R;

Таблица 1.
Основные характеристики MOTOROLA SLR 5500

Частотный диапазон	ОВЧ: 146-174; УВЧ:403-410, 417-422, 433-450, 469-470 МГц
Выходная мощность	1-40 Вт (ОВЧ), 1-50 Вт (УВЧ)
Ширина полосы излучения -30 дБ	11 кГц, 16 кГц
Чувствительность (среднее значение)	0,22 мВ
Чувствительность (12 дБ SINAD) EIA	0,3 мВ
Разнос каналов (кГц)	1,25; 25

2) сигналы гармоник радиостанций (например, 6 –я гармоника РВ-1 при стандартной несущей частоте в 150 МГц и 2-я гармоника при частоте 450 МГц) передаются в тракт рецептора и вызывают также искажение полезного сигнала.

В настоящее время на Восточно-Европейских железных дорогах еще используется аналоговая радиосвязь на выделенных полосах частот: 2,13 МГц (диапазон ГМВ); 150 МГц (диапазон МВ); 300 МГц; 450 МГц (диапазон ДМВ). При выполнении ими рекомендаций по одновременному использованию работающих радиостанций стандарта GSM-R и устаревших

аналоговых и использовании цифровых радиостанций (например, РВ-1, мощность передатчиков которых составляет порядка 10 Вт., при средних рабочих частотах 150, 450 МГц и цифровой DRM), антенны которых, расположены на крыше локомотива на расстояниях не превышающих 10 м., приводят к тому, что главными помеховыми параметрами для GSM-R репитера (при 876-880 и 921-925 МГц (рис.6) и чувствительности приемника (репитера) порядка (-100 дБм)), которые влияют на ЭМС GSM-R в данном случае являются: 1) высокий уровень потоков ЭМ мощности излучаемых антеннами аналоговых и цифровых радиостанций; 2) высокий уровень гармоник сигналов, излучаемых антеннами этих радиостанций (так, сигнал 6 –ой гармоники при стандартной несущей частоте в 150 МГц и 2-ой гармоники при частоте 450 МГц). Указанные помеховые параметры будут не только вызывать нелинейные искажения в тракте репитера, но и приводить к изменению величин BER и К-фактора полезного канала.

Особенности влияния ЭМ помех WiFi сети, используемой на ЖДТ, на ЭМС

Рис. 7 WiFi – GSM-R

В настоящее время широкое распространение в пассажирских поездах получило использование сети WiFi, позволяющее пассажирам работать через сеть WiFi, WiFi – GSM-R в интернете (рис.7). Несмотря на значительное расстояние по частоте для точек доступа (2,4 или 5,9 ГГц), уровни сигналов от них создают ЭМ помехи для полезного канала GSM-R, что также скажется на снижении ЭМС поездной радиосвязи.

Особенности влияния ЭМ помех общественных сотовых сетей мобильной связи на EMC GSM-R

Рис. 8.

Таблица 2 [34]

Broadcasting services	
Broadcasting services	Frequency range
AM radio	500 kHz–1.6 MHz
FM radio	88–108 MHz
DAB	217–230 MHz: band III/1.452–1.492 GHz: band L
GSM 900	854–960 MHz
GSM 1800	1.71–2.7 GHz
broadcasting TV	470–590 MHz/598–854 MHz
GPS	1.53–1.66 GHz
WiFi	2.4 GHz
RFID	2.450–5.800 GHz

Серьезные проблемы, возникают при построении систем мобильной радиосвязи GSM-R, которые связаны как с воздействием внешних ЭМ помех от общественных сотовых сетей, так и со специфическими условиями функционирования используемых каналов ССМС (Рис.8. и таблица 2)

Следствиями отмеченных факторов являются более резкое по сравнению со свободным пространством затухание радиосигналов в зависимости от расстояния, а также значительные перепады принимаемой мощности за счет изменения многолучевой интерференционной картины при перемещении абонентского терминала, т.е. замирания сигналов. Особо следует отметить внутрисистемные (соканальные) помехи для локомотивного рецептора GSM-R, обусловленные одновременной работой в одной полосе частот нескольких GSM общественных радиостанций (например, абоненты, работающие на одной частоте в соседних кластерах, или базовые станции соседних сот сотовой сети). Помехи соседних каналов особенно распространены в случаях,

когда передача по соседнему каналу ведется в непосредственной близости от приемника рецептора, в то время как этот аппарат пытается принять сигнал базовой станции на соседней частоте. Такую ситуацию называют эффектом ближнего и дальнего конца, и чаще всего она возникает, когда рецептор принимает от базовой станции слабый сигнал (Рис.9а,б).

- 1) зоной действия ССМС являются, в основном, города и пригороды с различными плотностью и характером застройки, интенсивностью движения различного вида транспорта, типом подстилающей поверхности;
- 2) локомотивная мобильная станция GSM-R может находиться вне прямой радиовидимости базовой станции (например, на поворотах);
- 3) сигнал в точку приема, как правило, поступает в результате многолучевого распространения ЭМВ, т.е. переотражения и рассеяния от многочисленных препятствий (здания, деревья, подстилающая поверхность);
- 4) при движении локомотивной мобильной станции возникает доплеровский сдвиг частоты.

Рис. 9. а) Пример спектра уровней ЭМ помех, б) пример воздействия ЭМ помехи малой мощности на работу цифрового канала

Следует отметить, что электрические и электронные компоненты радиостанции самого подвижного состава генерируют электромагнитные поля различной мощности и частоты, распределенные в пространстве и во времени, которые создают помехи для радиоприемников других поездных радиостанций, мобильных телефонов, переносных радиостанций поездной или производственной связи, носимых радиостанций персонала служб безопасности. При этом частоты этих помех лежат в диапазоне от 100 кГц до 2 ГГц, но могут распространяться и в более высокие диапазоны за счет гармоник, а уровни потоков мощности меняются в широких пределах (таблица 3).

Следствиями отмеченных факторов являются более резкая, по сравнению со свободным пространством, флуктуация радиосигналов в зависимости от расстояния, а также значительные перепады принимаемой

мощности за счет изменения многолучевой интерференционной картины при перемещении рецептора.

Таблица 3 [34]

Minimal signal strength, protection ratio and tolerable levels of interference for broadcasting services

Broadcasting services	Minimal signal strength, dB $\mu\text{V m}^{-1}$	Protection ratio, dB	Tolerable level of interference, dB
88–108 MHz (FM radio)	60	45	15
217–230 MHz: band III (DAB)	35	6.5	28.5
RFID	38	9	29
854–960 MHz (GSM 900)	38	9	29
1.71–2.7 GHz (GSM 1800)	38	9	29
470–590 MHz/598–854 MHz (broadcasting TV)	56	4	52

Рис. 10. Измерениям CCMC в программных комплексах Network Cell Info и G-NetTrack

Особо следует отметить внутрисистемные (со-канальные) помехи для локомотивного рецептора GSM-R, которые обусловлены одновременной работой в одной полосе частот нескольких GSM общественных радиостанций (например, абоненты, работающие на одной частоте в соседних кластерах, или базовые станции соседних сот сотовой сети). ЭМ помехи соседних каналов особенно распространены в случаях, когда передача по соседнему

каналу ведеться в непосредственной близости от приемника рецептора, в то время как этот аппарат пытается принять сигнал базовой станции на соседней частоте. Такую ситуацию называют эффектом ближнего и дальнего конца, и чаще всего она возникает, когда рецептор принимает от базовой станции слабый сигнал. На рис.10 и 11 показаны экспериментальные измерения KPI сотовых сетей мобильной связи в городе Риге с использованием программных комплексов Network Cell Info и G-NetTrack для выбранных трасс.

Рис. 11. Карта радио покрытия сети GSM и LTE у оператора Bite вдоль железнодорожной линии Torņakalns – Tukums II

Методы оценки ЭМС, когда для нескольких радиостанций, размещенных в локомотиве, требуется обеспечить совместное функционирование с заданным качеством

Как известно, при анализе ЭМС радиостанций используют ряд приближенных оценок: парную, групповую и комплексную. В общем случае временные, частотные, энергетические, поляризационные и пространственные параметры, характеризующие ЭМС, могут быть сколь угодно различными в контексте как детерминированного, так и вероятностного подходов. Оценку ЭМС обычно реализуют по нескольким группам источников ЭМ помех. Так для ЭМ помех от внутренних источников, которые фиксированы в пространстве и во времени целесообразно использовать детерминированный подход, так как уровни мощностей источников ЭМ помех, их расположение, ориентация и поляризация их антенн строго фиксированы. Классическим критерием ЭМС является условие, при котором уровень непреднамеренных ЭМ помех на входе рецептора не превышает допустимый уровень:

$$P_j \leq P_{per} \quad (9.1)$$

где P_j – уровень ЭМ помех, dBm, P_{per} – допустимое значение уровня непреднамеренных помех, dBm.

В общем случае необходимо оценивать совокупное воздействие множества независимых помеховых сигналов на рецептор, характеризующихся различными случайными уровнями мощности, частотами, направленными свойствами и расположением антенн и пр. Так, например, сигналы ЭМ помех от общественных базовых станций в точке

расположения рецептора в локомотиве в общем случае являются случайными величинами. Поэтому наиболее целесообразно проведение статистической оценки ЭМС с учетом множества случайных параметров радиосетей, окружающих локомотив. Для этого наиболее целесообразно использовать алгоритмы статистической оценки ЭМС с применением метода Монте-Карло, которые изложены в Рекомендациях Международного Союза Электросвязи (МСЭ). Согласно этим рекомендациям для статистической оценки ЭМС применяются пакеты программ SEAMCAT-2 (Spectrum Engineering Advanced Monte-Carlo Analysis Tool), SEAMCAT-3, SEAMCAT-5 (разработанные ERC (European Radio Communications committee)). Так в SEAMCAT-2 моделирование основано на генерации и обработке серий реализаций функционирования сети, каждая из которых представляет собой выборку случайных значений ряда статистических параметров сети на основе их заданных распределений. Вычисляются значения мощности сигнала и помех на входах рецепторов. Расчетные значения отношения энергии сигнала на бит к шуму в программе проверяются на выполнение заданных требований по ЭМС. Результатом обработки группы реализаций является вероятность выполнения условий ЭМС.

Выводы

Источники непреднамеренных внешних и внутренних электромагнитных помех на подвижных составах ЖДТ для GSM-R от систем питания, автоматики и телемеханики, от аналоговых радиостанций, WiFi сети, от систем поездной радиосвязи, общественных сотовых сетей мобильной связи 2G, 3G, 4G, WiMAX сетей, от УКВ общественной радиосвязи, радиорелейных и радиолокационных станций и пр. приводят к тому, что проблема электромагнитной совместимости GSM-R на железнодорожном транспорте в настоящее время стоит достаточно остро и требует моделирования основных параметров сотовой GSM-R сети, тщательных измерений и мониторинга этих параметров (с использованием программных комплексов), выполнения требований минимизации внешних помеховых воздействий на условия функционирования GSM-R сети, в соответствии со стандартами ETSI standards EN 50121 (EN 50121-3-2 Railway applications – EMC – Rolling stock, EN 301 489-7 for GSM and DCS mobile equipment) на ЭМС.

Литература

1. Humbert H.-J. et al. EMC rolling stock. Elektrische Bahnen, 2000, № 11/12, S. 399 – 410.
2. Popovs V. GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēma. Rīga: RTU Izdevniecība, 2003, 392 lpp.
3. Popov V. Electromagnetic compatibility of radio systems on transport. Lecture. Riga-Almaty: RTU/KazAT, 2012, 709 p. (E-version).
4. Popov V., Skudnov V., Vasiljev A., Shevchenko A. Simulation model of modern HetNet. Design and experimental researches. M.: MSU, Modern information technology and IT –education, 2017, v. 13, № 1, p.p.190-198

5. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railway. Analysis and Management. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, 2013.
6. Railway Standard EN 50121, Date: 17 Nov 2007.
7. Уайт Д. Электромагнитная совместимость и непреднамеренные помехи. М.: Сов. Радио, 1977, 352 с.
8. Седельников Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Казань: ЗАО «Новое знание», 2006, 304 с.
9. Hammi T., Ben Slimen N., Deniau V., Rioult J. and Dudoyer S. Comparison between GSM-R coverage level and EM noise level in railway environment, Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport System-Telecommunications, ITST 2009, pp 123-128, October 2009, Lille, France.
10. Dudoyer S., Ben Slimen N., Deniau V. and Berbineau M. Reliability of the GSM-R Communication System against Railway Electromagnetic Interferences. Univ. Lille Nord de France- F-59000 Lille, IFSTTAR, LEOST, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France. 9 Word Congress " Railway Research", May 22-26, 2011.

References

1. Humbert H.-J. et al. EMC rolling stock. Elektrische Bahnen, 2000, № 11/12, S. 399 – 410.
2. Popovs V. GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēma. Rīga: RTU Izdevniecība, 2003, 392 lpp.
3. Popov V. Electromagnetic compatibility of radio systems on transport. Lecture. Riga-Almaty: RTU/KazAT, 2012, 709 p. (E-version).
4. Popov V., Skudnov V., Vasiljev A., Shevchenko A. Simulation model of modern HetNet. Design and experimental researches. M.: MSU, Modern information technology and IT –education, 2017, v. 13, № 1, p.p.190-198
5. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railway. Analysis and Management. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, 2013.
6. Railway Standard EN 50121, Date: 17 Nov 2007.
7. Уайт Д. Электромагнитная совместимость и непреднамеренные помехи. М.: Сов. Радио, 1977, 352 с.
8. Седельников Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Казань: ЗАО «Новое знание», 2006, 304 с.
9. Hammi T., Ben Slimen N., Deniau V., Rioult J. and Dudoyer S. Comparison between GSM-R coverage level and EM noise level in railway environment, Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Transport System-Telecommunications, ITST 2009, pp 123-128, October 2009, Lille, France.
10. Dudoyer S., Ben Slimen N., Deniau V. and Berbineau M. Reliability of the GSM-R Communication System against Railway Electromagnetic Interferences. Univ. Lille Nord de France- F-59000 Lille, IFSTTAR, LEOST, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France. 9 Word Congress " Railway Research", May 22-26, 2011.