

УДК 656.25: 621.318.5

В. И. ГАВРИЛЮК – д. ф.-м. н., проф., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, vl.havryliuk@gmail.com

НОРМЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ С СИСТЕМАМИ СИГНАЛИЗАЦИИ И СВЯЗИ

Введение

Электромагнитной совместимостью (ЭМС) технических средств называется способность их функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) другим техническим средствам. Электрифицированные железные дороги (ЭЖД) являются мощным пространственно распределенным источником электромагнитных помех [1–6]. Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости ЭЖД со слаботочными линиями автоматики и связи решались на начальном этапе проектирования и электрификации железных дорог. Однако проблема электромагнитной совместимости на ЭЖД сохраняет свою актуальность и в настоящее время. Это обусловлено применением в последнее время на магистральном железнодорожном транспорте электроподвижного состава (ЭПС) с асинхронным тяговым приводом (АТП), увеличением скоростей движения поездов, внедрением новых микропроцессорных систем контроля и управления перевозками [1, 2].

Проблемы электрической совместимости на железнодорожном транспорте должны быть решены в рамках открытого европейского рынка железнодорожных перевозок. Это обусловлено необходимостью в перспективе свободного проследования поездов через государственные границы с различающимися техническими системами тягового электроснабжения, сигнализации и связи.

Новые типы подвижного состава (ПС) перед вводом в эксплуатацию подвергают приемочным испытаниям по определенной

программе, которая включает испытания на ЭМС [1, 3–6]. В Украине испытания на ЭМС до недавнего времени проводили на соответствие нормам из технических условий на подвижной состав, которые базировались, главным образом, на таких нормативных документах: НБ ЖТ ЦТ 03-98 «Электропоезда. Нормы безопасности», НБ ЖТ ЦТ 04-98 «Электровозы. Нормы безопасности», а также стандарте ГОСТ 29205-91 на радиопомехи промышленные от электротранспорта. Применение последнего стандарта было разрешено включением его в перечень национальных стандартов, которые являлись доказательством соответствия продукции требованиям Технического регламента по ЭМС, утвержденного постановлением Кабинета Министров Украины от 29.08.2009, № 785.

В Европейском союзе в 2004 году была принята Директива 2004/108/ЕС «Электромагнитная совместимость – Electromagnetic compatibility directive (EMC)», которая определяла основные требования по электромагнитной совместимости, обязательные для выполнения производителем, импортером или дистрибьютором, а также европейские нормы (EN), регламентирующие требования на электромагнитную совместимость продукции. Взамен этой директиве 18 апреля 2014 года была введена новая директива на электромагнитную совместимость 2014/30/EU.

В условиях расширения кооперации украинских железных дорог, использования новых типов подвижного состава с асинхронным тяговым приводом (АТП), внедрения новых микроэлектронных систем управления движения поездов необходимо

совершенствование национальной нормативной базы путем гармонизации с международными стандартами с учетом технических особенностей национальных систем.

Целью работы является проведение обзора норм и методов испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи в соответствии с международными нормами и с учетом специфики украинских систем управления движением поездов.

Обзор международных норм на ЭМС

В 2006 году в Евросоюзе была принята серия стандартов EN 50121 из пяти частей, направленная на обеспечение электромагнитной совместимости продукции железнодорожного назначения в соответствии с требованиями Директивы по ЭМС. Первая часть стандарта (EN 50121-1:2006 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 1: General) содержит общее введение в проблему, обзор структуры и содержания всех частей стандарта EN 50121, а также определяет критерии качества функционирования железной дороги как целостной системы и рассматривает управление процессом достижения ЭМС на интерфейсе между железнодорожной инфраструктурой и поездом.

Часть 2 стандарта (EN 50121-2 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world) рассматривает интерфейс между железной дорогой и окружающей средой, устанавливает предельные значения эмиссии помех для всей железнодорожной системы, включая тяговые подстанции, описывает методы измерения помех.

Часть 3 стандарта состоит из двух подразделов.

Подраздел 3-1 (EN 50121-3-1 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-1: Rolling stock – Train and complete vehicle) рассматривает требования к поме-

хам и уровни помехозащищенности для всех типов подвижного состава, а также методы их измерений.

Подраздел 3-2 стандарта (EN 50121-3-2 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-2: Rolling stock – Apparatus) определяет предельную эмиссию помех, уровни и критерии помехозащищенности для бортовой аппаратуры подвижного состава в частотном диапазоне от 0 до 400 ГГц, размещение бортовой аппаратуры. Указано, что тесты должны определяться конкретной аппаратурой, ее конфигурацией, имеющимися портами, условиями функционирования.

Часть 4 стандарта (EN 50121-4 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus) рассматривает сигнальную и телекоммуникационную аппаратуру, определяет нормы эмиссии и уровни помехозащищенности, критерии качества функционирования аппаратуры, методы измерений помех.

Часть 5 стандарта (EN 50121-5 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus) рассматривает вопросы ЭМС и помехоустойчивости для электрических и электронных приборов и систем, предназначенных для использования в железнодорожных установках, связанных с электроснабжением. Указаны пределы эмиссии и уровни помехоустойчивости для устройств, расположенных на тяговой подстанции и для линейных устройств электроснабжения [7].

В Украине в рамках выполнения Директивы 2014/30/ЕС были приняты национальные стандарты, идентичные гармонизированному европейскому стандарту EN 50121.

Аналогичные по содержанию нормативные документы, регламентирующие требования по ЭМС применительно к железнодорожному транспорту, приняты международной электротехнической комиссией (МЭК) [8].

Однако эти стандарты не определяют требования по обеспечению ЭМС подвижного состава в отношении национальных систем сигнализации и связи (рельсовых цепей, локомотивной сигнализации, радиосвязи), которые различаются по конструкции, принципу действия, рабочим частотам и другим эксплуатационным параметрам. Так в европейских странах насчитывается более 27 различных систем сигнализации и связи. Соответственно, требования к электромагнитным помехам, генерируемым подвижным составом, должны быть конкретизированы в каждой стране в зависимости от применяемых в ней систем управления движением поезда. Различие систем сигнализации, связи и электроснабжения в европейских странах вызывает необходимость проведения испытаний ЭПС в каждой стране отдельно, с учетом особенностей, используемых в ней технических систем, что значительно увеличивает стоимость внедрения новых типов подвижного состава.

В стандарте CENELEC – EN 50238-1 рассмотрены общие подходы к обеспечению совместимости подвижного состава и систем контроля положения поезда. Указано, что процедура приемки подвижного состава должна проходить с учетом специфики национальных систем сигнализации.

Предельные значения тока помех от подвижного состава в рельсовых цепях для основных типов электроснабжения, рельсовых цепей, путевых датчиков, применяемых в странах ЕС, рассмотрены в CENELEC – CLC/TS 50238-2. Отмечено, что для рельсовых цепей, которые не приведены в стандарте, необходимо использовать национальные правила и инструкции, направленные на достижение ЭМС.

Требования по обеспечению электромагнитной совместимости и методам испытаний железнодорожного подвижного состава с устройствами сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), аналогичными по конструкции и принципу действия применяемым украинским системам, изложены в дополнительных разделах

ГОСТ Р 55176.3.1-2012 и в ГОСТ Р 55364-2012. Однако этот документ не имплементирован в Украине.

Новые типы подвижного состава с асинхронным тяговым приводом содержат в обратном тяговом токе гармонические составляющие в широком частотном диапазоне, который перекрывает все частоты сигнального тока и автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), применяемых в Украине. Возможны случаи, когда при положительных результатах испытаний, проведенных в полном объеме на специально выделенном свободном от другого подвижного состава участке железной дороги, в процессе дальнейшей эксплуатации на сети железных дорог, на отдельных ее участках проявляются сбои в работе систем локомотивной сигнализации. Это может быть связано с тем, что эти участки проектировались ранее для подвижного состава другого типа, рассчитанного на меньшие скорости движения и меньшие значения тягового тока. Возможными причинами сбоев в работе систем АЛСН могут быть другие факторы, таких как пониженное сопротивление изоляции балласта, особенности схемы канализации тягового тока, длина и асимметрии рельсовой линии, насыщение дроссель-трансформатора и т.д. Возможно также проявление перемежающихся сбоев АЛСН при сочетании ряда неблагоприятных факторов.

Следует также иметь в виду, что испытания проводят при обращении одной единицы подвижного состава на выделенном полигоне, в то время как в процессе эксплуатации возможно движение одновременно нескольких поездов на участке в пределах фидерной зоны. Измерить помехи от нескольких локомотивов при сочетании всех возможных, в том числе и самых неблагоприятных внешних факторов, практически невозможно. Для проведения таких исследований используют компьютерное моделирование.

В качестве исходной информации применяют реальные значения помех, измеренные в процессе полевых испытаний по-

движного состава. Некоторые аспекты проблемы рассмотрены в работах [1, 3–6, 9–12]. Исходя из проведенного обзора, можно сказать, что испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с национальными системами сигнализации и связи необходимо проводить на основе национальных и имплементированных международных стандартов и с учетом опыта, накопленного в научно-исследовательских лабораториях Украины.

В соответствии с поставленной целью, ниже приведен аналитический обзор требований по электромагнитной совместимости подвижного состава с системами сигнализации и связи в соответствии с международными нормативами.

Испытания подвижного состава на ЭМС с устройствами сигнализации и связи

В процессе испытаний новых типов ПС на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи проводят измерения следующих параметров:

- напряженность поля электромагнитных помех, создаваемых железнодорожным подвижным составом на стоянке и в режиме движения;
- напряжение электромагнитных помех, создаваемых железнодорожной радиосвязи и в бортовой сети подвижного состава, питающей радиостанции;
- мешающее влияние электропоездов и электропоездов на кабельные и проводные линии связи;
- мешающее влияние электропоездов, электропоездов, пассажирских вагонов с высоковольтным преобразователем на рельсовые цепи сигнализации, централизации, блокировки и устройства автоматической локомотивной сигнализации.

Международные нормы на эти виды испытаний приведены в следующих разделах работы.

Допустимая напряженность поля помех, создаваемых подвижным составом

Предельно допустимая напряженность поля электромагнитных помех, создаваемых железнодорожным подвижным составом на стоянке и в режиме движения в диапазоне частот 0,15 МГц–1 ГГц в соответствии с ДСТУ EN 50121, представлены графиками на рис. 1, 2.

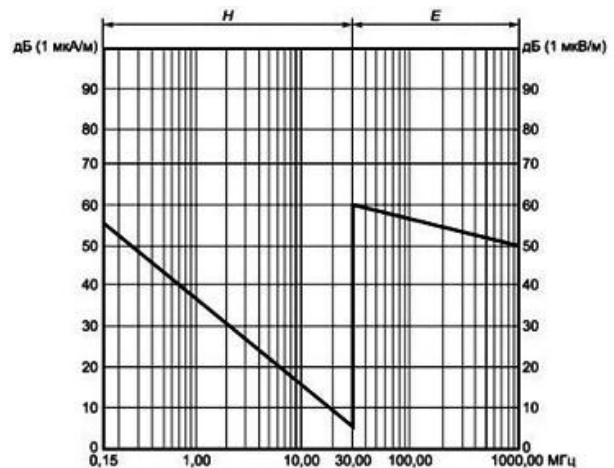


Рис. 1. Предельно допустимые квазипиковые значения напряженности поля помех, создаваемых подвижным составом на стоянке

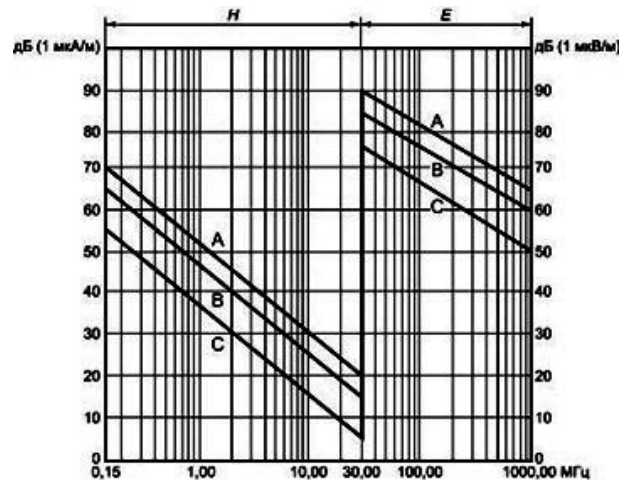


Рис. 2. Предельно допустимые пиковые значения напряженности поля помех, создаваемых ПС в режиме движения при питании переменным током 25 кВ (A); постоянным током 3 кВ (B); для автономной тяги (C)

Формулы для предельной напряженности поля ЭМП (в дБ), создаваемых ПС на стоянке, имеют следующий вид:

- для частот от 0,15 МГц до 30 МГц

$$H = 55 - 21.73 \lg \left(\frac{f}{0.15} \right);$$

- для частот от 30 МГц до 1 ГГц

$$E = 60 - 6.57 \lg \left(\frac{f}{30} \right),$$

где f – частота измерений, МГц.

Формулы для допустимых значений напряженности поля помех, создаваемых подвижным составом в движении, приведены в табл. 1. Метки в первой колонке таблицы соответствуют роду тягового тока электроснабжения ЭПС или автономной тяге, аналогично меткам на рис. 2.

Допустимые напряжения помех в каналах радиосвязи и бортовой сети ПС

Эти требования приведены в соответствии с ГОСТ Р 55176.3.1-2012. Допустимые значения напряжения электромагнитных помех в каналах радиосвязи на частотах 2,13 МГц и 153,00 МГц представлены в табл. 2.

Квазипиковые значения напряжения помех в бортовой сети подвижного состава, питающей радиостанции, не должны превышать следующие значения:

- 75 дБ (1 мкВ) – на частоте 2,13 МГц;
- 60 дБ (1 мкВ) – на частоте 153,00 МГц.

Таблица 1

**Формулы для напряженности поля помех, создаваемых
подвижного состава в движении**

Метка	Значения напряженности для частот	
	(0.15...30) МГц	(30...1000) МГц
А	$H_1 = 70 - 21.73 \lg \left(\frac{f}{0.15} \right)$	$E_1 = 90 - 16.42 \lg \left(\frac{f}{30} \right)$
В	$H_2 = 65 - 21.73 \lg \left(\frac{f}{0.15} \right)$	$E_1 = 85 - 16.42 \lg \left(\frac{f}{30} \right)$
С	$H_3 = 55 - 21.73 \lg \left(\frac{f}{0.15} \right)$	$E_1 = 75 - 16.42 \lg \left(\frac{f}{30} \right)$

Таблица 2

Напряжение помех в каналах радиосвязи

Вид подвижного объекта	Напряжение помех, дБ (1 мкВ)			
	2,13 МГц	153,00 МГц	2,13 МГц	153,00 МГц
	на стоянке		в движении	
ПС постоянного тока	45	18	58	30
ПС переменного тока	46	26	60	46
ПС с автономной тягой; вагоны	30	14	40	26

Нормы мешающих влияний на устройства железнодорожной электросвязи

Мешающее влияние на устройства железнодорожной электросвязи оценивают по величине напряжения, наведенного в контрольной цепи кабельной линии связи. Мешающее напряжение (псифометрическое значение), создаваемое в кабельных проводных линиях связи при движении электропоездов и электровозов, не должно превышать 1,0 мВ для электропоездов и 1,2 мВ для электровозов.

Определение мешающего влияния ЭПС на кабельные линии связи выполняют расчетным методом. Рассчитывают величину напряжения $U_{ш}$, индуцированную контуром тягового электроснабжения ЭПС в цепи контрольного участка кабеля связи. В качестве расчетного принимают контрольный участок кабеля типа МКПАБ 7×4×1,05+5×2×0,7+1×0,7 при длине сближения линии связи с тяговой сетью $l_с = 25$ км и ширине сближения между проводом связи и влияющей линией $a = 25$ м.

На расчетном участке принимается консольное электроснабжение двухпутного участка на плече $l_T = 25$ км. Удельная проводимость земли σ принимается равной 0,025 См/м.

Псифометрическое значение, определяют по формуле

$$U_{ш} = \sqrt{\sum_{50}^{3450} U_{шf}^2} \text{ (мВ)},$$

где $U_{шf}$ – уровень гармонической составляющей мешающего напряжения с частотой f в диапазоне 50...3450 Гц.

Составляющую мешающего напряжения определяют по формуле

$$U_{шf} = 0.5 \omega_f M_f I_f p_f \eta_f S_f 10^3 \text{ (мВ)},$$

где $\omega_f = 2\pi f$ – угловая частота; M_f – взаимная индуктивность между двумя одно-

проводными цепями для составляющей тока электропоезда на частоте f , значение которой определяют по формуле

$$M_f = 10^{-4} \ln \left(1 + 6 \frac{10^5}{a^2 \sigma_f} \right) \text{ (Гн/км)},$$

где I_f – уровень составляющей тока электропоезда на частоте f , p_f – коэффициент акустического воздействия для составляющей тока электропоезда на частоте f ; η_f – коэффициент чувствительности двухпроводной цепи к помехе для составляющей тока электропоезда на частоте f , принятый для цепи магистрального непупинизированного НЧ кабеля; S_f – результирующий коэффициент экранирующего действия для составляющей тока электропоезда на частоте f , который определяют по формуле

$$S_f = S_{обf} S_p S_T,$$

где $S_{обf}$ – коэффициент защитного действия оболочки кабеля на частоте f ; $S_p = 0,34$ – коэффициент экранирующего действия рельсов для двухпутного участка при ширине сближения 25 м; $S_T = 0,58$ – коэффициент экранирующего действия заземленных тросов (медный трос сечением 120 мм²) при удельном сопротивлении земли 40 Ом·м.

Нормы мешающих влияний ПС на устройства СЦБ

Мешающее влияние ЭПС и пассажирских вагонов с высоковольтным преобразователем на рельсовые цепи СЦБ и устройства автоматической локомотивной сигнализации оценивают по величине гармонических составляющих тока ЭПС и вагона с высоковольтным преобразователем. Допустимые значения гармонических составляющих тока ЭПС приведены в табл. 3, а для вагона с высоковольтным преобразовате-

лем – в табл. 4. Максимально допустимое действующее значение гармоник тока ЭПС (табл. 3) рассчитано сразу для всех гармоник одновременно, присутствующих в заданной полосе с длительностью более 0,3 с.

Измерения величины гармоник тягового тока ЭПС проводят во всех эксплуатационных режимах работы электрооборудования подвижного состава, предусмотренных технической документацией, а высоковольтного преобразователя пассажирского вагона – на стоянке, также во всех эксплуатационных режимах, предусмотренных технической документацией.

Результаты

Для апробации методики и программ обработки результатов проведены измерения обратного тягового тока для электропоезда с АТП на участках с электротягой постоянного и переменного тока. Некоторые результаты приведены ниже. На рис. 3 приведена временная зависимость и спектральный состав обратного тягового тока электропоезда с асинхронным тяговым приводом в режиме тяги при наборе скорости до ~140 км/ч на участке с подъемом ~5 %.

Как видно из рисунка в спектре обратного тягового тока присутствуют помехи с частотами, близкими к частотам работы рельсовых цепей 25, 480 и 580 Гц, причем уровень помех в полосе частот ~25 Гц близок к опасному значению, а в полосе частот ~480 Гц уровень помехи кратковременно превышал допустимое значение.

На рис. 4 приведен фрагмент временной зависимости и спектральный состав обратного тягового тока электропоезда с асинхронным тяговым приводом в режиме экстренного торможения без рекуперации от ~140 км/ч на ровном участке.

Несмотря на небольшие значения обратного тягового тока (~20 А) в спектре наблюдалась помеха с частотой ~480 Гц и уровнем, превышающем предельно допустимое значение.

Таблица 3

Допустимые действующие значения тока гармоник, создаваемых ЭПС

Система ЭНС	Полоса частот, Гц	Номинальная частота, Гц	Допустимый ток, А
3 кВ, пост. ток	19-21	25	11,6
	21-29		1,0
	29-31		11,6
	40-46	50	5,0
	46-54		1,3
	54-60		5,0
25 кВ, 50 Гц	15-21	25	4,1
	21-29		1,0
	29-35		4,1
	65-85	75	4,1
3 кВ пост. ток и 25 кВ 50 Гц	167-184	175	0,4
	408-432	420	0,35
	468-492		0,35
	568-592	580	0,35
	708-732	720	0,35
	768-792	780	0,35

Таблица 4

Допустимые значения тока гармоник, создаваемых электрооборудованием вагона

Частота сигнального тока, Гц	Полоса частот, Гц	Допустимый уровень помех, мА
25	19-21	240
	21-29	60
	29-31	240
50	42-46	100
	46-54	24
	54-58	100
175	167-184	40
420	408-432	50
480	468-492	50
580	568-592	50
720	708-732	50
780	768-792	50

После обработки результатов измерения помех при движении электропоезда во всех режимах, предусмотренных нормативными документами, максимальное значение тока помех на частотах работы рельсовых цепей для электротяги переменного и постоянного тока сведены в таблицы (табл. 5, 6).

Выводы

В работе проведен анализ норм и методов измерений электромагнитных помех, создаваемых электрооборудованием новых типов подвижного состава при электротяге переменного, постоянного тока, автономной тяге и вагонов с высоковольтными преобразователями в соответствии с норма-

тивными документами, принятыми в Украине и Евросоюзе.

Большое разнообразие систем электропитания, сигнализации и связи в европейских странах вызывает необходимость проведения испытаний подвижного состава в каждой стране отдельно, с учетом особенностей используемых в ней технических систем сигнализации и связи, что значительно увеличивает стоимость применения новых типов подвижного состава. Особенно это относится к испытанию воздействия электромагнитных помех на рельсовые путевые датчики, автоматическую локомотивную сигнализацию. Разработанный в Евросоюзе новый стандарт призван унифицировать методику испытаний подвижного состава на ЭМС с рельсовыми цепями и АЛС.

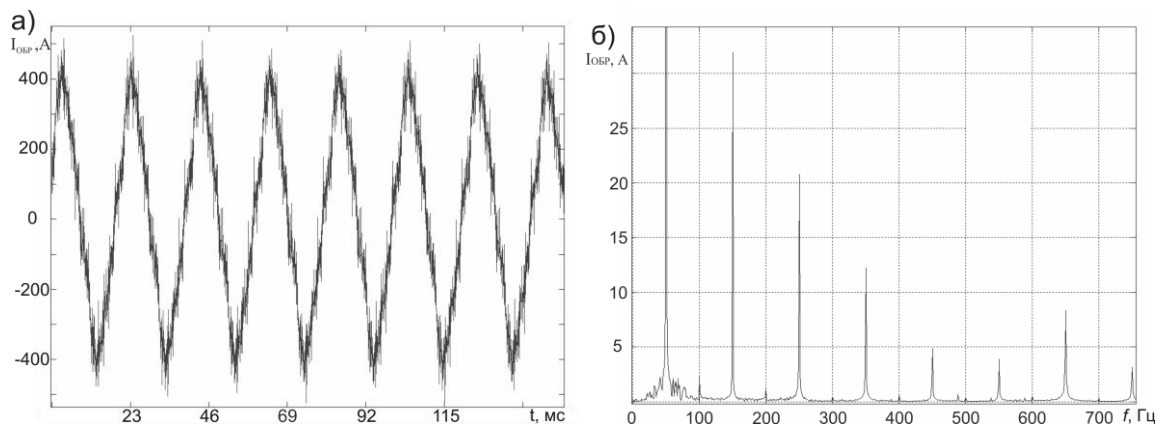


Рис. 3. Временная зависимость (а) и спектральный состав (б) обратного тягового тока электропоезда режиме тяги при наборе скорости до ~140 км/ч

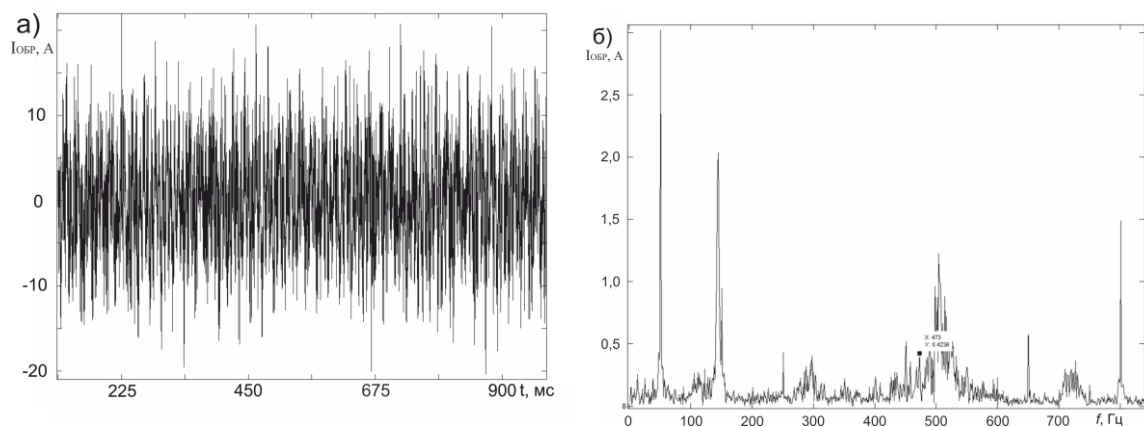


Рис. 4. Временная зависимость (а) и спектральный состав (б) обратного тягового тока электропоезда в режиме экстренного торможения

Решение проблемы применимости результатов испытаний ЭПС к национальным системам сигнализации и связи возможно путем применения расширенной методики измерений тока помех в тяговой сети, генерируемых электрооборудованием ЭПС, с последующей компьютерной обработкой результатов измерений и применением компьютерного и физического моделирования. Предложенная методика апробирована при испытаниях новых типов ЭПС с асинхронным тяговым двигателем.

Таблица 5

**Ток помехи в рельсовой линии при
электротяге переменного тока**

Частота, Гц	Диапазон частот, Гц	Макси- мально допусти- мый ток помехи, А	Макси- мальный измерен- ный ток помехи, А
25	21-29	1	1,41
420	408-432	0,35	0,37
480	468-492	0,35	0,40
580	568-592	0,35	0,55
720	708-732	0,35	0,12
780	768-792	0,35	0,52
4545	4508-4583	0,2	0,50
5000	4963-5038	0,2	0,15
5555	5518-5593	0,2	0,13

Таблица 6

**Ток помехи в рельсовой линии при
электротяге постоянного тока**

Частота, Гц	Диапазон частот, Гц	Макси- мально допусти- мый ток помехи, А	Макси- мальный измерен- ный ток помехи, А
25	21-29	1	0,39
50	46-54	1,3	0,10
420	408-432	0,35	0,42
480	468-492	0,35	0,48
580	568-592	0,35	0,36
720	708-732	0,35	0,06
780	768-792	0,35	0,38
4545	4508-4583	0,2	0,12
5000	4963-5038	0,2	0,30
5555	5518-5593	0,2	0,13

Библиографический список

1. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес трансп. – 2016. – № 5 (59). – С. 7–15.
2. Bellan, D. Monitoring of Electromagnetic Environment Along High-Speed Railway Lines Based on Compressive Sensing / D. Bellan, S. A. Pignari // Progress In Electromagnetics Research C. – 2015. – Vol. 58. – P. 183–191.
3. Гаврилюк, В. І., Щека, В.І. Розробка математичної моделі для дослідження електромагнітних завад від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 31. – С. 221–225.
4. Завгородний, А. В. Моделирование электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 6. – С. 11–15.
5. Гаврилюк, В. І., Завгородній О. В. Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола / В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2010. – № 4. – С. 73–76.
6. Gavrilyuk, V. The modelling of electromagnetic influence of traction electrosupply system on railway circuits / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij // Transport Systems Telematics. Politechnika Slanska. Zeszyty Naukowe. Gliwice (Poland). 2004. – NR – 1657. – P. 18–19.
7. Pignari, S. A. Measurement of rolling-stock radiated emissions according to standard EN 50121 / S. A. Pignari, D. Bellan, G. Spadacini // 17th Intern. Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Singapore. – 2006. – P. 250–255.
8. Fedeli, E. Fast and accurate measurement of radiated emissions of moving trains according to IEC 62236 / E. Fedeli, S. A. Pignari, G. Spadacini // Proc. 9th World Congress on Railway Research (WCRR 2011). – Lille, France. – 2011. – P. 1–8.

9. Holmstrom, F. R. Rail transit EMI-EMC Electromagnetic Compatibility / F. R. Holmstrom, D. Turner, E. Fernald // Magazine IEEE. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 79–82.
10. Place, C. Managing rolling stock EMC / C. Place, D. Hayes // Electromagnetic Compatibility in Railways. IET Seminar. – London. – 2009. – P. 1-8
11. Rhee, E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intrasytem / E. Rhee, K. Changjae // Intern. J. Of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126.
12. Test Analysis and Modeling of Power Frequency Magnetic-Field Environment in Car-bodies of Electrified Trains / F. Zhu, Liu Guanghui, Ye Jiaquan, Du Hui // J. of South-west Jiaotong University. –2015. – Vol. 50. – P. 400–404.

Ключові слова: електромагнітна сумісність; електрорухомий склад; системи сигналізації та зв'язку, рейкові кола.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; электроподвижной состав, системы сигнализации и связи, рельсовые цепи.

Keywords: electromagnetic compatibility; rolling stock; signalization and telecommunication systems; track circuits.

Рецензенти:

д. т. н., проф., А. М. Муха,
д. т. н., проф., А. Б. Бойник.

Поступила в редколлегию 11.10.2016.

Принята к печати 28.10.2016.