

УДК 681.518.5:004.052.32

**А. Г. Кабецкий,
А. Д. Манаков, докт. техн. наук**

*Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I*

НОРМЫ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ НА МЕТРОПОЛИТЕНЕ

В статье дается краткий обзор развития и применения систем автоматического управления поездами метрополитена. Проводится анализ современных систем автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости с передачей сигнала на основе двукратной фазоразностной модуляции. Внедрение в эксплуатацию на линиях Петербургского метрополитена электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом и усовершенствованных систем автоматики и телемеханики движения поездов инициирует работу по обеспечению их электромагнитной совместимости. Для систем автоматики и телемеханики движения поездов на метрополитене не были определены нормативы электромагнитных помех, возникающих в их рабочем диапазоне, при внедрении в эксплуатацию электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом. В статье обозначены основные источники кондуктивных электромагнитных помех и пути их проникновения в приемный тракт устройств автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости. Предложена методика определения норм опасного и мешающего влияния (нормы помехоустойчивости) для систем автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости систем блока автоматического регулирования скорости БАРС с фазоразностной модуляцией и модернизированной поездной автоматики ПА-М с фазоразностной модуляцией для линий Петербургского метрополитена. Дан способ перехода от норм помехоустойчивости систем автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости к нормам помехоэмиссии электроподвижного состава при различных коэффициентах асимметрии тягового тока. Рассмотрена методика измерения тягового тока в точках высокого потенциала на электроподвижном составе. Представлена методика оценки уровней кондуктивных электромагнитных помех от электроподвижного состава посредством вычисления действительного значения в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала тягового тока электроподвижного состава.

АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, асинхронный тяговый привод, кондуктивная электромагнитная помеха, норма помехи, мешающее влияние электромагнитных помех, опасное влияние электромагнитных помех, тяговый ток, цифровая обработка сигналов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521

Введение

Наиболее перспективным и экономичным видом транспорта современных городов является метрополитен. Непрерывный рост объема пассажирских перевозок сделал актуальным создание систем автоматического управления движением поездов метрополитена. Первая автономная система автоведения поезда метрополитена, созданная в Научно-исследовательском институте управляющих и вычислительных машин (НИИ УВМ), испытана в Московском метрополитене в 1961 году. Сразу после этого начались разработки централизованных систем автоматического управления движением поездов метрополитена. В 60-е годы были внедрены программно-моделирующая система автоматического управления поездами (ПМ САУДМ) Ленинградского метрополитена (разработчики – Ленинградский метрополитен и Гипротрансигнальсвязь), система автоведения САММ Московского метрополитена (разработчики – Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) и Московский метрополитен). В 70-е годы создали и начали применять комплексные системы автоматического управления движением поездов на Московском и Ленинградском метрополитенах, характеризующиеся наличием управляющего вычислительного комплекса на центральном посту управления и объединением систем автоведения с системами интервального регулирования движением поездов.

Системы автоматического управления поездами (САУ П) предназначены для автоматизации процесса управления ведением поезда (включая пуск и разгон, выбор режима ведения на перегонах, торможение у платформ) с целью повышения точности выполнения графика движения.

САУ П являются составной частью комплексной автоматизированной системы управления движением поездов (АСУ ДП) и взаимосвязаны с системами обеспечения безопасности движения и устройствами внутренней локомотивной (поездной) автоматики. К системам безопасности, непосредственно связанным с САУ П, относятся система автоматического управления торможением (САУТ), системы интервального регулирования: автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС), система автоматического регулирования скорости (АРС) и др. [1–3].

Система АЛС-АРС предназначена для непрерывного контроля и регулирования скорости поезда путем ограничения ее в пределах допустимой по условиям безопасности движения [4].

Система АЛС-АРС состоит из путевых устройств в виде шифратора и генератора сигналов АЛС-АРС, а также поездных устройств в виде приемных катушек и функциональных модулей: согласующих устройств, локомотивных приемников, сигнального управления, измерения скорости, приборов контроля эффективного торможения и др.

Сигналы АЛС-АРС от путевого генератора поступают в рельсовую цепь и, проходя по рельсовым нитям, под приемными катушками локомотива наводят

в них электродвижущую силу (ЭДС). Сигнал от приемных катушек и локомотива проходит стадию предварительной фильтрации, усиления и дешифрации, после чего на табло у машиниста отображается информация о допустимой и фактической скорости электроподвижного состава. При превышении допустимой скорости система автоматически отключает тягу и торможение электроподвижного состава.

В настоящее время при новом строительстве или модернизации линий Петербургского метрополитена внедряются более современные системы АЛС-АРС, где сигнал о допустимой скорости – это битовая последовательность, которая передается на локомотивные устройства посредством синусоидального сигнала с двукратной фазоразностной модуляцией на несущей частоте 3348,21 Гц. АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией позволяет существенно увеличить объем передаваемой информации.

Команда АЛС-АРС включает 1 байт. Формат байта кода команды имеет следующий вид. Бит 7 (старший) – номер пути, на рельсовой цепи которого выдается сигнал АЛС-АРС (0 – первый, 1 – второй). Бит 6 – тип рельсовой цепи, на которую выдается сигнал АЛС-АРС (0 – четная, 1 – нечетная). Биты 5...0 – код заданных скоростей кодируемой рельсовой цепи. Коды скоростей 1–52 соответствуют основному (установленному) направлению движения, т. е. поездным маршрутам. Коды скоростей 54–63 соответствуют неосновным направлениям движения и используются при маневровых передвижениях подвижного состава. Информация кодируется модифицированным кодом Бауэра [5].

Наряду с модернизацией устройств АЛС-АРС вводится в эксплуатацию новый электроподвижной состав с частотным управлением электродвигателем. Такой тип подвижного состава обладает более плавными тяговыми характеристиками при регулировании скорости движения. Скорость асинхронного тягового привода регулируется изменением частоты тока, генерируемого преобразователем частоты. Отсутствие в этом двигателе коллекторно-щеточного узла снижает эксплуатационные затраты на техническое обслуживание.

На линиях Петербургского метрополитена используются схемы электропитания тягового движения на постоянном токе с напряжением в тяговой сети 825 В. Основные источники электропитания тягового энергоснабжения – 6- или 12-пульсовые схемы выпрямления. Основная гармоника 6-пульсовой схемы выпрямления – 300 Гц. Последующие гармоники следуют через каждые 300 Гц (600, 900, 1200, ..., 3000, 3300, 3600 Гц). Основная гармоника 12-пульсовой схемы выпрямления – 600 Гц. Последующие гармоники следуют через каждые 600 Гц (1200, 1800, ..., 3000, 3600 Гц).

Применение электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом и статических полупроводниковых преобразователей для организации источника электропитания собственных нужд подвижного состава, электропитания компрессоров, заряда аккумуляторных батарей расширило спектр гармонических составляющих в тяговой сети Петербургского метрополитена. Было ини-

цировано определение норм помехоустойчивости для систем АЛС-АРС, а также предъявление требований к помехоэмиссии от электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

Вопросами электромагнитной совместимости (ЭМС) систем железнодорожной автоматики и телемеханики и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на магистральном транспорте посвящены работы [6–9], ставшие концептуальными при решении проблем ЭМС электроподвижного состава с устройствами АСУ ДП на метрополитене.

Проблема ЭМС подвижного состава и систем АЛС-АРС должна решаться путем предъявления жестких требований к уровню помех, допустимому при работе асинхронного тягового привода. Требования, которые включены в ГОСТ [10, 11], не охватывают системы тягового энергоснабжения метрополитенов и частотный диапазон работы систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией.

Целью работы является определение ЭМС систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом для линий Петербургского метрополитена. Для этого требуется разработать:

- методику определения норм помехоустойчивости систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией;
- метод перехода от норм помехоустойчивости к нормам помехоэмиссии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом;
- методику оценки уровней помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

1. Определение норм опасного и мешающего влияния помех на систему АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией

Электромагнитная помеха – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить качество функционирования технического средства.

Кондуктивная электромагнитная помеха – электромагнитная помеха, энергия которой передается по одному или нескольким проводникам.

Норма помехи – максимальный допустимый уровень электромагнитной помехи, измеренный в регламентированных условиях [12].

Опасное влияние кондуктивных помех на работу АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией: повышение допустимой скорости движения подвижного состава по отношению к скорости, разрешенной устройствами АЛС-АРС для данной рельсовой цепи. При нахождении подвижного состава на рельсовой цепи и при действии кондуктивных помех в результате приема и дешифрации сигналов АЛС-АРС, поступающих с приемных катушек, вырабатывается сигнал допустимой скорости движения подвижного состава, разрешающий движение с большей скоростью, чем скорость, разрешенная сигналом, который вырабатывают путевые устройства АЛС-АРС для данной рельсовой цепи [14].

Мешающее влияние кондуктивных помех на работу АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией: понижение допустимой скорости движения подвижного состава по отношению к скорости, разрешенной устройствами АЛС-АРС для данной рельсовой цепи; кратковременное или устойчивое пропадание сигнала допустимой скорости движения подвижного состава на индикаторах допустимой скорости движения. При нахождении подвижного состава на рельсовой цепи и при действии кондуктивных помех в результате приема и дешифрации сигналов АЛС-АРС, поступающих с приемных катушек, вырабатывается сигнал допустимой скорости движения подвижного состава, разрешающий движение с меньшей скоростью, чем скорость, разрешенная сигналом, который вырабатывают устройства АЛС-АРС для данной рельсовой цепи, или происходит кратковременное или устойчивое пропадание сигнала допустимой скорости движения подвижного состава [13, 14].

Известно, что общим каналом для систем АЛС-АРС и электроподвижного состава является обратная тяговая сеть. Канализация обратного тягового тока, а также движение сигнального тока устройств рельсовых цепей и АЛС-АРС осуществляется по рельсовым линиям.

Электромагнитная совместимость приемного тракта АЛС-АРС с обратной тяговой сетью обеспечивается встречным включением приемных катушек. Обратный тяговый ток протекает по двум рельсовым нитям в одном направлении, поэтому наведенные в приемных катушках ЭДС взаимно вычитаются. Следовательно, мешающее или опасное влияние тягового тока и его гармоник и интергармоник от электроподвижного состава на устройства АЛС-АРС проявляется лишь тогда, когда токи в рельсах оказываются неравными между собой или в приемных катушках равные токи наводят неравные ЭДС [15–20]. Это происходит в результате наличия продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей и полуобмоток дроссель-трансформатора рельсовой цепи; вследствие неодинаковых электрических свойств приемных катушек; из-за различия входных сопротивлений обратному тяговому току, стекающему через колесные пары в рельсы. В данной работе мы ограничимся исследованиями обеспечения ЭМС только при асимметрии тягового тока из-за разницы сопротивлений рельсовых нитей и полуобмоток дроссель-трансформатора рельсовой цепи.

Нормы помехоустойчивости устройств АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией разрабатываются для кондуктивных электромагнитных помех, представляющих собой гармонические сигналы синусоидальной формы, эквивалентные сигналам в рабочей полосе частот устройств АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией.

Методика определения норм опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена [21] была доработана и на ее основе собран испытательный стенд.

Испытательный стенд показан на рисунке 1, где ПК1 и ПК2 – приемные катушки АЛС-АРС, расположенные на расстоянии 180 ± 5 мм над рельсами;

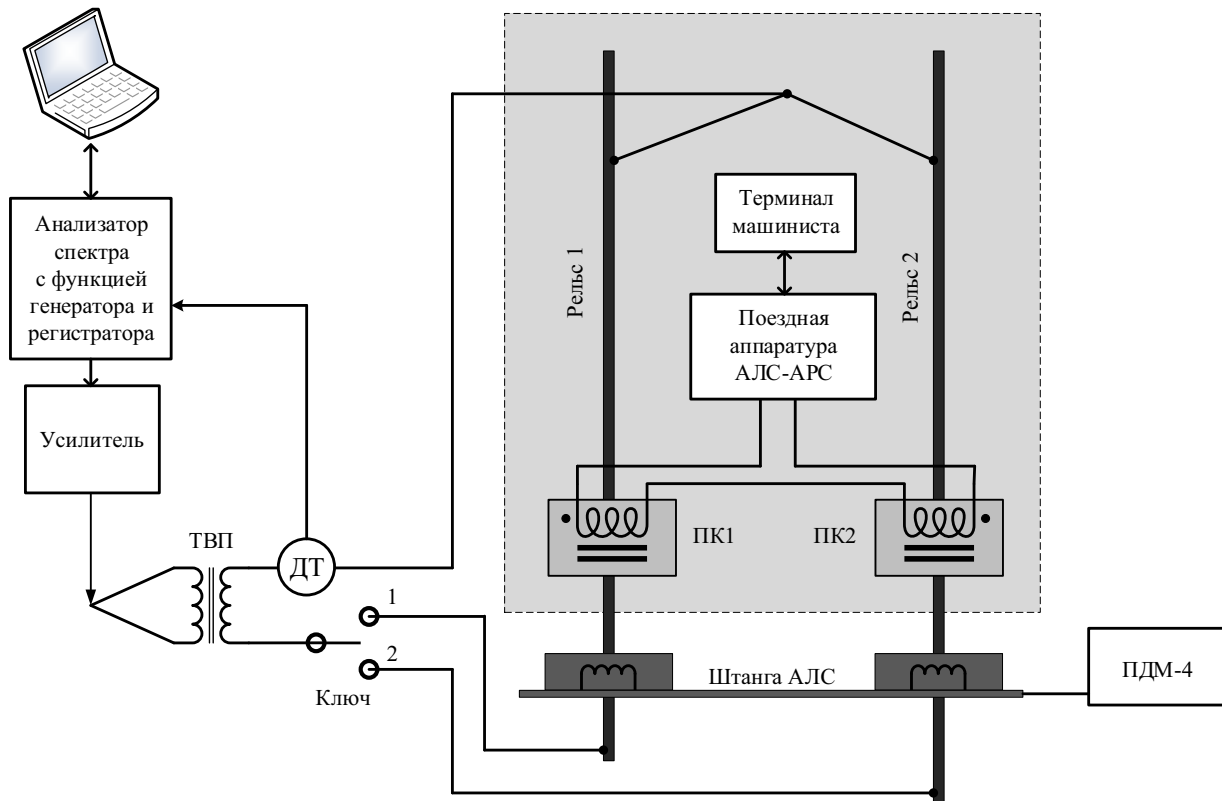


Рис. 1. Схема испытательного стенда системы АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией

ПДМ-4 – прибор диагностики поездной автоматики метро для оперативной комплексной проверки поездных устройств АРС в условиях депо [22] в комплекте со штангой АЛС – для имитации сигналов АЛС с фазоразностной модуляцией под приемными катушками (штанга АЛС изолирована от рельсов); ДТ – датчик тока, регистрирующий уровень тока кондуктивной электромагнитной помехи на основе пояса Роговского; ключ, позволяющий осуществлять ввод электромагнитной помехи под каждой из приемных катушек по отдельности; ТВП – трансформатор ввода кондуктивной электромагнитной помехи.

Методика определения норм помехоустойчивости следующая. На ПДМ-4 устанавливается сигнал (команда) с фазоразностной модуляцией с минимально допустимым уровнем тока, соответствующий допустимой скорости движения подвижного состава и через штангу АЛС, индуктивно поступает на приемные катушки и далее в модули дешифрации и обработки поездной аппаратуры АЛС-АРС. Данная команда скорости контролируется на терминале машиниста. От усилителя, через ТВП и одно из положений ключа, в рельс 1 или рельс 2 посредством анализатора спектра с функцией генератора и регистратора подается кондуктивная электромагнитная помеха на определенной частоте. Через ДТ контролируется ее уровень. Ток помехи наводит ЭДС на ПК1 или ПК2. Плавно повышая уровень помехи, добиваемся установления

режимов «мешающее влияние» или «опасное влияние» и фиксируем частоту и уровень помехи (действующее значение). Процедуру проводим для каждой из частот (с шагом 10 Гц), в рабочей полосе сигнала АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, а также для каждой из канонических гармоник тяговой сети (300, 600, 900, ..., 3300, 3600 Гц). Нормой засчитывается минимальное зафиксированное значение электромагнитной помехи. Минимальное время длительности помехи выбирается исходя из особенностей реакции системы АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, которое может составлять 100 мс или 1 с.

В таблице 1 на основании предложенной методики определены нормы мешающего и опасного влияний, который легли в серию стандартов предприятия ГУП «Петербургский метрополитен» для систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией БАРС [13] и ПА-М [14].

Таблица 1. Нормы уровней тока мешающего и опасного влияния электромагнитных помех на работу устройств БАРС с фазоразностной модуляцией и ПА-М с фазоразностной модуляцией

Вид влияния	Частота помехи или частотный диапазон, Гц	Норма тока помехи (не более), (действующее значение), А	
		БАРС ФРМ	ПА-М ФРМ
Мешающее влияние	600±1	*	4,2
	900±1	*	4,0
	1200±1	*	4,7
	1500±1	*	5,4
	2400±1	1,88	*
	2700±1	0,64	*
	3000±1	0,28	*
	3100–3600±1	0,08	0,07
Опасное влияние	3268±1	0,2	*
	3178±1	*	0,9
	3388±1	*	0,6
	3468±1	*	0,7
	3518±1	*	1,2

Примечание:

* – влияние не обнаружено.

Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС БАРС ФРМ составляет 1 с.

Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС ПА-М ФРМ составляет 0,1 с.

2. Переход от норм помехоустойчивости систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией к уровням помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом

Внедрение стандартов предприятия предъявляет требования к помехоэмиссии (в части кондуктивного влияния) электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом. При анализе ЭМС электроподвижного состава в работах [23, 24] показан принцип перехода от норм помехоустойчивости к уровням помехоэмиссии от ЭПС при заданных коэффициентах асимметрии.

Согласно [25], коэффициент асимметрии тягового тока (K_{ac}) в двухниточных рельсовых цепях рассчитывается по формуле:

$$K_{ac} = \frac{|I_{p1} - I_{p2}|}{I_{p1} + I_{p2}} 100 \%, \quad (1)$$

где $I_{p1} - I_{p2}$ – разностный тяговый ток электроподвижного состава между первым и вторым рельсом (ток асимметрии) в двухниточных рельсовых цепях, А; $I_{p1} + I_{p2}$ – суммарный тяговый ток ЭПС, А.

Разностный тяговый ток – ток кондуктивной электромагнитной помехи на определенной частоте, представленной в таблице 1.

Максимально допустимый уровень асимметрии тягового тока в РЦ принимается равным 6%. Аналогичное значение коэффициента асимметрии тягового тока для линий Петербургского метрополитена также принимается равным $K_{ac} = 6\%$.

Используя формулу (1), рассчитаем уровни помехоэмиссии для суммарного тягового тока подвижного состава. Получим:

$$I_{ном} = \frac{|I_{p1} - I_{p2}|}{K_{ac}} 100, \quad (2)$$

где $I_{ном}$ – уровень кондуктивной электромагнитной помехи на исследуемой частоте от электроподвижного состава, А.

Результаты расчетов помех от гармоник или интергармоник тягового тока при заданном K_{ac} тягового тока приведены в таблице 2.

3. Методика оценки кондуктивных электромагнитных помех от тягового тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом при определении ЭМС с устройствами АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией

Объектом исследования является тяговый ток электроподвижного состава. Измерение тягового тока можно производить в точках высокого потенциа-

Таблица 2. Нормы уровней мешающего и опасного влияния помех тягового тока от электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств БАРС с фазоразностной модуляцией и ПА-М с фазоразностной модуляцией

Вид влияния	Частота и исследуемый частотный диапазон, Гц	Норма помех тягового тока (не более), (действующее значение) при $K_{ac} = 6\%$, А	
		БАРС ФРМ	ПА-М ФРМ
Мешающее влияние	600±10	*	70
	900±10	*	66,7
	1200±10	*	78,3
	1500±10	*	90
	2400±10	31,3	*
	2700±10	10,7	*
	3000 ±10	4,7	*
	3100–3600	1,4	1,2
Опасное влияние	3268±10	3,4	*
	3178±10	*	15
	3388±10	*	10
	3468±10	*	1,2
	3518±10	*	20

Примечание:
 * – влияние не обнаружено.
 Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС БАРС ФРМ составляет 1 с.
 Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС ПА-М ФРМ составляет 0,1 с.

ла каждого моторного вагона электроподвижного состава, на обратной шине тяговой подстанции или междроссельной перемычке средней точке дроссель-трансформатора. Измерения на обратной шине тяговой подстанции или средней точке дроссель-трансформатора предъявляют высокие требования к испытательному полигону. Одно из них касается обеспечения консольного электропитания только от одной тяговой подстанции. Зачастую мощности одной тяговой подстанции не хватает для обеспечения энергией подвижного состава, возможны срабатывания защиты. Измерения на междроссельной перемычке средней точке дроссель-трансформатора, помимо обеспечения консольного электропитания, требует внимательного контроля протекания обратного тягового тока именно через дроссель-трансформатор, на котором производится измерение для обеспечения протекания полного (суммарного) тягового тока. С учетом вышеописанного предлагается методика измерения в точках высо-

кого потенциала на электроподвижном составе. Типовая методика измерения тягового тока электроподвижного состава приведена в [26].

Структурная схема проведения измерений тягового тока показана на рисунке 2, где Д1 – датчик тока, подключаемый в точке прохождения полного (суммарного) тока вагона электроподвижного состава; I_{p1} , I_{p2} – обратный тяговый ток, проходящий в рельсе 1 и 2 соответственно; ДТ – дроссель-трансформатор.

Измеренные величины тягового тока для каждого моторного вагона сводятся в систему измерений и регистрации сигналов (временных характеристик тягового тока), представляющую собой анализатор спектра с функцией регистратора. Временные характеристики тягового тока записываются для всех режимов управления при эксплуатации электроподвижного состава. Режимы выбираются из предполагаемого максимального воздействия помех гармоник тягового тока на устройства АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией:

- режим разгона подвижного состава до максимальной эксплуатационной скорости с максимальным потреблением тока;
- режим отключения тяги электродвигателя во время движения подвижного состава;
- режим электродинамического торможения до полной остановки подвижного состава, и др.

Эти основные режимы комбинируются с учетом продольного профиля пути.

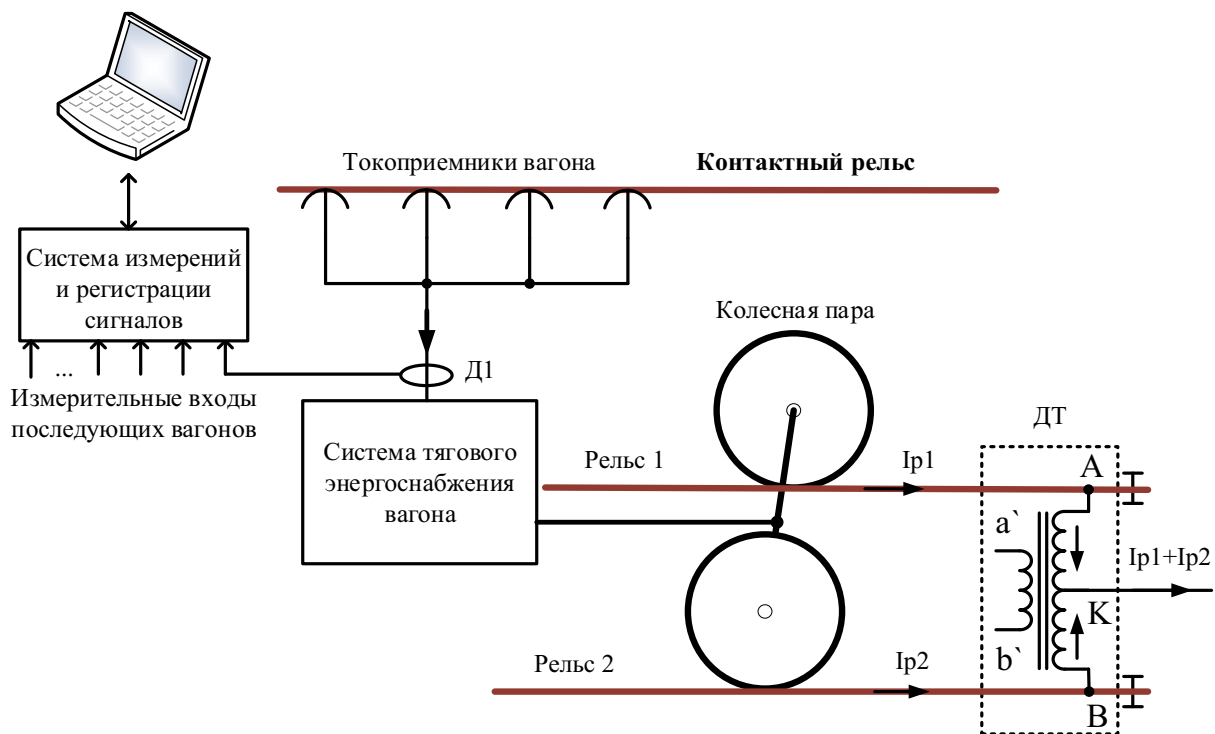


Рис. 2. Структурная схема измерений тягового тока

Методика оценки уровня электромагнитных помех тягового тока электроподвижного состава на основе сравнения максимальной величины среднеквадратичного значения (действующее значение) в спектрограмме тягового тока для несущей частоты со значениями нормы приводится в работе [10].

В [6] для обработки зарегистрированных в ходе опытных поездок данных переменной составляющей тягового тока электроподвижного состава предлагается использование гармонического анализа данных методом скользящего окна с перекрытием 50–70 % и применением «окна Ханна».

Методика обработки записей переменной составляющей тягового тока приведена в Европейском стандарте [27], посвященном нормам электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей. Стандарт призван решить задачу передвижения высокоскоростного и обычного железнодорожного транспорта в пределах Евросоюза. У каждой страны-участницы имеются национальные особенности в системах электроснабжения железных дорог, частотах питающего тока, различных конфигурациях и типах рельсовых цепей. Поэтому нормы, предложенные стандартом, не являются общими. Как раз наоборот: для каждого типа рельсовых цепей, для каждого вида тяги (постоянного и переменного (16,7–50 Гц) тока) вводятся определенные уровни допустимых значений гармонических составляющих и методы их оценки. Наиболее часто в стандарте встречается метод вычисления среднеквадратичного значения в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала с указанными параметрами используемого фильтра (тип фильтра, порядок и др.). Таким образом, стандарт регламентирует допустимые нормы и четко указывает требуемый метод обработки записей тягового тока [6].

Для оценки влияния гармоник тягового тока производится цифровая обработка сигнала суммарного тягового тока электроподвижного состава (алгебраическая сумма токов с каждого моторного вагона) на основе методики, предложенной в работе [27]. Программный продукт для цифровой фильтрации был разработан на основе математического аппарата и реализован на языках высокого уровня MATLAB и Python. Цифровым фильтром с определенной амплитудно-частотной характеристикой [28] из сигнала суммарного тока выделяется (отфильтровывается) сигнал в полосе частот работы АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией или отдельно для каждой из канонических гармоник тягового тока. Далее на временном интервале, нормированном для конкретного типа устройств АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией (0,1 или 1 с.), с шагом не менее 10 % (скользящее окно с перекрытием 90 %), вычисляется действующее значение отфильтрованного сигнала. В таблицу заносится максимальное зафиксированное значение для каждого из режимов управления подвижного состава при проведении испытаний. Результатом соответствия (обеспечение ЭМС) будет отсутствие превышения вычисленного действующего значения электромагнитной помехи и величины нормы помехи для конкретной частоты, представленной в таблице 2.

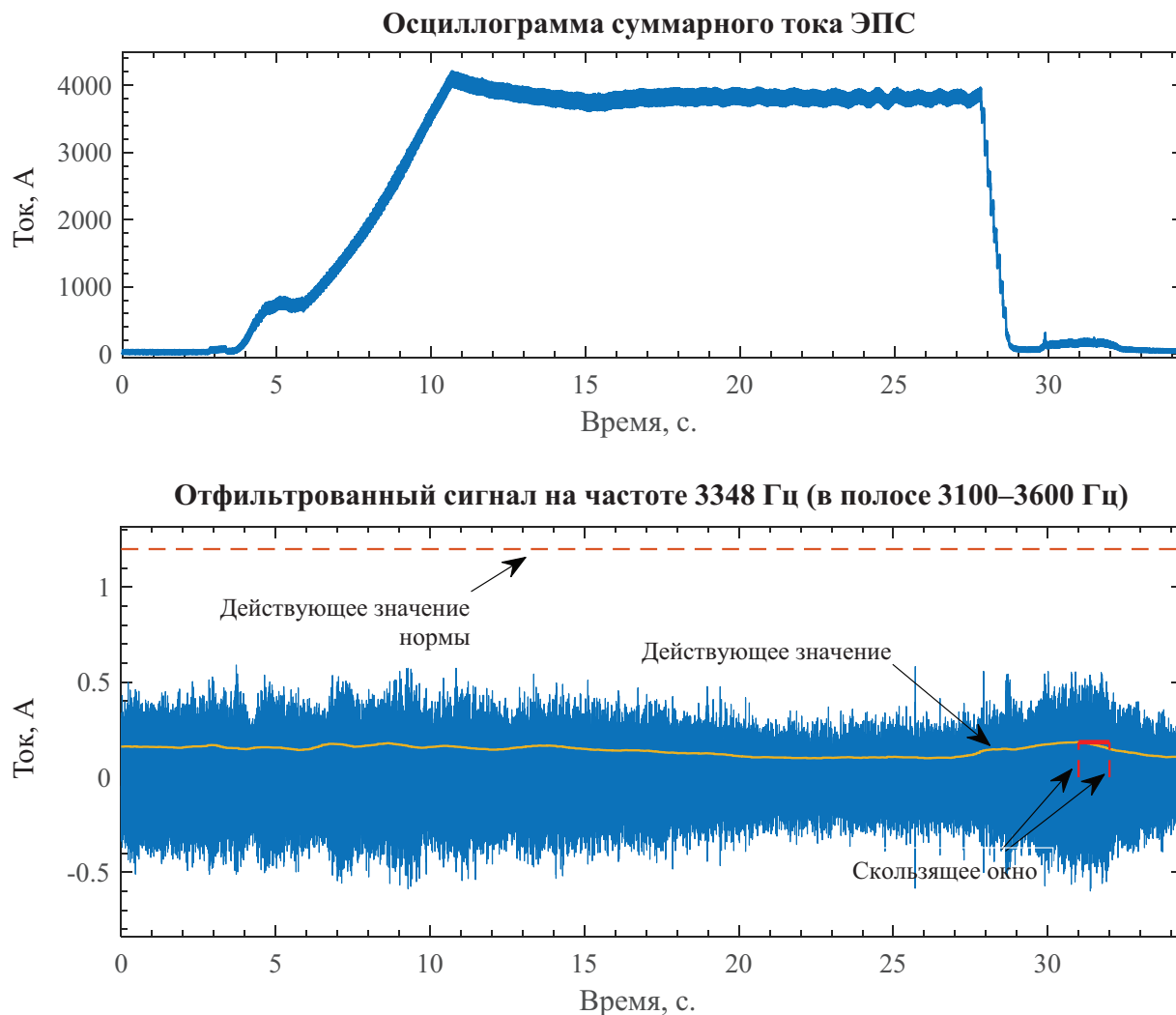


Рис. 3. Осциллограммы при оценке уровней электромагнитных помех от электроподвижного состава, полученные методом цифровой фильтрации

В качестве примера на рисунке 3 представлены осциллограммы суммарного тягового тока, полученные от электроподвижного состава и отфильтрованные в рабочей полосе частот 3100–3600 Гц.

На рисунке 3 показан процесс вычисления действующего значения отфильтрованного сигнала суммарного тока электроподвижного состава при помощи цифрового фильтра с АЧХ Чебышева второго рода [28]. Действующее значение отфильтрованного сигнала вычисляется при помощи скользящего окна длительностью 1 секунда с перекрытием 90%. Максимальное зафиксированное действующее значение (на рис. 3 выделено красным) сравнивается с уровнем нормы.

Предварительная оценка временных характеристик отфильтрованного сигнала позволяет выявлять одиночные неповторяющиеся случаи превышения норм тока подвижного состава, вызванные переходными процессами, ставшие следствием бросков тока, срабатывания автоматов защиты, и пр.

Заключение

Анализ отечественных и зарубежных стандартов по электромагнитной совместимости выявил отсутствие требований помехоэмиссии электроподвижного состава для метрополитенов с системой тягового энергоснабжения постоянного тока 825 В. Предлагаемые в стандартах методики оценки тягового тока не содержали действительных временных характеристик влияния электромагнитных помех тягового тока для частотных диапазонов работы современных систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией.

Исследования устойчивости систем АЛС-АРС БАРС с фазоразностной модуляцией и ПА-М с фазоразностной модуляцией к кондуктивным электромагнитным помехам в рабочем диапазоне частот показали наличие опасных влияний. Предъявление жестких требований к уровням помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в частотном диапазоне систем АЛС-АРС – ограничение до уровней (не более) мешающего влияния должны исключить возникновение опасных влияний. В качестве дополнительной меры защиты от опасных влияний предлагается пересмотреть нормы уровней помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом с учетом более высоких коэффициентов асимметрии тягового тока (например, произвести перерасчет норм уровней при $K_{ac} = 12\%$).

Методом определения норм опасного и мешающего влияния помех на систему АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, предложенным в статье, предлагается исследовать все системы АЛС-АРС Петербургского метрополитена.

Необходимо оценить помехоустойчивость при различных коэффициентах асимметрии электрических характеристик приемных катушек для систем АЛС-АРС, эксплуатируемых на линиях метрополитена.

Методика измерения тягового тока в точках высокого потенциала электроподвижного состава позволяет гарантированно провести испытания и измерения при максимальных эксплуатационных характеристиках ведения электроподвижного состава с максимальным потреблением тока и максимальной скорости ведения.

В дальнейшем предлагается провести сравнительный анализ методов оценки уровней электромагнитных помех тягового тока: оценка уровней спектральных составляющих при дискретном преобразовании Фурье с использованием различных оконных функций сглаживания; вычисление действующего значения в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала с различными амплитудно-частотными характеристиками цифровых фильтров.

Библиографический список

1. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. И. Астрахан и др.; под ред. Л. А. Баранова. – М.: Транспорт, 1984. – 311 с.

2. Баранов Л. А. Автоматическое управление движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 3 (76). – С. 156–165.
3. Никульчиков П. М. История, состояние и перспективы развития систем автоматического управления поездами метрополитена / П. М. Никульчиков // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 456–473.
4. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. – Москва: Транспорт, 1986. – 351 с.
5. Блок локомотивных приемников ЧК-ФМ. Руководство по эксплуатации. ИДФС. 065.00.000 РЭ. – Минск: Инженерный центр ООО «ФЛАРС», 2009. – 23 с.
6. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–27.
7. Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методы их проверки / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2. – С. 65–71.
8. Бестемьянов П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник РГУПС. – 2012. – № 1. – С. 87–92.
9. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Машенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 1. – С. 86–91.
10. ГОСТ 33436.3-1-2015 (МЭК 62236-3-1:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3–1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. – Введ. 2017. 06.01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 17 с.
11. Нормы безопасности на железнодорожном транспорте: НБ ЖТ ЦТ 04–98. Электровозы. Требования по сертификации. Введ. 07.08.98. – М., 2003. – 172 с.
12. ГОСТ Р 50397–2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – Введ. 2012–09–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 56 с.
13. Нормы уровней опасного и мешающего влияния электромагнитных помех на работу поездных устройств АЛС-АРС системы БАРС на рельсовых цепях с фазомодулированным кодированием петербургского метрополитена // Система стандартов по электромагнитной совместимости. ГУП «Петербургский метрополитен». – СПб., 2018. – 31 с.
14. Нормы опасного и мешающего влияния электромагнитных помех на работу поездных устройств АЛС-АРС с фазомодулированным кодированием на рельсовых цепях Петербургского метрополитена. Поездная аппаратура комплексной системы «Движение» модернизированная (ПА-М) // Система стандартов по электромагнитной совместимости. ГУП «Петербургский метрополитен». – СПб., 2018. – 11 с.
15. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 14–19.
16. Шаманов В. И. Моделирование генерации помех токами рельсовой тяговой сети / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 10. – С. 5–9.
17. Шаманов В. И. Косвенные измерения соотношения тяговых токов под катушками АЛС / В. И. Шаманов, А. Е. Ваньшин, Л. Тасболатова // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 8. – С. 2–5.

18. Шаманов В. И. Влияние условий эксплуатации на устойчивость работы АЛСН / В. И. Шаманов, А. В. Пультяков, Ю. А. Трофимов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 5. – С. 46–50.
19. Шаманов В. И. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 196–203.
20. Шаманов В. И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты / В. И. Шаманов. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. – 304 с.
21. Манаков А. Д. Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена / А. Д. Манаков, А. А. Блюдов, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 28–39.
22. Прибор диагностики метро (ПДМ-4). Руководство по эксплуатации. ИДФС. 060.00.00 РЭ. – Инженерный центр «ФЛАРС». – Минск, 2006.
23. Манаков А. Д. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава / А. Д. Манаков, Н. Н. Балугев, А. А. Трошин // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. / под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 93–102.
24. Манаков А. Д. Методика определения тока помех в рельсах двухниточных рельсовых цепей метрополитенов / А. Д. Манаков, В. А. Кудрявцев, А. Т. Осьминин // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 48–52.
25. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
26. СТО СДС ОПЖТ – 09–2011. Требования для добровольной сертификации вагонов метрополитена. Электромагнитная совместимость. – М., 2011. – 12 с.
27. CENELEC DS/CLC/TS 50238–2:2010. Railway Applications – Compatibility Between Rolling Stock and Train Detection Systems – Part 2: Compatibility with Track Circuits, 01.07.2010, 42 p.
28. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит; пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева, И. С. Гусинского. – М.: Додека-XXI, 2008. – 720 с.: ил. – (Серия «Схемотехника»). – ISBN 978-5-94120-145-7.

**A. G. Kabetsky,
A. D. Manakov**

*Department of Automation and Telemechanics on Railways
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*

NORMS AND METHODS FOR DETERMINING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MODERN AUTOMATIC LOCOMOTIVE SIGNALING SYSTEMS AND ELECTRIC ROLLING STOCK WITH AN ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE ON THE SUBWAY

The article provides a brief overview of the development and application of automatic control systems for subway trains. Modern automatic locomotive signaling systems featuring automatic speed control with signal transmission based on double-phase-difference modulation are analyzed. The introduction of electric rolling stock with an asynchronous traction drive and advanced train traffic automation and remote control systems at the St. Petersburg Metro initiates the drive to ensure their electromagnetic compatibility. For the subway train traffic automation and remote control systems, there have been no acceptance criteria for electromagnetic interference that occur in their operating range when electric rolling stock with an asynchronous traction drive is put into operation. The article identifies the main sources of conducted electromagnetic interference and the routes of their penetration into the receive path of automatic locomotive signaling devices with automatic speed control. A method is proposed for determining the limits of hazardous and interfering effects (immunity limits) for automatic train signaling systems with automatic speed regulation of the systems of the BARS automatic speed control unit with phase-difference modulation and the upgraded ПА-М (ПА-М) train automation with phase-difference modulation for the St. Petersburg Metro lines. A method is given for the transition from the immunity limits of automatic locomotive signaling systems with automatic speed control to the emission limits of electric rolling stock at different traction current unbalance factors. A technique for measuring traction current at high-potential points on electric rolling stock is considered. A technique for assessing the levels of conducted electromagnetic interference from electric rolling stock by calculating the effective value in a sliding window of a pre-filtered traction current signal of an electric rolling stock is presented.

Automatic train signaling with automatic speed regulation with phase-difference modulation, asynchronous traction drive, conducted electromagnetic interference, interference limit, interfering electromagnetic interference, hazardous electromagnetic interference, traction current, digital signal processing

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521

References

1. *Baranov L. A., Erofeyev E. V., Astrakhan V. I. et al.* (1984) *Sistemy avtomaticheskogo i telemekhanicheskogo upravleniya elektropodvizhnym sostavom* [Automatic and remote control systems for electric rolling stock] Ed. by L. A. Baranov. Moscow, Transport Publ., 311 p. (In Russian)
2. *Baranov L. A.* (2018) *Avtomaticheskoye upravleniye dvizheniyem poyezdov metropolitena* [Automatic control of subway train traffic]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], vol. 16, no. 3 (76), pp. 156–165. (In Russian)

3. *Nikulchikov P. M.* (2016) Istoriya, sostoyaniye i perspektivy razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya poyezdami metropolitena [History, state and development potential of automatic control systems for subway trains]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 3, pp. 456–473. (In Russian)
4. *Makhmutov K. M.* (1986) *Ustroystva interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na metropolitene* [Devices for interval control of subway train traffic]. Moscow, Transport Publ., 351 p. (In Russian)
5. Blok lokomotivnykh priyemnikov ChK-FM. Rukovodstvo po ekspluatatsii. IDFS. 065.00.000 RE [Train apparatus block ChK-FM. Manual. IDFS. 065.00.000 OM]. (2009). Minsk, OOO FLARS, Engineering Center, 23 p. (In Russian)
6. *Kravtsov Yu. A.* (2015) Elektromagnitnaya sovmestimost' rel'sovykh tsepey i elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom [Electromagnetic compatibility of track circuits and electric rolling stock with asynchronous traction drive]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 1, no. 1, pp. 7–27. (In Russian)
7. *Kravtsov Yu. A., Arkhipov E. V., Antonov A. A. & Bakin M. E.* (2014) Normativy po elektromagnitnoy sovmestimosti podvizhnogo sostava i rel'sovykh tsepey i metody ikh proverki [Electromagnetic compatibility limits of rolling stock and rail circuits and methods for their verification]. *Science and Technology in Transport*, no. 2, pp. 65–71. (In Russian)
8. *Bestem'yanov P. F., Kravtsov Yu. A., Shcherbina E. G. & Chegurov A. B.* (2012) Metodika otsenki rabotosposobnosti rel'sovykh tsepey tonal'noy chastoty pri vozdeystvii toka elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom [Methodology for assessing the performance of audio frequency track circuits under the influence of the current of electric rolling stock with an asynchronous traction drive]. *Bulletin of RSTU*, no. 1, pp. 87–92. (In Russian)
9. *Kravtsov Yu. A., Lin'kov V. I., Mashchenko P. E. & Shcherbina A. E.* (2009) Issledovaniye pomekhoustoychivosti putevykh priyemnikov tonal'nykh rel'sovykh tsepey [Study of immunity limits of track pick up units of audio frequency track circuits]. *Science and Technology in Transport*, no. 1, pp. 86–91. (In Russian)
10. *GOST 33436.3-1-2015 (MEK 62236-3-1:2008). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Sistemy i oborudovaniye zheleznodorozhnogo transporta. Chast 3-1. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Trebovaniya i metody ispytaniy* [GOST 33436.3-1-2015 (IEC 62236-3-1:2008) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Railway systems and equipment. Part 3-1. Railway rolling stock. Requirements and test methods] Introd. 2017.06.01. (2019). Moscow, Standartinform, 17 p. (In Russian)
11. *Normy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte: NB ZhT TsT 04-98. Elektrovozy. Trebovaniya po sertifikatsii* [Rail Safety Standards: NB ZhT TsT 04-98. Electric locomotives. Certification requirements]. Introd. 07.08.98. (2003). Moscow, 172 p. (In Russian)
12. *GOST R 50397-2011 (MEK 60050-161:1990). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya* [GOST R 50397-2011 (IEC 60050-161:1990) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Terms and definitions]. Introd. 2012-09-01. (2013). Moscow, Standartinform, 56 p. (In Russian)
13. *Normy urovney opasnogo i meshayushchego vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na rabotu poyezdnykh ustroystv ALS-ARS sistemy BARS na rel'sovykh tsepyakh s fazomodulirovannym kodirovaniyem peterburgskogo metropolitena* [Limits for the levels of hazardous and interfering effects of electromagnetic interference on the operation of automatic train signaling with automatic speed regulation of the BARS system on track circuits with phase-modulated coding of the St. Petersburg Metro]. *Sistema standartov po elektromagnitnoy sovmestimosti* [System of electromagnetic compatibility standards]. (2018). St. Petersburg Metro State Unitary Enterprise, St. Petersburg, 31 p. (In Russian)

14. *Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na rabotu poyezdnykh ustroystv ALS-ARS s fazomodulirovannym kodirovaniyem na rel'sovykh tsepyakh Peterburgskogo metropolitena. Poyezdnaya apparatura kompleksnoy sistemy «Dvizheniye» modernizirovannaya (PA-M) [Limits of hazardous and interfering effects of electromagnetic interference on the operation of automatic train signaling with automatic speed regulation with phase-modulated coding on the track circuits of the St. Petersburg Metro. Modernized train apparatus of the "Dvizheniye" complex system (MTA)]. Sistema standartov po elektromagnitnoy sovmestimosti [System of electromagnetic compatibility standards]. (2018). St. Petersburg Metro State Unitary Enterprise, St. Petersburg, 11 p. (In Russian)*
15. *Shamanov V.I. (2013) Zashchishchennost' lokomotivnykh priyemnikov ALS ot pomekh [Protection of automatic train signaling apparatus from interference]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science]. No. 4, pp. 14–19. (In Russian)*
16. *Shamanov V.I. (2014) Modelirovaniye generatsii pomekh tokami rel'sovoy tyagovoy seti [Modeling of interference generation by currents of a rail traction network]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science]. No. 10, pp. 5–9. (In Russian)*
17. *Shamanov V.I., Van'shin A.E. & Tasbolatova L. (2018) Kosvennyye izmereniya sootnosheniya tyagovykh tokov pod katushkami ALS [Indirect measurements of the ratio of traction currents under the automatic train signaling coils]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science], no. 8, pp. 2–5. (In Russian)*
18. *Shamanov V.I., Pul'tyakov A.V. & Trofimov Yu. A. (2009) Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na ustoychivost' raboty ALSN [The influence of operating conditions on the stability of the continuous automatic train signaling operation]. Zheleznodorozhnyy transport [Railroad Transport], no. 5, pp. 46–50 (In Russian)*
19. *Shamanov V.I. & Trofimov Yu. A. (2015) Parametry rel'sovykh liniy v zadachakh elektromagnitnoy sovmestimosti [Rail line parameters as related to electromagnetic compatibility]. Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling], no. 4 (48), pp. 196–203. (In Russian)*
20. *Shamanov V.I. (2018) Pomekhi na apparaturu rel'sovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity [Interference on the track circuits and automatic train signaling equipment. Protection means]. Moscow, FSBHEI Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Railway educational training center] Publ. 304 p. (In Russian)*
21. *Manakov A.D., Blyudov A.A., Kabetskiy A.G. & Troshin A.A. (2015) Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Limits of hazardous and interfering interferences on the automatic train signaling with automatic speed regulation of the BARS system of the St. Petersburg Metro]. Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport], vol. 1, no. 1, pp. 28–39. (In Russian)*
22. *Pribor diagnostiki metro (PDM-4). Rukovodstvo po ekspluatatsii. IDFS. 060.00.00 RE [Metro diagnostics device (PDM-4). Manual. IDFS. 060.00.000 OM]. (2006). OOO FLARS, Engineering Center, Minsk (In Russian)*
23. *Manakov A.D., Baluyev N.N. & Troshin A.A. (2013) Elektromagnitnaya sovmestimost' rel'sovykh tsepey i elektropodvizhnogo sostava [Electromagnetic compatibility of track circuits and electric rolling stock]. Aktual'nyye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. [Current problems of railway automation and remote control systems development: Scientific proceedings]. Under editorship of V.I. V. Sapozhnikov, Saint Petersburg, Petersburg State Transport University, pp. 93–102. (In Russian)*
24. *Manakov A.D., Kudryavtsev V.A. & Os'minin A.T. (2016) Metodika opredeleniya toka pomekh v rel'sakh dvukhmitochnykh rel'sovykh tsepey metropolitenov [Methodology for determining*

- the interference current in the rails of double-rail track circuits of subways]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], no. 5, pp. 48–52. (In Russian)
25. *Arkotov V. S., Kravtsov Yu. A. & Stepenskiy B. M.* (1990) *Rel'sovyye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye* [Rail circuits. Analysis of operation and maintenance]. Moscow, Transport Publ., 295 p. (In Russian)
 26. STO SDS OPZhT – 09–2011. *Trebovaniya dlya dobrovol'noy sertifikatsii vagonov metropolitena. Elektromagnitnaya sovmostimost'* [Standard of the Voluntary Certification System of the Association of Railway Equipment Manufacturers – 09–2011. Requirements for voluntary certification of subway cars. Electromagnetic Compatibility]. (2011) Moscow, 12 p. (In Russian)
 27. CENELEC DS/CLC/TS 50238–2:2010. *Railway Applications – Compatibility Between Rolling Stock And Train Detection Systems – Part 2: Compatibility With Track Circuits* (2010) 42 p.
 28. *Steven W. Smith.* (2008) *Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoye rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists]. Russ. ed. by A. Yu. Linovich, S. V. Vityazev, I. S. Gusinsky. Moscow, Dodeka-XXI, 720 p.: il. (In Russian) (“Skhemotekhnika” (Computer Circuitry) Series). ISBN 978-5-94120-145-7.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором В. И. Шамановым*

Поступила в редакцию 28.07.2021, принята к публикации 10.08.2021

Кабецкий Андрей Геннадьевич – инженер Центра компьютерных железнодорожных технологий кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I
kabeckiy@gmail.com

Манаков Александр Демьянович – старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий, доктор технических наук, старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I
manakoff_2@mail.ru

© Кабецкий А. Г., Манаков А. Д., 2021