MATHEMATICAL MODELING

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.311, 621.316

В.А. Бабошин, Б. Гаврилович, А.А. Яковлев

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ РАДИОПОМЕХ НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Бабошин Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, окончил Ульяновское высшее военное командное училище связи. Доцент кафедры «Восстановление устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах» Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения им. ген. армии А.В. Хрулёва. Имеет статьи, изобретения в областях анализа (синтеза) информационных систем и математического моделирования, в области восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. [e-mail: boboberst@mail.ru].

Гаврилович Бранислав, доктор технических наук, окончил Электротехнический факультет университета «Велько Влахович» в Титограде. Профессор кафедры Высшей школы подготовки железнодорожных специалистов, Белград, Сербия. Имеет статьи, изобретения, научные и учебно-методические работы в области энергетики, эксплуатации железнодорожного транспорта, устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. [e-mail: gavrilovicbranislav5@gmail.com].

Яковлев Антон Анатольевич, кандидат экономических наук, окончил Ленинградское высшее военное общевойсковое командное училище. Преподаватель Санкт-Петербургского университета технологий управления и экономики. Имеет статьи, научные и учебно-методические работы в области управления экономикой промышленного производства. [e-mail: yakovlev16@yandex.ru].

Аннотация

Железнодорожный транспорт представляет собой сложную организационно-технологическую систему, технологический процесс железнодорожных перевозок зависит от множества факторов, в том числе от пропускной и провозной способностей станций и путевых сооружений. Эффективность управления [1] технологическим процессом на станции, организация безопасного регулирования движения поездов в условиях воздействия неблагоприятных

факторов играют решающую роль. Одним из значительных неблагоприятных факторов является влияние радиопомех на электротехническую, электронную аппаратуру и оборудование, применяемые для обеспечения железнодорожной автоматики, телемеханики и электросвязи [2]. В статье рассматриваются некоторые вопросы электромагнитной совместимости данного оборудования, проводится анализ влияния изменения напряжения в контактной сети при работе тяговых электродвигателей на формирование гармонических радиопомех для оборудования сетей электропитания, устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и электросвязи. Этот вопрос является существенным для реализации общеевропейских стандартов и принципов, касающихся функциональной совместимости оборудования, что оказывает влияние и на экономические показатели железнодорожного транспорта. Особое внимание уделяется рассмотрению опыта практического использования в качестве средств первичной защиты [3] компенсаторных фильтров, применяемых на тяговых подстанциях Сербской железной дороги.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, сложная организационно-технологическая система, контактная сеть, распределительная сеть, радиопомехи, гармоники, железнодорожная автоматика и телемеханика, электросвязь, экономическая эффективность, надёжность.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-36-45

TO THE STUDY OF ANALYSIS ON HOW HARMONIC RADIO INTERFERENCE AFFECTS THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF RAILWAY TRANSPORT

Vladimir Aleksandrovich Baboshin, *Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from the Ulyanovsk Higher Military Command School of Communications; Associate Professor of the Department of Reconstruction of Automatic, Telemechanic, and Communication Devices on Railways at the Military Institute of Railway Troops and Military Communications of Military Academy of Logistics and Transport n.a. Army General A.V. Khrul'ov; an author of articles, inventions in the field of analysis (synthesis) of information systems and mathematical modeling, reconstruction of railway automatic and telemechanic devices. e-mail: boboberst@mail.ru.*

Branislav Gavrilovich, *Doctor of Sciences in Engineering; graduated from the Electrical Engineering Department of Veljko Vlahovic University in Titograd; Professor of the Department of the Higher Railway School in Belgrade, Serbia; an author of articles, inventions, scientific and methodological works in the field of power generation, operation of railway transport, railway automation and telemechanic devices. e-mail: gavrilovicbrislav5@gmail.com.*

Anton Anatolevich Iakovlev, *Candidate of Sciences in Economics; graduated from Leningrad Higher Military Combined Armies Command Institute; Lecturer of Saint-Petersburg University of Management Technologies and Economics; an author of articles, scientific and methodological works in the field of industrial economic management. e-mail: yakovlev16@yandex.ru.*

Abstract

The railway transport is a complex organizational and technological system. Transit by rail freightage is contingent on many factors, including the traffic and carrying capacity of stations and track infrastructure. The efficient management of an operating station, as well as arrangement of safe rail traffic control affected by adverse factors is of crucial importance [1]. One of such significant factors is the radio interference influencing electrical and electronic equipment, and equipment ensuring the automation of railway, remote control and telecommunications [2].

The article discusses some issues of electromagnetic compatibility of the equipment, analyses how voltage variation in the overhead system affects the generation of harmonic radio interference for the equipment of power supply network, railway automation, telemechanics and telecommunications, when traction motors are running. This issue is essential to ensure the compliance with Eurostandards and concepts, regarding the compatible functionality of equipment, which influences the railway economics. The article emphasizes the compensating filters, which are put to practice use at traction substations of Serbian Railways as primary protection means [3].

Key words: railway transport, complex organizational and technological system, overhead system, distribution network, radio interference, harmonics, railway automation and telemechanics, telecommunications, economical efficiency, reliability.

ВВЕДЕНИЕ

Правильный выбор оборудования и программного обеспечения, внедрение автоматизации управления маршрутизацией подвижного состава могут существенно повысить пропускную способность как отдельной станции, так и железнодорожного направления в целом. Особое значение вопросы управления [1] приобретают в том случае, когда станционное оборудование подверглось неблагоприятным воздействиям, в том числе и помехам различного происхождения, и необходимо в кратчайшие сроки восстановить работоспособность технических средств (ТС) железнодорожного транспорта (ЖДТ) для обеспечения перевозок [2]. Особое внимание следует уделять влиянию железнодорожных тяговых систем на распределительную электрическую сеть нетяговых потребителей, а также на аппаратуру и линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (ЖАТ и С) и другие ТС.

Нормы допустимых численных значений интенсивности опасных отказов $\lambda_{\text{оп}}(t)$ для систем ЖАТ, найденные по результатам обработки статистических данных с учётом концепции замещения риска для электрической централизации (ЭЦ), приведены в таблице 1 [2].

Работа локомотивных тяговых электродвигателей, в том числе оснащенных диодными преобразователями, является источником гармонических помех, вызывает формирование нелинейной нагрузки, проявляющейся как эквивалентный генератор тока с низким значением коэффициента мощности и с большим содержанием нечетных гармоник. Данные гармоники вызывают синусоидальное искажение напряжения (25 кВ, 50 Гц) системы контактных линий и оказывают влияние на распределительные электрические сети.

Определение степени подобных искажений необходимо для оценки условий работы:

- счетчиков электроэнергии, установленных на борту локомотива;
- тяговых преобразователей двигателей в режиме рекуперативного торможения;
- технических средств железнодорожной автоматики, телемеханики и электросвязи, а также других ТС, используемых в технологическом процессе.

Аппаратура ЖАТ и другие ТС должны соответствовать требованиям помехоустойчивости при воздействии помех следующих видов:

- электростатические разряды;
- наносекундные импульсные помехи;
- микросекундные импульсные помехи большой энергии;

- динамические изменения напряжения электропитания;
- радиочастотное электромагнитное поле;
- магнитное поле промышленной частоты;
- кондуктивные помехи в полосе частот от 0,15 до 80 МГц, наведенные радиочастотными электромагнитными полями;
- кондуктивные помехи в полосе частот от 0 до 150 кГц.

Импульсные помехи большой энергии возникают при коммутационных переходных процессах:

- переключения в тяговых системах электроснабжения;
- переключения в распределительных системах электроснабжения в непосредственной близости от ТС;
- изменения нагрузки в электрических распределительных сетях;
- резонансные колебания напряжения в электрических сетях, обусловленные работой переключающих приборов;
- при ударах молний (непосредственных, косвенных, ударах в грунт), создающих разность потенциалов в системе заземления ТС;
- повреждения в системах (короткие замыкания на землю и дуговые разряды в электрических установках различного назначения);
- при быстрых изменениях напряжения или тока при срабатывании защитных устройств во внутренних цепях различных ТС [3].

С учетом степени влияния нарушений функционирования аппаратуры железнодорожной электросвязи на безопасность движения поездов и жесткости электромагнитной обстановки при эксплуатации аппаратуры железнодорожной электросвязи устанавливают классы аппаратуры I, II, III и IV по устойчивости к помехам [4].

1 ГАРМОНИЧЕСКИЕ ПОМЕХИ

Анализ известных инцидентов на ЖДТ, приведших к большим материальным потерям, травмам и гибели людей, показывает, что большая часть из них связана с именно недостатками в работе ТС ЖАТ и С, подвергшихся различным неблагоприятным воздействиям [5]. Особую актуальность данная проблема приобретает в процессе компьютеризации, интеллектуализации транспортных систем (внедрение автоматизированных систем управления (АСУ), спутниковых технологий, программно-аппаратных решений), так как повышается восприимчивость отдельных электронных элементов ТС к внешним электромагнитным воздействиям, в том числе и воздействиям гармонических помех со сторо-

Таблица 1

Нормы допустимых численных значений интенсивности опасных отказов

Объект ЖАТ	Единица измерения	Интенсивность опасных отказов, 1/ч	Примечание
ЭЦ	станция	$1,8 \cdot 10^{-7}$	для станций с числом до 22 стрелок
	стрелка	$7,7 \cdot 10^{-9}$	для станций с числом более 22 стрелок

ны сетей электропитания. Гармонические искажения в сети электропитания оказывают значительное негативное влияние на электрические приборы ТС ЖДТ, которое может привести к нарушениям в их работе и, как следствие, к инцидентам транспортной безопасности и тяжёлым последствиям.

Гармоники являются устойчивыми компонентами периодического переменного напряжения или тока, используемого для тяговых и нетяговых потребителей. Величины отдельных гармоник, как правило, выражаются в процентах от основного значения или от величины среднеквадратичного отклонения (*Root Mean Square, RMS*) от значения общего напряжения или тока, а частоты гармоник являются целыми кратными основной частоты. Как известно, несинусоидальная форма волны может быть представлена как сумма определенного числа синусоидальных компонентов с несколькими частотами [6], а любой периодический сигнал (форма волны) может быть описан рядами Фурье (1).

$$u(t) = U_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(U_{(n)s} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) + U_{(n)c} \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) \right). \quad (1)$$

Коэффициенты определяются следующим образом:

$$U_{(n)s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) dt, \quad (2)$$

$$U_{(n)c} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) dt, \quad (3)$$

где n – целое число, номер гармонической составляющей в спектре сетевого напряжения, кратной основной частоте $\omega = \frac{2\pi}{T}$, T – период времени.

Коэффициент суммарных гармонических искажений THD_U (*Total Harmonic Distortion*) складывается из

коэффициентов n -х гармонических составляющих напряжения. Суммарное гармоническое искажение по напряжению (THD_U), используемое в качестве меры гармонических искажений, может быть определено как:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}}, \quad (4)$$

где $U_{(1)}/U_{(n)}$ – (*Root Mean Square, RMS*) отношение первой гармоники к n -й гармонической составляющей напряжения.

При этом эффективное значение U_{RMS} среднеквадратичного значения гармонических составляющих напряжения по отношению к первой гармонике $U_{(1)}$ определяется как:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = U_{(1)} \sqrt{1 + THD_U^2}. \quad (5)$$

Расчёты для низких уровней искажений напряжения показывают, что $U_{RMS} \approx U_{(1)}$.

В соответствии с Европейским стандартом EN 50160 [7], значения величин отдельных гармоник n -го порядка в процентном соотношении от номинального напряжения $U_n = 25$ кВ приведены в таблице 2 [8].

Очевидно, это достаточно большие величины гармоник, достигающие значений от 0,5 до 6% от номинального напряжения. При этом стандарт [7] ограничивает совокупную величину THD_U для каждого десятиминутного промежутка времени восемью процентами от номинала.

Высшие гармоники чаще всего создаются за счёт нелинейно нагруженных электротяговых транспортных средств, которые находятся на разном расстоянии от электротяговой подстанции. Они, в свою очередь, создают другие высшие гармоники на линии контактной сети

Таблица 2

Значения величин отдельных гармоник n -го порядка

Нечетные высшие гармоники (не делящиеся на 3)		Нечетные высшие гармоники (делящиеся на 3)		Четные высшие гармоники	
№ гармоники	$U_{(n)}, \%$	№ гармоники	$U_{(n)}, \%$	№ гармоники	$U_{(n)}, \%$
5	6,0	3	5,0		
7	5,0	9	1,5	2	2,0
11	3,5	15	0,5	4	1,0
13	3,0	21	0,5	6 to 24	0,5
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

в месте расположения пантографа локомотива. Кроме того, широкое использование преобразователей частоты и аналоговых устройств на электротяговых транспортных средствах приводит к увеличению значения кратных гармоник, допустимые значения которых в настоящее время не определены в известных стандартах, в том числе и EN 50160. Гармоники меньшей интенсивности способны вызывать мерцания и помехи в устройствах ЖАТ и С, что может привести к их отказам и инцидентам в обеспечении безопасного движения поездов.

Электронные элементы, входящие в состав ТС ЖАТ и С, уязвимы и к воздействию как импульсов тока, так и перепадов напряжения по отношению к внешним портам, так как именно внешняя среда и является источником неблагоприятных воздействий. Под портом понимается граница между ТС и внешней электромагнитной средой (зажим, разъем, клемма, стык и др.) [4].

В ходе известного эксперимента было исследовано воздействие электромагнитного поля напряженностью до 30 В/м с использованием как амплитудной модуляции синусоидальным сигналом, так и импульсной модуляции (скважность 2), на следующие образцы цифрового оборудования [3]:

- линейные модули цифровых систем коммутации, используемых на железной дороге;
- модем (скорость передачи 2 Мб/с, 75-омный коаксиальный кабель);
- модем (скорость передачи 2 Мб/с, 120-омная симметричная линия);
- промышленный контроллер с микропроцессором, дисплеем и интерфейсом RS 485;
- обучающая система с микропроцессором;
- терминал для кредитных карт с модемом;
- цифровой мультимплексер (2/34 Мб/с);
- коммутатор Ethernet (10/100 Мб/с).

Все документированные отказы были связаны в основном с аналоговыми функциями испытуемого оборудования, однако очевидна задача обеспечения требуемого качества электроэнергии и использования специальных устройств защиты по току и по напряжению (КЗ) – наиболее распространенный вид защиты. Необходимость использования устройств защиты по напряжению очевидна, тем более, что классические разрядники в силу своей инерционности защиту современных электронных компонент не обеспечивают. В рамках данной статьи вопросы выбора средств защиты оборудования не рассматриваются.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА, ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве исследуемых объектов были выбраны три тяговых подстанции, а также стандартные локомотивы с тяговым диодным преобразователем при их использовании как на однопутной, так и на двухпутной железнодорожной линии с целью учёта взаимного влияния соседних линий на исследуемых участках. Измерения

проводились на различных удалениях от подстанций, с целью выявления уровня линейных зависимостей гармонических составляющих тягового напряжения. Схема подключения измерительного оборудования на тяговой подстанции приведена в [10].

Входной импеданс системы питания по отношению к локомотиву включает в себя следующие элементы:

- сопротивление линий контактной сети между локомотивом и подстанцией;
- входное сопротивление линий контактной сети между локомотивом и открытым концом контактной сети;
- входной импеданс оборудования компенсаторных фильтров (*filter compensating equipment, FCE*), установленных на тяговой подстанции;
- эквивалентное реактивное сопротивление тягового трансформатора подстанции.

Оборудование компенсаторных фильтров *FCE*, установленных на подстанциях, содержит две ветви звеньев *LC* (*индуктивность-ёмкость*), одну для 3-й и другую для 5-й гармоники, настроенные точно на 150 Гц и 250 Гц [9, 10].

Согласно данным предположениям, можно выделить три частотных диапазона:

1. Для частот 150 Гц и 250 Гц – реактивным сопротивлением тягового трансформатора подстанции можно пренебречь, поскольку обе ветви *LC FCE* создают короткие замыкания для этих частот.

2. Для гармоник от первой до седьмой резонансной частоты реактивное сопротивление тягового трансформатора подстанции подключается параллельно с *FCE*. Эквивалентное сопротивление тяговой подстанции имеет индуктивный характер, оно состоит из следующих компонентов: индуктивного сопротивления тягового трансформатора и ветвей *LC*.

3. Для частот, близких к первой резонансной частоте, система питания состоит из:

- системы контактных линий, рассматриваемой как однородная электрическая линия;
- тяговой подстанции как с *FCE*, так и с эквивалентным реактивным сопротивлением тягового трансформатора;
- электровоза, представляющего собой генератор тока гармонических составляющих.

При анализе учитываются электрические параметры системы контактных линий на километр [10]:

- индуктивность $L \cong 1 \text{ мГ/км}$;
- ёмкость $C \cong 15 \text{ нФ/км}$.

В результате абсолютное значение входного сопротивления недиссипативной контактной линии $|Z_{TV}|$ длиной l_{TV} [км] определяется как:

$$|Z_{TV}| = Z_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 \cdot l_{TV} \cdot n), \quad (6)$$

где Z_0 – характеристический (импульсный) импеданс, который не зависит от длины системы контактных линий и равен $Z_0 = 258,2 \Omega$;

$\alpha_1 = 1,217 \cdot 10^{-3} \text{ rad/km}$ – постоянный фазовый сдвиг для спектральной составляющей 50 Гц [10].

Пусть ситуация описывается следующими значениями:

– расстояние электровоза от тяговой подстанции $l_{TV} = 25 \text{ km}$;

– составляющая 50 Гц тока локомотива $I_{LOK, (1)} = 200 \text{ A}$;

– процентная доля гармонических составляющих тока локомотива определяется как:

$$I_{LOK, (n)} = \frac{100}{n} \%;$$

– 3-я и 5-я гармоники составляют 1572 В каждая (5,7% от номинального напряжения);

– эквивалентное реактивное сопротивление тягового трансформатора $L_{TT} = 23 \text{ mH}$;

– ёмкость ветви 3-й гармоники ($350 \text{ Hz} > 150 \text{ Hz}$) $C_3 = 6 \text{ }\mu\text{F}$;

– индуктивность ветви 3-й гармоники $L_3 = 188 \text{ mH}$;

– ёмкость ветви 5-й гармоники ($350 \text{ Hz} > 250 \text{ Hz}$) $C_5 = 2 \text{ }\mu\text{F}$;

– индуктивность ветви 5-й гармоники $L_5 = 203 \text{ mH}$.

Общая формула для определения эквивалентной индуктивности ветви LC относительно её базовой индуктивности L , для случая, когда частота гармоники f выше, чем резонансная частота ветви $f_{LC, REZ}$ имеет вид:

$$\bar{L}(f) = L \cdot \left[1 - \left(\frac{f_{LC, REZ}}{f} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

В соответствии с (7), значения эквивалентной индуктивности LC – ветвей для 7-й гармоники составляют:

– по отношению к 3-й гармонике – $\bar{L}_{3,7} = 153 \text{ mH}$;

– по отношению к 5-й гармонике – $\bar{L}_{5,7} = 99,4 \text{ mH}$.

С учётом того, что эти составляющие включены параллельно тяговому трансформатору, результирующая индуктивность трансформатора для седьмой гармоники будет равна $L_{TNS,7} = 16,65 \text{ mH}$.

Входной импеданс однородной электрической линии $Z_1(n)$ по отношению к шунтирующему импедансу $Z_2(n)$ определяется как:

$$Z_1(n) = Z_1 \cdot \frac{Z_2(n) + j \cdot Z_0 \cdot \text{tg}(\alpha_1 \cdot n \cdot l)}{Z_0 + j \cdot Z_2(n) \cdot \text{tg}(\alpha_1 \cdot n \cdot l)}. \quad (8)$$

Тогда результирующая формула может быть записана как:

$$Z_1(n) = j \cdot Z_0 \cdot \frac{100 \cdot \pi \cdot n \cdot \bar{L}_{TNS} + Z_0 \cdot \text{tg}(\alpha_1 \cdot n \cdot l_{TV})}{Z_0 - 100 \cdot \pi \cdot \bar{L}_{TNS} \cdot \text{tg}(\alpha_1 \cdot n \cdot l_{TV})}. \quad (9)$$

Из этого результирующий импеданс для 7-й гармоники: $Z_1(7) = j \cdot 95,37 \Omega$.

Данные результаты получены на основе измерений на однопутном участке.

Опуская промежуточные результаты, приведём измерения для двухпутного участка при условии, что локомотивы находятся на одинаковом удалении от тяговой подстанции и нагружена только одна линия.

В этом случае импеданс ненагруженной линии равен: $Z_{TV, 2}(n) = -j \cdot Z_0 \cdot \cotg(\alpha_1 \cdot n \cdot l_{TV})$.

Формула для входного сопротивления всей системы питания для двухпутного участка ненагруженной линии (со стороны локомотива) имеет вид:

$$Z_2(n) = j \cdot Z_0 \cdot \frac{100 \cdot \pi \cdot n \cdot \bar{L}_{TNS} \cdot [\cotg(\alpha_1 \cdot n \cdot l_{TV}) - \text{tg}(\alpha_1 \cdot n \cdot l_{TV})] + Z_0}{Z_0 \cdot \cotg(\alpha_1 \cdot n \cdot l_{TV}) - 200 \cdot \pi \cdot \bar{L}_{TNS}}. \quad (10)$$

Из (10) результирующий импеданс для седьмой гармоники: $Z_2(7) = j \cdot 96,66 \Omega$.

Разница в значениях для однопутного $Z_1(7)$ и двухпутного участков $Z_2(7)$ связана с тем, что входной импеданс тяговой подстанции определяется: $Z_{TNS}(7) = 100 \cdot \pi \cdot 7 \cdot L_{TNS, 7} = 36,62 \Omega$, а импеданс ненагруженной линии равен: $Z_{TV}(7) = -j \cdot Z_0 \cdot \cotg(\alpha_1 \cdot 7 \cdot l_{TV}) = 1194,2 \Omega$.

Исходя из этого, очевидно, что составляющая 7-й гармоники не оказывает значительного влияния на результирующий импеданс со стороны локомотива. Численное значение величины тока 7-й гармоники ло-

комотива равно $I_{LOK, 7} = 28,57 \text{ A}$, импеданс равен $Z_1(7) \cong Z_2(7) \cong 96 \Omega$, напряжение на пантографе локомотива – $V(7) = 2743 \text{ V}$.

Значение входного сопротивления всей системы (тяговая подстанция, обе ветви LC , система контактных линий) может быть получено при условии, когда входное сопротивление достигает теоретически неограниченного значения. В ходе измерений получены три значения резонансной частоты, причём первая и вторая практически не зависят от длины контактной линии:

– первая – $f_{REZ, 1} = 141,0 \text{ Hz}$ ($n_{REZ, 1} = 2,82$);

– вторая – $f_{REZ, 2} = 238,5 \text{ Hz}$ ($n_{REZ, 2} = 2,82$).

Таблица 3

Зависимость значения $f_{REZ, 3}$ от длины контактной линии

Количество путей	Двухпутная линия		Однопутная линия	
Длина l_{TV} [km]	$f_{REZ, 3}$ [Hz]	n_{REZ}	$f_{REZ, 3}$ [Hz]	n_{REZ}
25	1215	24,3	1565	31,3
30	1085	21,7	1385	27,7
35	990	19,8	1240	24,8
40	910	18,2	1130	22,6
45	840	16,8	1035	20,7
50	785	15,7	955	19,1

Значения третьей частоты $f_{REZ, 3}$ в зависимости от длины линии, приведены в таблице 3.

Графики, приведённые на рисунках 1 и 2, показывают процентное соотношение гармонических составляющих тягового напряжения для нечётных гармоник на различных удалениях от тяговой подстанции. По оси ординат отложены значения величины напряжения гармоник в процентах по отношению к номинальному напряжению. Прямые линии, соединяющие измеренные значения не предназначены для интерполяции, они демонстрируют только ход графика.

Следует заметить, что 3-я и 5-я спектральные составляющие выходного напряжения тяговых подстанций не учитываются, поскольку их влияние компенсируется ветвями LC компенсаторных фильтров.

Результаты, полученные в ходе измерений, показывают:

- 1-я и 2-я резонансные частоты зависят ни от параметров обеих LC -ветвей, ни от длины контактных линий;
- гармоники высшего порядка (выше 3-й гармоники) возникают вследствие периодичности функции котангенса. Например, 4-я гармоническая составляющая на двухпутном участке длиной 25 км равна $f_{REZ, 4} = 2580 \text{ Hz}$ ($n_{REZ, 4} = 51,6$).

Процентное значение напряжения гармонических составляющих с порядком гармоник от 3 до 15 для однопутной линии длиной от 25 до 50 км показано на рисунке 1.

Результаты, полученные при измерениях на двухпутной линии, приведены на рисунке 2.

Графики, приведённые на рисунках 1 и 2, показывают процентное соотношение гармонических составляющих тягового напряжения для нечётных гармоник на различных удалениях от тяговой подстанции. Прямые линии, соединяющие измеренные значения, не предназначены для интерполяции, они демонстрируют только ход графика.

Следует заметить, что 3-я и 5-я спектральные составляющие выходного напряжения тяговых подстанций не учитываются, поскольку их влияние компенсируется ветвями LC компенсаторных фильтров.

Измерения гармоник проводились в высоковольтной тяговой сети 110 кВ как со стороны подстанции, так

и со стороны локомотива. В ходе эксперимента использовался прибор для измерения мгновенных значений напряжения и тока, предназначенный для долгосрочного мониторинга. Измерительное оборудование состояло из стандартного промышленного компьютера, входных интерфейсных преобразователей, кабелей и специального программного обеспечения [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Транспорт и транспортная инфраструктура оказывают значительное влияние на развитие всех отраслей

Рис. 1. Искажения напряжения питания для однопутной линии

Рис. 2. Искажения напряжения питания для двухпутной линии

экономики, производительность труда, стоимостные показатели выпускаемой продукции. В свою очередь, ЖДТ сам по себе, как отрасль народного хозяйства, требует капиталовложений для обеспечения собственных технологических процессов. В частности, для обеспечения потребностей в тяговом подвижном составе предприятий промышленного ЖДТ в ближайшей перспективе потребуется приобрести и модернизировать от 17 до 19 тыс. локомотивов различных моделей, включая в это число строительство 4,6–4,8 тыс. новых [11], что, безусловно, свидетельствует об актуальности проводимых исследований.

Высшие гармоники тяговых сетей электропитания являются, в том числе, следствием нелинейности нагрузки электротяговых транспортных средств, находящихся на разном удалении от электротяговой подстанции. Они образуют высшие гармоники, излучаемые в месте подключения пантографа к контактной сети в форме высокочастотных радиопомех и, наряду с гармониками меньшей интенсивности в цепях электропитания нетяговых потребителей, могут воздействовать на электронные устройства ЖДТ, а также вызывать помехи в работе устройств ЖАТ и С, вплоть до выхода из строя оборудования, не имеющего элементов защиты по току и по напряжению.

Анализ результатов измерения гармоник тягового напряжения с использованием в качестве средств первичной защиты компенсаторных фильтров на тяговых подстанциях, проводился в соответствии с международными стандартами и техническими отчетами об определении качества электроэнергии в распределительных сетях. Термин «обеспечение качества электроэнергии» определяется в стандарте IEEE 1159 [12] как «концепция конструирования цепей питания и заземления в чувствительном оборудовании так, как это подходит для работы этого оборудования и совместимо с используемой системой питания и другим соединенным с ней оборудованием» [10,11].

Следует заметить, что максимальные измеренные значения оказались ниже пределов, указанных для напряжении питания 110 кВ. В американском стандарте IEEE.519-1992 данный предел не должен превышать значение 2,5% от номинала, в европейском стандарте EN 50160 – до 8% [12, 13].

Таким образом, оценка полученных данных показала, что гармоническое искажение напряжений на исследуемых тяговых подстанциях при использовании компенсаторных фильтров соответствует условиям, установленным международными стандартами для работы распределительных систем. Результаты измерений сравнивались с результатами, полученными в ходе имитационного моделирования, они находились в пределах, установленных вышеупомянутыми стандартами, отклонения от ожидаемых значений были незначительными, что говорит об адекватности используемой модели [10].

Некоторые различия между результатами измерений и моделирования для отдельных гармонических

составляющих могли быть вызваны ограниченным объемом статистических данных или погрешностями измерений.

Данные результаты необходимо учитывать при проведении модернизации существующего локомотивного парка и проектировании новых образцов. При анализе комплекса технических требований, предъявляемых к локомотивному и другому оборудованию ЖДТ, допустимо использование методов многокритериальной оптимизации. Многокритериальная теория полезности (MAUT), методы которой имеют аксиоматическое обоснование: вводятся аксиомы и доказывается существование функции полезности в той или иной форме. Особо важную роль играют аксиомы (условия) независимости, определяющие, что отношения между частью критериальных оценок альтернатив не зависят от фиксированных значений по другим критериям. На основании этих предположений возможно формирование и разработка специального программного обеспечения для использования в системах поддержки принятия решения, являющихся основным средством повышения интеллектуальных возможностей человека при решении сложных организационно-технических задач [14].

Совершенно очевидно, что решение вопросов, которые были затронуты в данной статье, имеет не только и не столько техническое, но и серьезное экономическое значение для всей отрасли ЖДТ транспорта и смежных отраслей промышленности.

Фактически, речь должна идти о комплексном применении средств защиты в сетях тяговых и нетяговых потребителей с целью обеспечения требуемого качества электроэнергии и минимизации предпосылок для возникновения аварийных ситуаций. Особенно важной данная задача является для ТС ЖАТ и С, которые используют протяженные металлические кабельные линии связи.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение вопросов влияния гармонических составляющих тягового напряжения на оборудование нетяговых потребителей и разработке технологий и средств защиты такого оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.К., Бабошин В.А. Оптимальное формирование контуров управления // Автоматизация процессов управления. 2018. № 4 (54). С. 4–11.
2. К вопросу надёжности унифицированного восстановительного комплекса железнодорожной автоматики и телемеханики / В.А. Бабошин, Р.А. Пантелеев, К.Н. Савинов, В.Г. Козловский // Автоматизация процессов управления. 2019. № 4 (58). С. 22–33.
3. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200007489> (дата обращения: 07.02.2020).
4. ГОСТ 33436.4-2-2015. Межгосударственный стандарт. Совместимость технических средств элект-

тромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200126928> (дата обращения: 07.02.2020).

5. Петриковский В.Д. Инциденты информационной безопасности на железнодорожном транспорте // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 6. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19329> (дата обращения: 03.02.2020).

6. Vo T.T. Effect on Power quality of the electric railway traction in distribution power network // Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012, Brno (Czech Republic). November 2012. pp. 13–16.

7. DIN EN 50160/A1-2016 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Характеристики напряжения электроэнергии, подаваемой от общих распределительных сетей. Международный стандарт от 01 февраля 2016. URL: <http://docs.cntd.ru/document/440142049> (дата обращения: 04.02.2020).

8. Quality parameters of electricity supplied to electric railways / J. Altus, M. Novak, A. Otcenasova, M. Pokorny and A. Szlag // Scientific Letters of the University of Žilina – Communications. 2001. V. 2-3. pp. 19–34.

9. ГОСТ 30804.4.3-2013 (IEC 61000-4-3:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104293> (дата обращения: 07.02.2020).

10. Gavrilovic B. Modelling the Harmonic Components of Voltage and Current in Electric Traction Supply System of the «Serbian Railways» // Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE). 2010. V. 3 (1). pp. 77–83.

11. Щербанин Ю.А. Транспорт и транспортная инфраструктура 2030: некоторые прогнозные оценки. URL: <https://docplayer.ru/54133079-Yu-a-shcherbanin-transport-i-transportnaya-infrastruktura-2030-nekotorye-prognozye-ocenki.html> (дата обращения: 01.03.2020).

12. Рекомендуемая практика мониторинга качества электрической энергии. Международный стандарт от 13 июня 2019 г. IEEE 1159-2019. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. URL: <http://docs.cntd.ru/document/561237692> (дата обращения: 10.02.2020).

13. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. URL: <https://standards.ieee.org/standard/519-1992.html> (дата обращения: 10.02.2020).

14. Иванов А.К., Бабосин В.А. Модели формирования специального математического обеспечения АСУ // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 4–14.

REFERENCES

1. Ivanov A.K., Baboshin V.A. Optimalnoe formirovanie konturov upravleniya [Optimal Creation of Control Loops]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2018, no. 4 (54), pp. 4–11.

2. Baboshin V.A., Panteleev R.A., Savinov K.N., Kozlovskii V.G. K voprosu nadezhnosti unifitsirovannogo vosstanovitelnogo kompleksa zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [To the Issue of Reliability of a Unified Restoration Complex of Railway Automation and Telemechanics]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2019, no. 4 (58), pp. 22–33.

3. GOST R 51317.4.5–99 (MEK 61000-4-5–95). *Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Ustoichivost k mikrosekundnym impulsnym pomekham bolshoi energii* [State Standard 51317.4.5–99. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Microsecond High Energy Pulse Disturbance Immunity]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200007489> (accessed 07.02.2020).

4. GOST 33436.4-2–2015. *Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Sistemy i oborudovanie zheleznodorozhnogo transporta* [State Standard 33436.4-2–2015. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Railway Systems and Equipment]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200126928> (accessed 07.02.2020).

5. Petrzikovskii V.D. Incidents informatsionnoi bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte [Railway Incidents Relating to Information Security]. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik* [International Student's Scientific Herald], 2018, no. 6. Available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19329> (accessed 03.02.2020).

6. Vo. T.T. Effect on Power Quality of the Electric Railway Traction in Distribution Power Network. *Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. Brno (Czech Republic), 2012, pp. 13–16.

7. DIN EN 50160/A1–2016. *Kharakteristiki napriazheniya elektroenergii, podavaemoi ot obshchikh raspredelitelnykh setei* [National Standard DIN EN 50160/A1–2016. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/440142049> (accessed 04.02.2020).

8. Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorny M. and Szlag A. Quality Parameters of Electricity Supplied to Electric Railways. *Scientific Letters of the University of Žilina – Communications*, 2001, vol. 2-3, pp. 19–34.

9. GOST 30804.4.3–2013 (IEC 61000-4-3:2006). *Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Ustoichivost k radiochastotnomu elektromagnitnomu poliu* [State Standard 30804.4.3–2013. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Radiated, Radio-Frequency, Electromagnetic Field Immunity]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200104293> (accessed 07.02.2020).

10. Gavrilovic B. Modelling the Harmonic Components of Voltage and Current in Electric Traction Supply System of the Serbian Railways. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2010, vol. 3 (1), pp. 77–83.

11. Shcherbanin U.A. *Transport i transportnaia infrastruktura 2030: nekotorye prognozyne otsenki* [Transport and Infrastructure of 2030. Prediction Estimates]. Available at: <https://docplayer.ru/54133079-Yu-a-shcherbanin-transport-i-transportnaya-infrastruktura-2030-nekotorye-prognozyne-ocenki.html> (accessed 01.03.2020).

12. *IEEE Std. 1159–2019. Rekomenduemaia praktika monitoringa kachestva elektricheskoi energii* [International Standard IEEE 1159-2019. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/561237692> (accessed 10.02.2020).

13. *IEEE Std. 519–1992. International Standard IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Available at: <https://standards.ieee.org/standard/519-1992.html> (accessed 10.02.2020).

14. Ivanov A.K., Baboshin V.A. *Modeli formirovaniia spetsialnogo matematicheskogo obespecheniia ASU* [Models for Creating the Special-Purpose Mathematical Support of Computer-Aided Control Systems]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 2 (56), pp. 4–14.