

УДК 656.259.2

В. И. ГАВРИЛЮК – д.ф.-м.н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, vl.havryliuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478

В. В. МЕЛЕШКО – ПАТ «Українська залізниця» Департамент автоматики та телекомунікацій, soyzuz_at@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478

ОБОСНОВАНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА НА РЕЛЬСОВЫЕ ЦЕПИ

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. Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости ЭЖД со слаботочными линиями автоматики и связи были решены в процессе электрификации железных дорог [1–5]. Однако проблема ЭМС на ЭЖД сохраняет свою актуальность и в настоящее время. Этому способствует широкое применение на магистральном транспорте электроподвижного состава (ЭПС) с асинхронным тяговым приводом (АТП), увеличение скорости движения поездов, внедрение новых микропроцессорных систем управления движением. Новые типы подвижного состава (ПС) перед вводом в эксплуатацию подвергаются испытаниям по определенной программе, которая включает испытания на ЭМС.

Европейские и национальные нормативные документы определяют предельные нормы интерференции для рельсовых цепей и критерии совместимости между подвижным составом и системами определения положения поезда [6–8]. Проблемы, возникающие при испытании новых типов ЭПС на ЭМС, заключаются в следующем.

Большое разнообразие систем электропитания, сигнализации и связи в европейских странах вызывает необходимость проведения испытаний в каждой стране отдельно с учетом особенностей используемых в ней систем, что значительно увеличивает стоимость внедрения новых типов подвижного состава.

Национальными нормативными документами определены предельно допустимые нормы электромагнитных помех, создаваемых ЭПС. В условиях расширения кооперации украинских железных дорог в плане модернизации подвижного состава с использованием асинхронного тягового привода на ЭПС необходимо совершенствование национальной нормативной базы путем гармонизации с европейскими стандартами [9–10].

Национальные нормативные документы по ЭМС ЭПС отличаются от европейских, поскольку ориентированы на отличающиеся по конструкции и параметрам системы сигнализации и связи [9–10]. Это создает дополнительные трудности в плане гармонизации национальных нормативных документов с европейскими. Кроме того, несмотря на то, что нормативные значения допустимых по условиям безопасности помех от подвижного состава в рельсовых цепях, рассчитаны с необходимым запасом, в ряде случаев было отмечено, что при проезде новых типов подвижного состава на отдельных участках железной дороги наблюдались сбои в работе систем сигнализации и связи [10]. Особенно это прояв-

ляется в случае экстремальных условий работы систем автоматики, вызванных изменением сопротивления балласта рельсовых линий, отклонением питающего напряжения от номинального, наличием в фидерной зоне на не большом удалении друг от друга нескольких единиц подвижного состава и т.д. [11].

Проведение экспериментальных исследований для всех видов рельсовых цепей, используемых на железнодорожном транспорте, с реализацией всех возможных ситуаций и сочетанием наиболее неблагоприятных, с точки зрения безопасности, условий их работы, является практически невыполнимой задачей.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является обоснование методики определения уровней опасного и мешающего электромагнитного влияния тягового тока на рельсовые цепи (РЦ) с учетом их схемы, конфигурации, схемы канализации обратного тягового тока и других факторов для выяснения причины и устранения, в случае возникновения, сбоев в работе систем сигнализации на отдельных участках железной дороги при эксплуатации на них новых типов подвижного состава.

Анализ проблемы

Влияние тягового электроснабжения (ТЭС) электрифицированных железных дорог на рельсовые цепи можно упрощенно классифицировать следующим образом. Напряжение на контактом проводе наводит в рельсовой линии электростатические потенциалы относительно земли (электрическое влияние). Однако в силу небольшой емкости между контактным проводом и рельсами и симметрии конфигурации тяговой сети этим влиянием можно пренебречь.

Переменный ток, протекающий в контактной сети при движении поезда, наводит продольную электродвижущую силу (ЭДС), которая вызывает протекание в рельсовых нитях тока (электромагнитное

влияние). Для однопутного участка, вследствие симметрии системы, этим влиянием также можно пренебречь.

Обратный тяговый ток, протекающий по рельсовой линии, оказывает значительное кондуктивное влияние на работу рельсовых цепей. Степень влияния характеризуется значением обратного тягового тока в рельсовой линии на участке подключения аппаратуры приемного конца РЦ.

Распределение обратного тягового тока по длине рельсовой линии, в свою очередь, определяется количеством и расположением электропоездов в фидерной зоне, их энергопотреблением, схемой электропитания (консольная или двухсторонняя), сопротивлением балласта и т.д.

Вторым основным фактором, характеризующим электромагнитное влияние тягового тока на рельсовые цепи, является схема канализации тягового тока (одноточная, двухниточная, расположение межпутных соединителей), сопротивление рельсовых нитей, наличие заземленных на рельсы конструкций. Для двухниточной схемы канализации вводят коэффициент асимметрии тягового тока

$$K_a = \frac{I_{T1} - I_{T2}}{I_{T1} + I_{T2}} = \frac{I_{T1} - I_{T2}}{2I_T}, \quad (1)$$

где I_{T1} , I_{T2} – значения тягового тока, соответственно, в первой и второй рельсовых нитях.

В качестве третьего фактора электромагнитного влияния тягового тока можно выделить наличие в нем гармонических составляющих и их уровень. Относительное содержание в тяговом токе промышленной частоты гармонической составляющей с частотой f характеризуется коэффициентом гармоник

$$K_f = \frac{I_f}{I_{50}}, \quad (2)$$

I_f , I_{50} – значения тока в рельсах при частоте, соответственно, f и 50 Гц.

Степень влияния электромагнитных помех на РЦ определяется также устройствами защиты, примененными в них, а именно путевыми фильтрами, путевыми приемниками и т.д.

Методика исследований

Определение предельно допустимых уровней электромагнитного влияния ТЭС на РЦ проводили как теоретико-расчетными методами, так и путем экспериментальных измерений на действующих лабораторных стендах [10, 12–15].

Для проведения исследований разработана математическая модель и компьютерная программа, позволяющая проводить моделирование электромагнитных процессов в СТЭС и оценивать влияние тягового электроснабжения на рельсовые линии для различной поездной ситуации, при различных условиях и режимах работы рельсовых цепей [10].

Для экспериментальных измерений гармонических помех в рельсовых цепях была разработана методика регистрации мгновенных значений тягового тока в рельсовых линиях и на подвижном составе с последующим спектральным анализом [10]. Регистрацию сигнала, пропорционального току, потребляемому на тягу поезда и на питание вспомогательных устройств, проводили с помощью датчика тока (трансформатора Роговского), к выходу которого подключали измерительный комплекс на основе персонального компьютера и аналого-цифрового преобразователя.

Спектральный анализ проводили методом быстрого преобразования Фурье с применением апробированного программного обеспечения.

Разработанную методику применяли для проведения испытаний электровоза переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями на электромагнитную совместимость с рельсовыми цепями.

Результаты и обсуждение

Для анализа электромагнитных процессов в СТЭС обычно используется теория многопроводных длинных линий [12, 16–18]. Для рассматриваемой в работе системы запишем следующие уравнения [12, 20]:

$$\frac{d\bar{U}}{dx} = |\underline{Z}| \bar{I}, \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{I}}{dx} = |\underline{Y}| \bar{U}, \quad (4)$$

$$\bar{U} = \{\dot{U}_j\}, \quad \bar{I} = \{\dot{I}_j\}, \quad (5)$$

$$|\underline{Z}| = \{\underline{Z}_{ij}\}, \quad |\underline{Y}| = \{\underline{Y}_{ij}\}, \quad i, j = 1 \dots 6,$$

$$\underline{Z}_{ii} = R_i + jX_i = R_i + j\omega L_i,$$

$$\underline{Z}_{ij} = jX_{ij} = j\omega M_{ij},$$

$$\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{10} + \underline{Y}_{12}, \quad \underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{20} + \underline{Y}_{21},$$

$$\underline{Y}_{44} = \underline{Y}_{40} + \underline{Y}_{45}, \quad \underline{Y}_{55} = \underline{Y}_{50} + \underline{Y}_{54},$$

при следующих граничных условиях:

$$U_{AC}(0) = U_{AC0}, \quad U_{DC}(0) = U_{DC0},$$

$$I(L) = I'(L) + I''(L),$$

где \bar{U} , \bar{I} – векторы комплексных напряжений и токов в СТЭС, $|\underline{Z}|$ – матрица комплексных удельных (на единицу длины) продольных сопротивлений линий ($i = j$) и удельных комплексных взаимных сопротивлений между линиями ($i \neq j$). В приведенной модели принята следующая нумерация [12, 20]. Нулевая линия соответствует проводимости земли, первая и вторая линии – рельсовым нитям первого пути, четвертая и пятая линии – рельсовым нитям второго пути (с потенциалами U_1, U_2, U_4, U_5) третья и шестая линии – контактными проводами с потенциалами U_3, U_5 . Комплексные проводимости между рельсовыми нитями и частичные удельные проводимости между каждой рельсовой нитью и землей обозначены для двух путей, соот-

ветственно, в виде Y_{12} , Y_{10} , Y_{20} , Y_{45} , Y_{40} , Y_{50} .

Значения активного и реактивного сопротивлений рельсовой нити для тягового и сигнального токов зависят от значения и частоты тока и приведены в литературе [20–22]. Для расчета собственного активного и реактивного сопротивления рельсов с учетом влияния вихревых токов можно использовать формулы Л. Неймана [23], которые для диапазона тональных частот дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными

$$R = \frac{l}{u} \sqrt{\mu_e \rho \omega} \quad X_l = 0.6 \frac{l}{u} \sqrt{\mu_e \rho \omega},$$

где l – длина проводника, u – периметр его сечения, ρ – удельное сопротивление стали, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, μ_e – магнитная проницаемость рельсовой стали.

Полное погонное (на 1 км длины) сопротивление рельсовой нити можно определить по формуле

$$Z_{ii} = (r_i + r_c) + X_i$$

в которой r_i , X_i – соответственно, активное и реактивное сопротивление рельсовой нити длиной 1 км (без соединителей), r_c – сопротивление рельсовых соединителей на 1 км рельсовой нити. Взаимную индуктивность между двумя рельсами, а также между рельсом и контактным проводом можно определить по известной формуле [1-3]

$$M_{ij} = 10^{-4} \left[1 + 2 \ln \frac{2}{1.78(a-r)\sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right],$$

в которой a – расстояние между проводниками, r – радиус эквивалентного круга с длиной окружности, равной периметру сечения рельса, σ – удельная проводимость земли.

Введем коэффициенты, характеризующие продольную и поперечную асимметрию рельсовой линии

$$K_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{I_1 - I_2}{2I}, \quad (6)$$

$$K_u = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \frac{U_1 - U_2}{2U}, \quad (7)$$

$$K_z = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{2Z}, \quad (8)$$

$$K_Y = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} = \frac{Y_1 - Y_2}{2Y} \quad (9)$$

Преобразуем (3), (4) с учетом (6)–(9)

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = -Z_0 \dot{I} + Z_M \dot{I}_3,$$

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = -Y_0 \dot{U},$$

где $Z_0 = (1 - K_I K_Z) Z$, $Y_0 = (1 + K_U K_Y) Y$.

На основе математического описания системы была разработана компьютерная программа для моделирования распространения помех обратного тягового тока в линиях двухпутного участка железной дороги. Преимуществом компьютерного моделирования является возможность проведения исследований для множества различных конфигураций системы и параметров электромагнитных помех. Экспериментальные исследования выполнены для подтверждения достоверности результатов, полученных при моделировании.

В основу определения предельно допустимых уровней гармонических помех с определенной частотой и фазой в РЦ, вызванных обратным тяговым током, положены критерии надежного выполнения всех режимов работы рельсовых цепей при неблагоприятных для этих режимов факторах.

Невыполнение нормального режима под действием помех приводит к мешающему влиянию, а шунтового и контрольного режимов – к опасному влиянию тягового тока на работу рельсовых цепей.

При компьютерном анализе использовали общепринятые для этих режимов эквивалентные схемы рельсовых цепей в виде

каскадного соединения четырехполюсников.

Анализ проводили путем рассмотрения работы РЦ при наличии в ней суммарного тока, состоящего из сигнального тока i_s и тока гармонической помехи i_p

$$i_0(t) = I_{sm} \sin(\omega_s t + \varphi_s) + I_{pm} \sin(\omega_p t + \varphi_p),$$

где I_{sm} , ω_s , φ_s , I_{pm} , ω_p , φ_p – амплитудные значения, круговая частота и начальная фаза, соответственно, сигнального тока и гармонической помехи. Параметры сигнального тока рассчитывали для самых неблагоприятных условий работы рельсовой цепи в отсутствие помехи. Для определения уровней опасного или мешающего влияния тягового тока проводили вариацию длины РЦ, основных параметров помехи – амплитуды, частоты, фазы при условии контроля напряжения (тока) на путевом приемнике. В процессе анализа определяли уровень помехи, при котором нарушается выполнение режимов работы рельсовых цепей. Критерием опасного или мешающего влияния служило повышение напряжения (тока) путевого приемника до напряжения (тока) его срабатывания в шунтовом и контрольном режимах или понижение напряжения (тока) приемника ниже напряжения (тока) возврата в нормальном режиме.

Параметры аппаратуры приемного и передающего концов РЦ и рельсовой линии брали из справочной литературы [20], соответствующих нормалей, альбомов схем для типового проектирования, а правильность расчетов и моделирования проверялось сравнением результатов вычислений с экспериментальными данными, нормальными, регулировочными таблицами, литературными данными.

Методика исследований для шунтового и контрольного режимов

На входе путевого приемника в шунтовом и контрольном режимах действуют два сигнала, – один соответствует сигнальному току, который не превышает значение тока надежного возврата $I_{НВ}$, а второй – ток помехи. При въезде электропоезда на РЦ возможны два варианта возникновения опасного влияния гармонических помех тягового тока, приводящих к нарушению шунтового или контрольного режимов. В первом случае при въезде локомотива на приемный конец рельсовой цепи под действием гармонических помех тягового тока не произойдет надежного возврата якоря (сектора) путевого реле. Во втором случае возврат якоря (сектора) произойдет, но после этого якорь (сектор) реле снова притянется под действием помехи. Для рельсовых цепей с непрерывным питанием следует рассматривать первый случай, поскольку он реализуется при меньшем уровне помехи (ток отпускания меньше тока срабатывания). Для РЦ с импульсным (кодовым) питанием с точки зрения уровней помехи эти случаи равнозначны.

Для нахождения уровня опасного влияния тягового тока на РЦ использовали следующий порядок анализа при компьютерном моделировании. Вначале определяли минимальное значение напряжения источника питания РЦ в нормальном режиме в отсутствие помехи при самых неблагоприятных условиях для этого режима, при вариации длины рельсовой цепи от минимальной до максимально возможной (по условиям проектирования). Затем определяли значение тока в путевом приемнике в шунтовом и контрольном режимах при отсутствии помехи при самых неблагоприятных для этого режима условиях, т.е. при $[U_{\max}, Z(r_{\min}), r_{i\max} = \infty, P_{\text{ш.крит}}]$ – для шунтового режима,

$[U_{\max}, Z(r_{\min}), r_{\text{и.крит}}, P_{\text{ип.крит}}]$ – для контрольного режима.

После этого проводили анализ изменений тока в путевом приемнике при воздействии на рельсовую цепь гармонической помехи при вариации основных параметров помехи. Коэффициент передачи для разностного тягового тока на приемном конце РЦ при наличии дроссель-трансформаторов рассчитывали с учетом того, что разностный тяговый ток помехи протекает только по одной половине первичной (путевой) обмотки дроссель-трансформатора. В процессе анализа определяли минимальное значение тягового тока на приемном конце РЦ, при котором выполнялись критерии этих режимов, т.е. значение тока в путевом приемнике при наложенном поездном шунте или поврежденной рельсовой нити не превышало значение тока надежного возврата путевого приемника.

Критерий выполнения шунтового режима записывается в виде неравенства для коэффициента шунтовой чувствительности к нормативному поездному шунту

$$K_{\text{шн}} = \frac{I_{\text{нв}}}{I_{\text{ршф}}} \geq 1,$$

где $I_{\text{нв}}$ – ток надежного возврата, соответствующий току надежного отпускания якоря (сектора) реле ($I_{\text{но}}$) для реле с непрерывным питанием или току надежного несрабатывания ($I_{\text{нн}}$) для импульсных реле, $I_{\text{ршф}}$ – фактический ток путевого приемника, протекающий при наложении нормативного шунта в наихудших для шунтового режима условиях.

Критерием выполнения контрольного режима записывается в виде неравенства для коэффициента чувствительности рельсовой цепи к оборванной (поврежденной) рельсовой нити

$$K_{\text{кп}} = \frac{I_{\text{нв}}}{I_{\text{ркф}}} \geq 1,$$

где $I_{\text{ркф}}$ – наибольший возможный ток путевого приемника, протекающий при контрольном режиме в наихудших для этого режима условиях.

Ток надежного отпускания якоря (сектора) реле при непрерывном питании определяется выражением

$$I_{\text{но}} = K_{\text{зо}} I_{\text{о}},$$

где $I_{\text{о}}$ – ток отпускания якоря (сектора) реле, $K_{\text{зо}} < 1$ – коэффициент запаса по отпусканью якоря реле. $K_{\text{зо}} = 0.6$ – для электромагнитных реле, $K_{\text{зо}} = 0.9$ – для индукционных (секторных) реле.

Ток надежного несрабатывания для импульсных реле определяется выражением

$$I_{\text{нн}} = K_{\text{зн}} I_{\text{ср}},$$

где $K_{\text{зн}} = 0.9$ – коэффициент запаса по несрабатыванию реле.

Методика исследований для нормального режима

Нормальный режим реализуется в исправной и свободной от подвижного состава РЦ в виде дискретной информации «Свободно». Нарушение выполнения нормального режима под действием тягового тока может привести к появлению дискретной информации «Занято», т.е. к мешающему воздействию тягового тока на путевой приемник. Это возможно при нарушении правильного (в соответствии с импульсами в кодовых посылках сигнального тока) срабатывания реле, т.е. если в момент кодового импульса уровень напряжения на входе импульсного реле недостаточен для его надежного срабатывания или уровень напряжения в паузе превышает напряжение надежного отпускания якоря реле.

Другим критерием, которому должна удовлетворять РЦ в нормальном режиме, является требование, чтобы фактический коэффициент перегрузки путевого прием-

ника не превышал допустимый коэффициент перегрузки

$$K_{\text{ПЕР.Ф}} \leq K_{\text{ПЕР.Д}}.$$

Методика исследований для режима АЛСН

Критерием надежности режима АЛСН является соотношение

$$K_{\text{Л}} = I_{\text{ЛФ min}} / I_{\text{ЛН}} \geq 1, \quad (9)$$

где $I_{\text{ЛФ min}}$ – фактический минимальный ток в рельсовой линии при наложении поездного шунта на удаленном от генератора сигналов АЛСН конце рельсовой линии и при критическом сочетании для этого режима основных параметров $[U_{\text{min}}, Z, r_{u\text{min}}, p = 0]$, $I_{\text{ЛН}}$ – нормативный ток АЛСН, при котором локомотивный приемник работает устойчиво. Нормативный ток кодовой АЛСН при электротяге переменного тока составляет 1.4 А.

При компьютерном исследовании проводили анализ возможного искажения кодовых посылок за счет наложения помех тягового тока, при которых возможно нарушение критерия выполнения АЛСН [24].

Выводы

Для обоснования методики определения уровней опасного и мешающего электромагнитного влияния тягового тока на рельсовые цепи с учетом их конкретной схемы, конфигурации, с учетом различной поездной ситуации и при различных условиях и режимах работы рельсовых цепей в работе проанализированы основные факторы, которые характеризуют электромагнитное влияние тягового тока на рельсовые цепи. Максимально допустимые значения электромагнитного воздействия тягового тока на рельсовые цепи определяли как теоретико-расчетными методами, так и лабораторными исследованиями. Разработана математическая модель и компьютерная программа, которые позволяют анализировать

электромагнитные процессы в тяговой сети и оценивать влияние тягового тока на рельсовые цепи для различных типов и количестве поездов, условий их режимов. Экспериментальные измерения помех проводили непосредственно на железнодорожных линиях, а также в силовом цепях подвижного состава. В качестве основы для определения максимально допустимых уровней гармонических помех, вызванных обратным тяговым током, были использованы критерии надежной работы рельсовых цепей во всех режимах при наиболее неблагоприятных, по условиям безопасности, факторах.

Библиографический список

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Карякин, Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1967. – 279 с.
3. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
4. Брылеев, А. М. Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, – 1970. – 256 с.
5. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и технологическое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степинский. – М.: Транспорт, 1980. – 295 с.
6. CENELEC CLC/TR 50507. (2005). Railway applications – Interference limits of existing track circuits used on European railways.
7. CENELEC CLC/TS 50238-2, (2010). Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems – Part 2: Compatibility with track circuits. CENELEC prEN 50238-2 (draft, Pr. 15360). (2009). Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems –Part 2: Compatibility with track circuits.
8. CENELEC EN 50388. (2005). Railway applications – Power supply and rolling stock – Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability.
9. Гаврилюк, В. И. Нормы и методы испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 12. С. 48–57.

10. 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 транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5(59). – С. 7–15.
11. Гаврилюк, В. І. Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола / В. І. Гаврилюк, О. В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 73-75.
12. Гаврилюк, В. І. Аналіз електромагнітного впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл // Вісник Дніпропетровського національн. ун-ту ім. В. Лазаряна. 2003. – № 1. С. 3–7.
13. Serdyuk, T. Research of electromagnetic influence of traction current and its harmonics on the rail circuits / T. Serdyuk, V. Gavrilyuk // 17th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility EMC.–Wroclaw (Poland). 2004. – P.260–263.
14. Serdyuk, T. N. Experimental investigation of influence of ac traction current on the rail circuits / T. N. Serdyuk, V. I. Gavrilyuk // Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2005. IEEE 6th International Symposium. – IEEE, 2005. – P. 44–46.
15. Sichenko, V. G. The theoretical and experimental researches of electromagnetic influence from a traction electrosupply system on a railway circuits / V. G. Sichenko, V. I. Gavrilyuk // Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 2005. IEEE 6th International Symposium. – IEEE, 2005. – P. 41–43.
16. Mariscotti, A. Distribution of the traction return current in AC and DC electric Railway Systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18. – No. 4. – P.1422–1432.
17. Bin, Wang. Harmonic power flow calculation for high-speed railway traction power supply system / Bin Wang, Xu Dong Han, Shi Bin Gao // Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT2013). Volume I. Lecture notes in electrical engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P.11–25.
18. Wen, Huang. Study on distribution coefficient of traction return current in high-speed railway / Wen Huang, Zhengyou He, Haitao Hu, Qi Wang // Energy and Power Engineering. – 2013. – No 5. – P. 1253-1258.
19. Navryliuk, V. I. Modeling of the traction current harmonics distribution in rails // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2017. – № 13.
20. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, М. Ф. Котляренко, А. И. Баженов. М.: Транспорт, 1982. – 360 с.
21. Gavrilyuk, V. I. The comparative analysis of main calculation methods of matrix elements' impedance of 1520 mm rail track gauge in audio frequency range. – Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2014. – № 7. – С. 44-51.
22. Сиченко, В. Г. Электроживлення систем залізничної автоматики / В. Г. Сиченко, В. І. Гаврилюк.–Д.: Видавництво Маковецький, 2009. – 372 с.
23. Нейман, Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Л. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 220 с.
24. Gavrilyuk, V. To the question about checking parameters of code current of rail circuit / V. Gavrilyuk, T. Serdyuk // Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska. – 2003. – P. 127–135.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, рейкові кола, рухомий склад, тяговий струм.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, рельсовые цепи, подвижной состав, тяговый ток.

Keywords: electromagnetic compatibility, track circuits. rolling stock, traction current.

Рецензенти:

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

Надійшла до редколегії 17.10.2017.
Прийнята до друку 27.10.2017.