

В. И. ГАВРИЛЮК (ДНУЖТ)

Кафедра автоматики, телемеханики и связи, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днипро, Украина, 49010, тел.: (056) 793-15-04, эл. почта: vl.havryliuk@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9914-5733

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБРАТНОГО ТЯГОВОГО ТОКА В РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

Введение

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости тягового электроснабжения с линиями железнодорожной автоматики достаточно полно проанализирована во многих научных публикациях [1-6]. Обеспечение электромагнитной совместимости электрифицированных железных дорог со слаботочными линиями сигнализации и связи решались по мере их электрификации путем совершенствования уменьшения помех от тягового электроснабжения и повышением степени помехозащищенности устройств автоматики и связи. Однако сбои в работе путевых и локомотивных устройств сигнализации под действием помех тягового тока в настоящее время не единичны. Одной из причин наблюдаемых сбоев в работе рельсовых цепей (РЦ) является введенные в эксплуатацию в последнее время новые типы подвижного состава с асинхронным тяговым приводом и импульсным регулированием, которые генерируют в цепи обратного тягового тока широкополосные электрические помехи, попадающие в диапазон рабочих частот рельсовых цепей. При вводе в эксплуатацию новых типов электрического подвижного состава (ЭПС) в процессе испытаний проводят измерения генерируемых ими электромагнитных помех. Такие испытания проводят на одном локомотиве, в то время как в процессе эксплуатации возможно обращение одновременно нескольких локомотивов на участке. Измерить помехи от нескольких локомотивов при всех режимах их работы, предусмотренных нормативной документацией, а также с учетом влияния возможных неблагоприятных внешних факторов, практически невозможно. Для проведения таких исследований используют компьютерное моделирование. В качестве исходной информации при моделировании применяют реальные значения помех, измеренные в процессе полевых испытаний подвижного состава. Методика и результаты испытаний ЭПС на ЭМС с рельсовыми цепями рассмотрены автором в предыдущих работах [5,7-9].

Целью настоящей работы является разработка математической модели и проведение моделирования распределения гармоник тягового тока в рельсовых линиях, генерируемых электроподвижным составом для двухпутного участка железной дороги.

Математическая модель

В качестве базовой системы для построения модели взят двухпутный участок железной дороги с тяговыми подстанциями, расположены на расстоянии 15...20 км для электроснабжения постоянным током (напряжением 3 кВ) и 40..60 км для переменного тока (25 кВ). Координаты локомотивов на первом и втором путях обозначили, соответственно x_{1j} и x_{2j} ($i = 1..N_1$, $j = 1..N_2$). Тяговая сеть для каждого пути включала контактный провод, несущий трос и два рельса, электрически соединенные между собой и с землей через сопротивление изоляции балласта [1,2]. Для описания такой системы обычно применяют теорию многопроводных линий с распределенными параметрами [8]. Система не является продольно однородной вследствие подключенной к линиям аппаратуры рельсовых цепей и локомотивов. В соответствие с этим, эквивалентная схема системы тягового электроснабжения представлена в виде последовательно включенных многополюсников, представляющих однородные участки линий, и двухполюсников, включенных между ними, которые представляли аппаратуру рельсовых цепей и локомотивы, подключенные между контактным проводом и рельсами [8]. Контактную сеть, состоящую из контактного провода и несущего троса, на эквивалентной схеме представили одним проводом с эквивалентным погонным (на единицу длины – н.е.д.) полным сопротивлением [1]

$$\underline{Z}_{KM} = \frac{\underline{Z}_K \underline{Z}_T - \underline{Z}_{KT}^2}{\underline{Z}_K + \underline{Z}_T - 2\underline{Z}_{KT}}, \quad (1)$$

где Z_K , Z_T – соответственно, полное сопротивление (н.е.д.) контактного провода и несущего троса, Z_{KT} – взаимное полное сопротивление (н.е.д.) между контактным проводом и несущим тросом.

Двухпутный участок тяговой сети между рассмотренными неоднородностями представлен на эквивалентной схеме многопроводной системой, в которой для каждого пути линии соответствовали двум рельсам и одному проводу, эквивалентному контактной сети. [1,8]. Для линий на эквивалентной схеме использовали следующую нумерацию: индексы 1, 2 соответствовали рельсовым линиям первого пути, 3,4 – рельсовым линиям второго пути, 5, 6 – контактной сети первого и второго пути, 0 – эквивалентная линия, соответствующая проводимости земли. Рассматриваемая многопроводная система является системой с распределенными параметрами вследствие перераспределения электрической энергии между линиями из-за наличия проводимости между рельсами и землей и взаимной индуктивной связи между проводами.

В соответствии с принятой эквивалентной схемой токи и напряжения на выводах двухполюсников и многополюсников рассчитывали методом узловых потенциалов.

Для нахождения распределения токов и напряжений в многопроводной линии были составлены уравнения. Продольный импеданс линий (н.е.д.) и поперечный адмитанс между линиями (н.е.д.) записали в виде прямоугольных матриц. Диагональный элемент матрицы импедансов Z_{ii} соответствовал собственному импедансу i -й линии (н.е.д.), а недиагональные элементы Z_{ij} взаимному импедансу между i и j линиями (н.е.д.). Очевидно $Z_{ij} = Z_{ji}$ вследствие симметрии системы. Собственный импеданс линии включает в себя три компонента: внутренний импеданс линии Z_{Cii} , внешний импеданс линии Z_{Eii} и импеданс, вносимый землей Z_{Gii} [10-12]

$$Z_{ii} = Z_{Cii} + Z_{Eii} + Z_{Gii} \quad (2)$$

Внутренний импеданс рельсовой линии Z_{Cii} ($i=1,2,4,5$) (н.е.д.) определяли с учетом скин-эффекта в рельсовой стали [10]

$$Z_{Cii}(\omega) = R_{Cii}'(T) + R_{Cii}''(\omega) + jX_{Cii}(\omega) \quad (3)$$

где $R_{Cii}'(T)$ активное сопротивление рельсовой нити при заданной температуре [13]

$$R_{Cii}''(\omega) = \frac{1}{u} \sqrt{\mu_0 \mu_s \rho_s \omega} \quad (4)$$

$$X_{Cii} = \frac{0.6}{u} \sqrt{\mu_0 \mu_s \rho_s \omega} \quad (5)$$

в которых μ_s и ρ_s , соответственно, магнитная проницаемость и удельная проводимость рельсовой стали, u – эквивалентный периметр сечения рельса.

Выражение для собственного импеданса i -й линии Z_{Gii} и взаимного импеданса между i и j линиями Z_{Gij} в присутствии земли как обратного провода получено Карсоном [10]:

$$Z_{Gii} = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) + Z'_{Gii} \quad (6)$$

$$Z_{Gij} = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{\sqrt{(h_i + h_j)^2 + d_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i - h_j)^2 + d_{ij}^2}}\right) + Z'_{Gij} \quad (7)$$

$$Z'_{Gii} = \frac{j\omega\mu}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(-2h_i\xi)}{\xi + \sqrt{(\xi^2 + j\omega\mu\sigma)}} d\xi \quad (8)$$

$$Z'_{Gij} = \frac{j\omega\mu}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp[-(h_i + h_j)\xi]}{\xi + \sqrt{(\xi^2 + j\omega\mu\sigma)}} \cos(\xi d_{ij}) d\xi$$

в которых h_i, h_j – высота подвеса i и j проводов над поверхностью земли, r_i – радиус провода, d_{ij} – расстояние по горизонтали между проекциями i и j линий, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, μ_0 – магнитная постоянная. Выражения Карсона для Z'_{Gii} и Z'_{Gij} включают в себя бесконечные интегралы с комплексными аргументами. Для их приблизительного определения было предложено использовать разложения в бесконечные ряды с ограничением числа членов ряда. Такая оценка используется в большинстве работ, но она не обеспечивает достаточной точности. В настоящей работе применена аппроксимация, предложенная в работе [11] для собственного и взаимного импеданса проводников,

расположенных над поверхностью земли как обратного провода, имеющего удельную проводимость σ

$$Z_{Gii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{2(h_i + p)}{r_i} \right] \quad (9)$$

$$Z_{Gij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(h_i + h_j + 2p)^2 + d_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i - h_j)^2 + d_{ij}^2}} \right) \quad (10)$$

где p – комплексная глубина слоя земли, в котором протекает обратный ток, $p = (j\omega\mu_0\sigma)^{-1/2}$.

В соответствии с принятой индексацией линий \underline{Y}_{i0} ($i=1..6$) – адмитанс (н.е.д.) между i -й линией и землей, а \underline{Y}_{ij} ($i, j=1..6$) – адмитанс (н.е.д.) между i и j линиями. Диагональные элементы матрицы импедансов \underline{Y}_{ii} ($i=1..4$) равны сумме полных проводимостей между i -м рельсом и всеми остальными рельсами, а также между i -м рельсом и землей:

$$\underline{Y}_{ii} = \sum_{j=0}^4 \underline{Y}_{ij} \quad (11)$$

Учитывая, что в нормальном режиме адмитанс (н.е.д.) между контактным проводом и рельсами пренебрежимо мал, соответствующие компоненты матрицы адмитансов приравняем нулю $\underline{Y}_{5i} = \underline{Y}_{i5} = 0$, $\underline{Y}_{6i} = \underline{Y}_{i6} = 0$ ($i=1..4$). Для синусоидального тока в стационарном режиме уравнения для распространения гармоник тягового тока частотой f в рельсовых линиях описывается известными из теории многопроводных линий передач дифференциальными уравнениями в матричном виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \dot{V}(f, x) = -\underline{Z} \dot{I}(f, x), \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \dot{I}(f, x) = -\underline{Y} \dot{V}(f, x), \quad (13)$$

где $\dot{V}(f, x)$ – вектор комплексного напряжения гармоник частотой f между линией и землей, $\dot{I}(f, x)$ – вектор комплексного тока частотой f в линиях.

В качестве граничных условий взяты напряжения на шинах тяговой подстанции для двух путей \dot{V}_1, \dot{V}_2 :

$$\dot{V}(x=0) = \dot{V}(x=D_1) = \dot{V}_1 \text{ – для первого пути,}$$

$$\dot{V}(x=0) = \dot{V}(x=D_2) = \dot{V}_2 \text{ – для второго пути,}$$

а также токи локомотивов $\dot{I}_k(x_{ki})$ (где индекс k соответствует номеру пути ($k=1,2$) а x_{ki} – координате локомотива):

На основе предложенной математической модели разработана компьютерная программа и проведено моделирование распределения гармоник тягового тока вдоль рельсовых линий от нескольких локомотивов обращающихся в фидерной зоне. В качестве варьируемых параметров системы взяты расстояния между тяговыми подстанциями двух путей D_1, D_2 , количество локомотивов на двух путях N_{T1}, N_{T2} ,

координаты локомотивов x_{1i}, x_{2j} , тяговые токи и коэффициенты гармоник тока локомотивов, сопротивления изоляции рельсовых линий, коэффициент асимметрии рельсовой линии. Для общности постановки задачи предусмотрена возможность задания различных значений расстояний между подстанциями для двух путей, а также возможность использования разного рода тяговых токов на путях. Для моделирования распространения гармоник тягового тока от испытуемых локомотивов в качестве коэффициента гармоник брали значения, полученные при испытаниях локомотива. Коэффициент гармоник определяли по известному вы-

ражению $K_f = I_f / I_o$, где I_o – тяговый ток, I_f – ток гармоники частотой f . Разработанная модель использовалась при исследовании распространения гармоник тягового тока от локомотива переменного тока с асинхронным тяговым двигателем.

Результаты

Разработанную модель применили при проведении испытаний новых типов подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на электромагнитную совместимость с рельсовыми цепями [5]. В настоящей работе для иллюстрации приведены результаты моделирования для одного случая – исследования распространения гармоники обратного тягового тока частотой 25 Гц в рельсовой линии при различном количестве локомотивов (от одного до пяти с мгновенными координатами 6, 13, 20, 27, 34 км), обращающихся в пределах фидерной зоны, для тяги переменного тока (50 Гц, 25 кВ) и длине межподстанционной

зоны 40 км. Токи всех локомотивов приняты равными 100 А, а коэффициент гармоник на частоте 25 Гц $K_f = 10^{-2}$. Проводимость земли S_g принимали изменяющейся в пределах $10^{-2} \dots 10^{-3}$ См/км.

Максимальные значения тока гармонических помех наблюдались вблизи отсасывающего фидера тяговой подстанции, поэтому результаты моделирования представлены для участка межподстанционной зоны для координаты x изменяющейся от 0 до 6 км, то есть для участка между подстанцией и первым локомотивом. Зависимость действующего значения тока гармоники частотой 25 Гц в обратной тяговой сети от координаты x на участке $x = 0..6$ км при разных значениях сопротивления земли S_g для одного, двух и пяти локомотивов в фидерной зоне с координатами, соответственно, 6, 13, 20, 27 и 34 км представлены на (рис. 1).

Из полученных результатов видно, что ток гармонической помехи частотой 25 Гц в обратной тяговой сети увеличивался при уменьшении сопротивления земли S_g , а также при увеличении количества локомотивов в фидерной зоне.

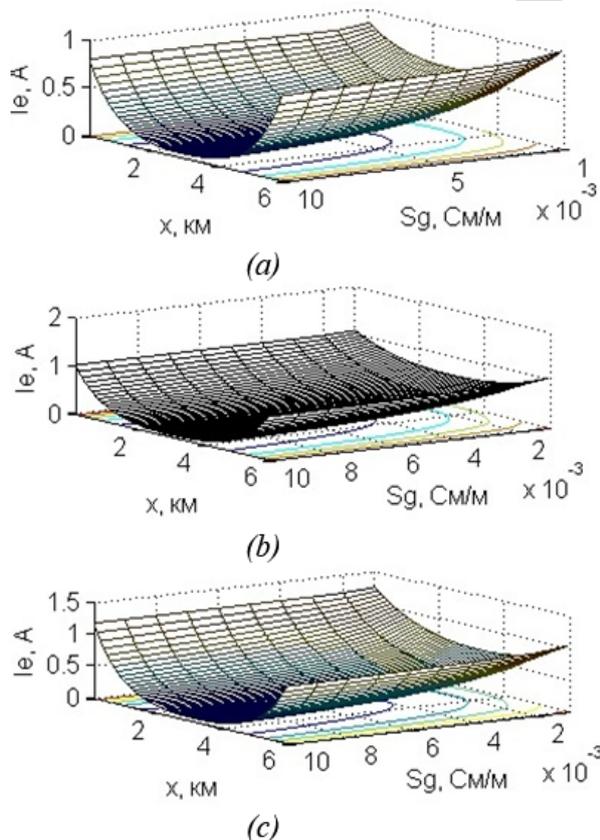


Рис. 1. Зависимость тока гармоник частотой 25 Гц в рельсовой линии от координаты x при разных значениях сопротивления земли S_g для одного (a), двух (b) и пяти локомотивов (c)

Ток гармоник частотой 25 Гц в рельсовой линии вблизи подключения отсасывающего фидера тяговой подстанции ($x = 0$) при одном локомотиве не превышал предельное значение, равное 1 А, даже при наиболее неблагоприятных значениях сопротивления земли $S_g = 10^{-3}$ См/км. При увеличении количества локомотивов в фидерной зоне ток увеличивался до 1.073 А (при двух локомотивах) и до 1.233 А (при пяти локомотивах), что превышало предельное значение тока помех частотой 25 Гц в рельсовой линии. Аналогичные результаты наблюдались для гармонических помех, генерируемых локомотивами на частотах работы тональных рельсовых цепей (420, 480, 580, 720, 780 Гц) [14].

Выводы

Разработана математическая модель, описывающая распределение гармоник тягового тока в рельсовой линии двухпутного участка железной дороги при нескольких локомотивах, обращающихся в фидерной зоне. Эквивалентная схема тяговой сети представлена в виде последовательно соединенных многополюсников, соответствующих продольно однородным участкам тяговой сети, и двухполюсников, соответствующих локальным неоднородностям тяговой сети (в виде аппаратуры РЦ и локомотивов). Уравнения для токов и напряжений в однородных по длине участках тяговой сети представлены в виде системы уравнений для многопроводных линий в матричном виде. Локомотивы в модели представлены эквивалентной схемой в виде генераторов тока гармонических помех. На основе математической модели разработана компьютерная программа и проведено моделирование распространения гармоник тягового тока частотой 25 Гц в обратной тяговой сети в зависимости от числа локомотивов в фидерной зоне. Получено, что ток гармонической помехи частотой 25 Гц в обратной тяговой сети увеличивался при уменьшении сопротивления земли S_g до 10^{-3} См/км, а также при увеличении количества локомотивов в фидерной зоне. Ток гармоник частотой 25 Гц в рельсовой линии вблизи подключения отсасывающего фидера тяговой подстанции ($x = 0$) при одном локомотиве не превышал предельное значение, равное 1 А, даже при наиболее неблагоприятных значениях сопротивления земли $S_g = 10^{-3}$ См/км. При увеличении количества локомотивов в фидер-

ной зоне ток увеличивался до значений, превышающих предельное значение тока помех частотой 25 Гц в рельсовой линии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. -М.: Транспорт, 1982.- 528 с.
2. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость.-М.: УМК МПС, 2002.- 638 с.
3. Косарев, А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока.- Москва. Интекст, 2004.- 272 с.
4. Анохов, І.В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих ліній постійного струму / І. В. Анохов, М. П. Бадьор, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Залізничний транспорт України. – 2000. –№ 2. – С. 10-12.
5. 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 и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2015. – №. 5 (59)). – С. 7-15..
6. Hill, R. J. Electric railway traction. Part 6: Electromagnetic compatibility disturbance-sources and equipment susceptibility //Power Engineering Journal. – 1997. – Т. 11. – №. 1. – Р. 31-39.
7. Гаврилюк, В. И. Международные нормы на электромагнитную совместимость подвижного состава с системами сигнализации и связи // Українська залізниця. – 2017.– № 5–6 (47–48), С. 46-50.
8. Гаврилюк, В.І. Аналіз впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл / В. І. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 2. С. 37-39.
9. Gavrilyuk, V. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnyj //Archives of Transport System Telematics. – 2010. – Т. 3. – Р. 14-18.
10. Carson, J. R., Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Technical Journal.-1926.- Vol. 5.- p. 539-554.
11. Deri, A. The complex ground return plane: a simplified model for homogeneous and multilayer earth return / A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. 100(8). – Р. 3686-3693.
12. Havryliuk, V. I. Electrical impedance of traction rails at audio frequency range / V. I. Havryliuk, V. V. Melesko //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – №. 2. – С. 31-36.
13. Нейман, Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах.- ГЭИ. Ленинград-Москва, 1949.- 220 с.
14. Гаврилюк, В. І. Ймовірнісна модель впливу тягового струму на рейкові кола / В. І Гаврилюк., О. В.

REFERENCES

1. Markvardt, K. G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovanykh zheleznykh dorog* [Electrosupply of electrified railways] – Moscow. Transport Publ, 1982. – 528 p.
2. Bader, M. P. *Electromagnitnaja sovmestimost* [Electromagnetic compatibility] – Moscow. UMK MPS, 2002. – 638 p.
3. Kosarev, A. B. *Osnovy teorii elektromagnitnoy sovmestimosti sistem tiagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Fundamentals of the theory of electromagnetic compatibility of traction power supply systems of alternating current] – Moscow. Intekst Publ., 2004.- 272 p.
4. Anokhov, I.V. *Pro elektromagnitnu sumishnist elektrifikovanykh liniy postijnogo strumu* [About electromagnetic compatibility of electrified lines of direct current] / I. V. Anokhov, M. P. Bader, V. I. Havryliuk, V. G. Sychenko // *Zaliznychnyi transport Ukrainy* – Railway transport of Ukraine. – 2000. –№ 2. – P. 10-12.
5. Havryliuk, V. I. *Ispytaniya novykh tipov podvizhnogo sostava ns elektromagnitnuju sovmestimost s ustrojstvami signalizatsii i svyazi* [Tests of new types of rolling stock on electromagnetic compatibility with signaling and communication devices] / V. I. Havryliuk, V. I. Shcheka, V. V. Meleshko // *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transport* – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 5 (59). – P. 7-15.
6. Hill, R. J. Electric railway traction. Part 6: Electromagnetic compatibility disturbance-sources and equipment susceptibility //Power Engineering Journal. – 1997. – Т. 11. – №. 1. – Р. 31-39.
7. Havryliuk, V. I. *Mezhdunarodnyje normy na elektromagnitnuju sovmestimost podvizhnogo sostava s sistemami signalizatsii i svyazi* [International standards on the electro-magnetic compatibility of rolling stock with signaling and communication systems] // *Ukrainska zaliznytsia* – Ukrainian railway. – 2017.– № 5–6 (47–48), P. 46-50.
8. Havryliuk, V. I. *Analiz vplyvu tiagovogo elektropostachania na robotu rejkovykh kil* [Analysis of the influence of traction power on the work of rail circles] / V. I Havryliuk, A. V. Zavgorodnyj // *Zaliznychnyi transport Ukrainy* – Railway transport of Ukraine. – 2005. – № 2. P. 37-39.
9. Gavrilyuk, V. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnyj //Archives of Transport System Telematics. – 2010. – Т. 3. – Р. 14-18.
10. Carson, J. R., Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Technical Journal.-1926.- Vol. 5.- p. 539-554.
11. Deri, A. The complex ground return plane: a simplified model for homogeneous and multilayer earth return / A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. 100(8). – Р. 3686-3693.

Завгородний // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – №. 4. – С. 73-75.

Поступила в печать 17.05.2017.

12. Havryliuk, V. I. Electrical impedance of traction rails at audio frequency range / V. I. Havryliuk, V. V. Melesko // *Informatsijno-keryjtychi systemy na zaliznitchnomu trahsporti* – Information and control systems on the railway transport. – 2015. – No. 2. – P. 31-36.

13. Nejnman, L.R. Poverkhnostnyj effect v feromagnitnykh telakh.- GEI. Leningrad-Moscow, 1949.- 220 p.

14. Havryliuk, V. I. *Jmovirnisna model vplyvu tiagovogo strumu na rejkivi kola* [Probabilistic model of the impact of the traction current on the rail circle] / V. I. Havryliuk, A. V. Zavgorodnyj // *Informatsijno-keryjtychi systemy na zaliznitchnomu trahsporti* – Information and control systems on the railway transport. – 2010. – No. 4. – P. 73-75.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Коваленко А. В.*

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости тягового электроснабжения с линиями железнодорожной автоматики является актуальной, и одной из причин этого является введенные в эксплуатацию в последнее время новые типы подвижного состава с асинхронным тяговым приводом и импульсным регулированием.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и проведение моделирования распределения гармоник тягового тока в рельсовых линиях, генерируемых электроподвижным составом для двухпутного участка железной дороги.

Математическая модель разработана на основе представления тяговой сети в виде последовательно соединенных многополюсников, соответствующих продольно однородным участкам тяговой сети и двухполюсников, соответствующих локальным неоднородностям тяговой сети. Уравнения для токов и напряжений в однородных по длине участках тяговой сети представлены в виде системы уравнений для многопроводных линий в матричном виде. В результате моделирования получено, что ток гармонической помехи частотой 25 Гц в обратной тяговой сети увеличивался при уменьшении сопротивления земли до 10^{-3} См/км, а также при увеличении количества локомотивов в фидерной зоне. При сочетании неблагоприятных условий ток от трех и более локомотивов в фидерной зоне превышал предельное значение тока помех частотой 25 Гц в рельсовой линии.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; тяговая сеть; гармоники обратного тягового тока; рельсовые линии.

УДК 621.331:621.332

В. І. ГАВРИЛЮК (ДНУЗТ)

Кафедра автоматики, телемеханіки та зв'язку, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, Україна, 49010, тел.: (056) 793-15-04, ел. пошта: vl.havryliuk@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9914-5733

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЗВОРОТНОГО ТЯГОВОГО СТРУМУ В РЕЙКОВІЙ ЛІНІЇ

Проблема забезпечення електромагнітної сумісності тягового електропостачання з лініями залізничної автоматики є актуальною, і однією з причин цього є введені в експлуатацію останнім часом нові типи рухомого складу з асинхронним тяговим приводом і імпульсним регулюванням.

Метою цієї роботи є розробка математичної моделі і проведення моделювання розподілу гармонік тягового струму в рейкових лініях, що генеруються електрорухомим складом, для двоколійного ділянки залізниці.

Математична модель розроблена на основі представлення тягової мережі у вигляді послідовно з'єднаних багатополісників, відповідних поздовжньо однорідним ділянкам тягової мережі і двухполісників, відповідних до локальних неоднорідностей тягової мережі. Рівняння для струмів і напруг в однорідних по довжині ділянках тягової мережі представлені в вигляді системи рівнянь для багатопровідних ліній в матричному вигляді. В результаті моделювання отримано, що струм гармонійної завади частотою 25 Гц в зворотній тяговій мережі збільшувався при зменшенні опору землі до 10^{-3} См / км, а також при збільшенні кількості локомотивів в фідерній зоні. При поєднанні несприятливих умов струм від трьох і більше локомотивів в фідерній зоні перевищував граничне значення струму завад частотою 25 Гц в рейковій лінії

Ключові слова: електромагнітна сумісність; тягова мережа; гармоники зворотного тягового струму; рейкові лінії.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Коваленко О. В.*

© Гаврилюк В. І., 2017

UDC 621.331:621.332

V. I. HAVRYLIUK (DNURT)

Department of "Automatics, telemechanics and communication", Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-15-04, e-mail: vl.havryliuk@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9914-5733

THE MODELLING OF RETURN CURRENT DISTRIBUTION IN RAIL LINE

Ensuring of electromagnetic compatibility of traction power supply system with track circuits is actual problem, and one of the reasons of this is the wide using of the new types of rolling stock with asynchronous traction drive and pulse regulation.

The purpose of this work is to develop a mathematical model and provide on it base the simulation of the distribution of traction current harmonics in rail lines generated by an electric vehicle.

The mathematical model is developed on the basis of the representation of the traction network in the form of consequently connected multipoles, corresponding to the longitudinally homogeneous sections of the traction network and the two-ports corresponding to the local inhomogeneities of the traction network. Equations for currents and voltages in homogeneous length sections of the traction network are represented as a system of equations for multiconductor lines in a matrix form. As a result of the simulation, it was found that the current of harmonic interference at a frequency of 25 Hz in the rails increased with decreasing earth resistance to 10^{-3} Sm/km, and also with an increasing in the number of locomotives in the feeder zone. With a combination of unfavorable conditions, the current from three or more locomotives in the feeder zone exceeded the limiting value of the interference current at a frequency of 25 Hz in the rail line.

Keywords: electromagnetic compatibility; traction network; harmonics of reverse traction current; rail lines.

Internal reviewer *Sychenko V. G*

External reviewer *Kovalenko A.V.*