

УДК 621.332.23

Зависимость потенциала на рельсах от сопротивления заземляющего устройства тяговой подстанции и параметров рельсовой линии

М. В. Башаркин

Приволжский государственный университет путей сообщения, Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, 2в

Для цитирования: Башаркин М. В. Зависимость потенциала на рельсах от сопротивления заземляющего устройства тяговой подстанции и параметров рельсовой линии // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 24–33. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-24-33

Аннотация

Цель: провести анализ зависимости потенциала на рельсах от координаты пути в условиях различных значений проводимости заземляющего устройства тяговой подстанции ($g_0 = 0 \text{ См}, 10 \text{ См}, 25 \text{ См}, 50 \text{ См}$). **Методы:** анализ производился на разработанной схеме замещения участка тяговой рельсовой сети (ТРС) с помощью метода узловых потенциалов. Расчет реализован в математическом пакете Mathcad 15. Выбор исходных данных осуществлен с учетом значений, установленных в действующей нормативной документации. **Результаты:** разработана эквивалентная схема замещения тяговой рельсовой сети на двухпутном участке, в которой каждый однородный участок рельсовой линии заменяется эквивалентным П-образным четырехполюсником. Это позволяет преобразовать электрическую цепь с распределенными параметрами в цепь с сосредоточенными параметрами. При необходимости имитации на участке поперечной либо продольной асимметрии тягового тока такой участок замещается трехпроводной схемой замещения, в которой учитывается земляной провод. Для повышения точности результатов моделирования учтены междупутные перемычки, а число узловых потенциалов увеличено до 7. Установлено, что наибольшее по модулю значение напряжения на рельсах наблюдается вблизи тяговой подстанции. Определено, что при увеличении проводимости заземляющего устройства величина напряжения на рельсах вблизи тяговой подстанции уменьшается. **Практическая значимость:** определены значения потенциала «рельс — земля» при различных значениях проводимости заземляющего устройства тяговой подстанции для путей обоих направлений движения — четного и нечетного путей. Установлено значение проводимости заземляющего устройства тяговой подстанции, при котором нахождение персонала на рельсах вблизи тяговой подстанции безопасно. Полученные результаты могут быть рекомендованы к практическому использованию на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: тяговая рельсовая сеть, рельсовая линия, потенциал на рельсах, заземляющее устройство, тяговый ток

Существующие методики определения тягового тока в ТРС основаны на использовании метода наложения. Такой подход не обеспечивает высокую точность расчета, поскольку такие параметры рельсовой линии (РЛ), как сопротивление рельсовых нитей (РН), сопротивление изоляции РЛ, считаются неизменными на протяжении всего участка ТРС [1]. Для повышения надежности функционирования систем интервального регулирования движения поездов в условиях тяжеловесного движения, особенно на участках со сложным профилем пути, следует

разработать новые методики расчета тягового тока в ТРС, в которых учитываются все элементы ТРС, включая междупутные перемычки, состояние заземляющих устройств, неоднородность первичных параметров РЛ [2, 3].

Для проведения расчетов представим ТРС в виде нескольких однородных участков. Каждый такой участок заменим линейным многополюсником. При необходимости имитации на участке поперечной либо продольной асимметрии тягового тока, вследствие отказа сборного токопроводящего рельсового стыка (СТРС) или излома рельса, такой участок замещается трехпроводной схемой замещения, в которой учитывается земляной провод. Следует заметить, что благодаря применению такой модели появляется возможность определения коэффициента асимметрии тягового тока, значение которого нормируется исходя из требований обеспечения электромагнитной совместимости с рельсовыми цепями. На участках железных дорог, электрифицированных переменным током, значение коэффициента асимметрии не должно превышать 4 %, а при электротяге постоянного тока 6 %.

Для расчета тягового тока в ТРС две РН железнодорожного пути представим одним проводом, удельное сопротивление примем равным $R_{рн} = 0,15$ мОм/км, поскольку удельное сопротивление РН постоянному току для новых рельсов типа Р65 при температуре 20 °С $R_p = 25,2$ мОм/км, а при их износе достигает значения 30 мОм/км [4]. По существующим нормативам сопротивление СТРС не должно превышать 200 мкОм, а продольное сопротивление ТРС за счет СТРС не должно увеличиваться более чем на 20 % проектного значения [5, 6].

На рис. 1 показана дискретная модель элементарного участка РЛ для учета поперечных распределенных параметров, включая сопротивление опор контактной сети (КС) r_{00} , к которым подсоединяется один из рельсов. Сопротивления r_{10} , r_{20} — переходные электрические сопротивления «рельс — земля» для 1 и 2 РН соответственно, сопротивление r_{12} характеризует электрическое сопротивление току утечки, протекающему между РН.

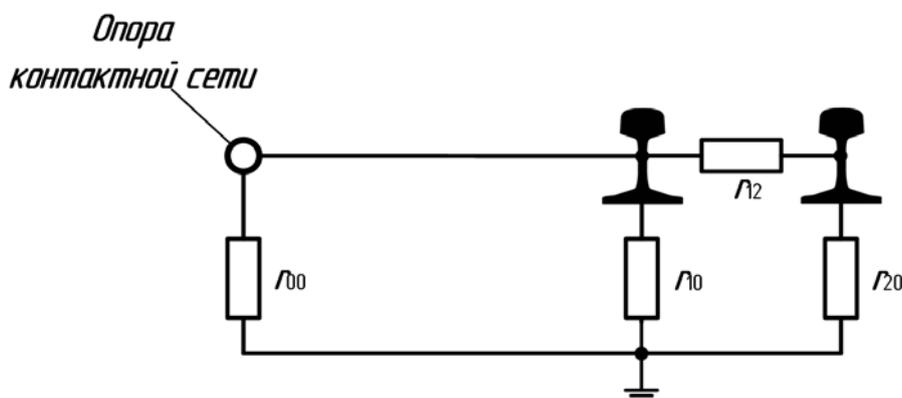


Рис. 1. Элементы гальванической связи между РЛ и землей

Удельные проводимости изоляции РЛ для тягового тока g_t и сигнального тока g_s в общем случае являются нелинейными функциями тока и представляют собой различные величины, поскольку сигнальный ток в двухниточных цепях протекает по рельсовой петле. В линейном приближении эти проводимости выражаются формулами:

$$g_t = g_1 + g_2, \quad (1)$$

$$g_s = g_{12} + \frac{g_1 \cdot g_2}{g_1 + g_2}, \quad (2)$$

где $g_1 = \frac{1}{r_{00}} + \frac{1}{r_{10}}$ — совокупная проводимость опор КС и изоляции первой РН;

$g_2 = \frac{1}{r_{20}}$ — проводимость изоляции второй РН;

$g_{12} = \frac{1}{r_{12}}$ — проводимость изоляции шпал и верхнего слоя балласта.

Наиболее нестабильным параметром является удельная проводимость утечки (изоляции) РЛ. Она зависит, в частности, от удельного сопротивления грунта, которое может меняться в диапазоне от 50 Ом·м до 3000 Ом·м.

Согласно ГОСТ 9.602–2016 переходное удельное сопротивление «рельс — земля» должно быть не менее 0,25 Ом·км, соответственно, удельная проводимость изоляции для тягового тока должна составлять не менее 0,056 См/км [5]. В европейском стандарте EN 50122-1:2022 для перегонов с бетонными шпалами используется более узкий диапазон 0,4..1,7 См/км [7]. На рис. 2 представлен пример расчетной схемы двухпутного участка тяговой сети с односторонним питанием.

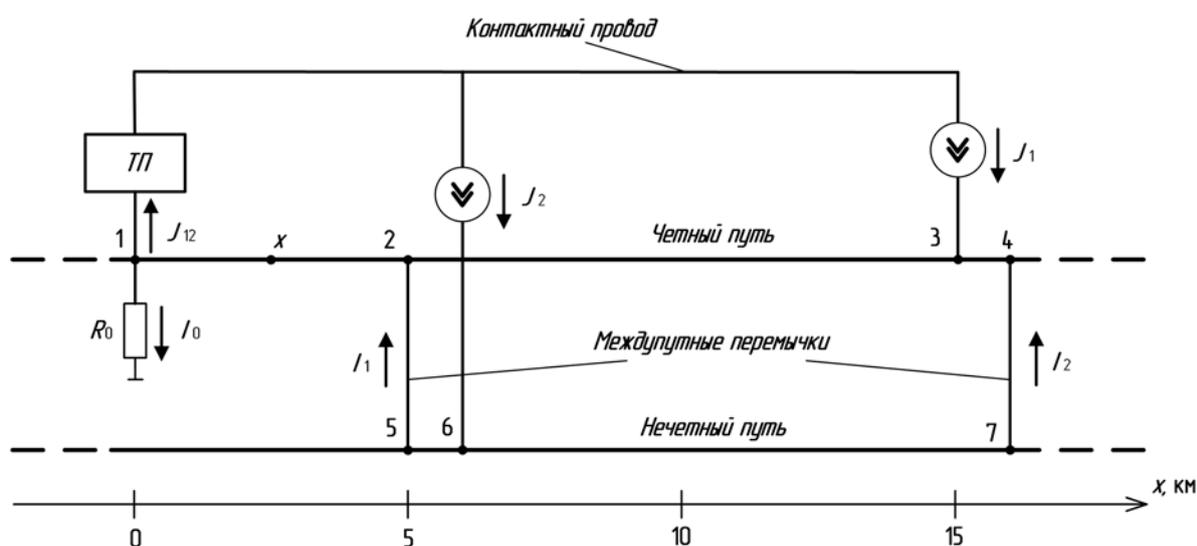


Рис. 2. Расчетная схема двухпутного участка тяговой сети ($0 < x < 16$ км)

Земляной провод и распределенные параметры линии не показываются. Токи электровозов и тяговой подстанции (ТП) примем равными $J_1 = 1000$ А, $J_2 = 1200$ А, а координаты электровозов соответственно $x_1 = 15$ км, $x_2 = 6$ км. Предполагается, что влияние соседних тяговых подстанций отсутствует [8].

Используем метод расчета, основанный на преобразовании электрической цепи с распределенными параметрами в цепь с сосредоточенными параметрами.

Каждый однородный участок РЛ заменяется эквивалентным П-образным четырехполюсником. Концы крайних участков нагружены на сопротивления $R_{V1} \dots R_{V4}$, равные волновому сопротивлению РЛ (рис. 3).

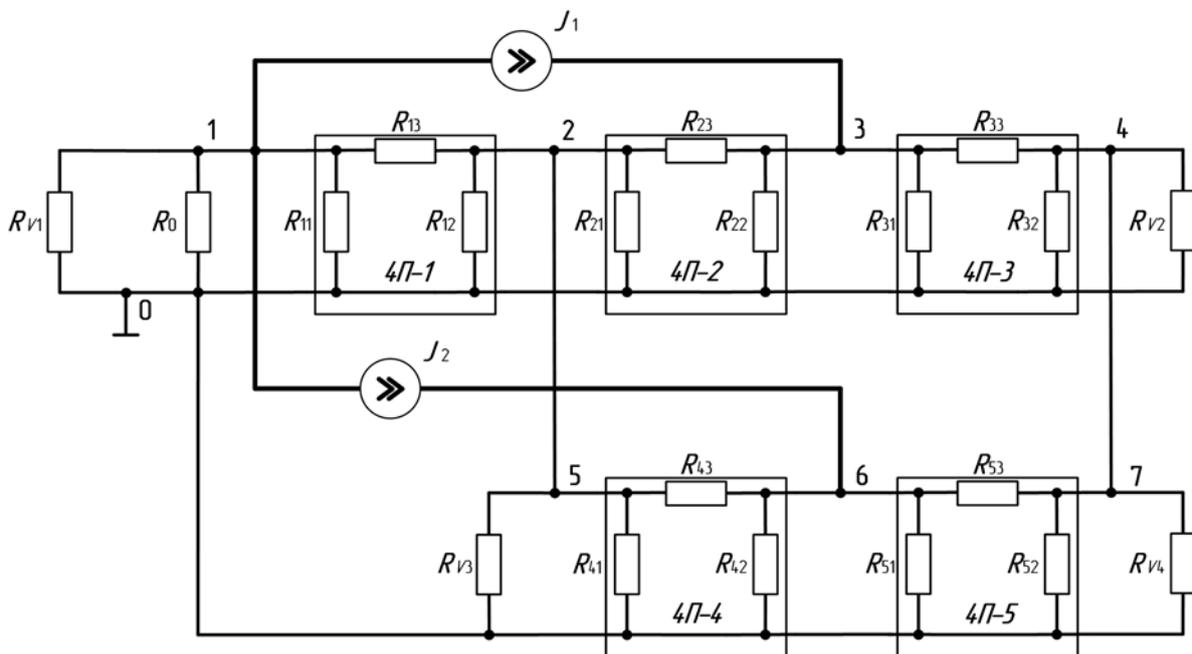


Рис. 3. Преобразованная эквивалентная схема ТРС двухпутного участка железной дороги

Токи и напряжения в произвольной точке электрической цепи с распределенными параметрами связаны системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{du}{dx} = rt \cdot i \\ \frac{di}{dx} = gt \cdot u \end{cases} \quad (3)$$

Общее решение этой системы имеет вид:

$$u(x) = A \cdot e^{-\alpha \cdot x} + B \cdot e^{\alpha \cdot x}, \quad (4)$$

$$i(x) = \frac{A}{R_v} \cdot e^{-\alpha \cdot x} - \frac{B}{R_v} \cdot e^{\alpha \cdot x}, \quad (5)$$

где A, B — постоянные, зависящие от граничных условий; R_v — волновое сопротивление; α — коэффициент затухания.

Вторичные параметры РЛ определяются по формулам:

$$\alpha = \sqrt{rt \cdot gt}, \quad (6)$$

$$R_v = \sqrt{\frac{rt}{gt}}. \quad (7)$$

Для расчета примем $rt = 0,014$ Ом/км, $gt = 0,71$ См/км, $\alpha = 0,1$ 1/км, $R_v = 0,14$ Ом [9–11].

Полученная схема замещения электрифицированного участка железной дороги имеет пять узлов (не считая нулевого). Учет сопротивлений междупутных перемычек приводит к увеличению числа узловых потенциалов до семи. Для расчета сопротивление междупутных перемычек примем $R_p = 0,01$ Ом.

На основе найденных потенциалов вычисляются токи на выводах эквивалентных четырехполюсников. Например, при проводимости устройства заземления тяговой подстанции $g_0 = 5$ См ток в РЛ четного пути I_1 при $x = 0$ равен:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_{11}} + \frac{(U_1 - U_2)}{R_{13}} = -1305 \text{ (А)}. \quad (8)$$

Значение тока считается положительным, если оно совпадает с положительным направлением оси x . Напряжение и ток в любой точке однородного участка вычисляются по значениям величин U_1 и I_1 в его начале по формулам:

$$\begin{pmatrix} u(x) \\ i(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch(\alpha \cdot x) & -R_v \cdot sh(\alpha \cdot x) \\ -\frac{sh(\alpha \cdot x)}{R_v} & ch(\alpha \cdot x) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Расчет цепи выполнен с помощью математического пакета Mathcad 15, для чего разработана программа на основе метода узловых потенциалов.

На рис. 4 показаны графики зависимости потенциала «рельс — земля» от координаты четного пути при различных значениях проводимости заземляющего устройства тяговой подстанции ($g_0 = 0$ См, 10 См, 25 См, 50 См).

На рис. 5 показаны графики зависимости потенциала «рельс — земля» от координаты нечетного пути при различных значениях проводимости заземляющего устройства тяговой подстанции ($g_0 = 0$ См, 10 См, 25 См, 50 См).

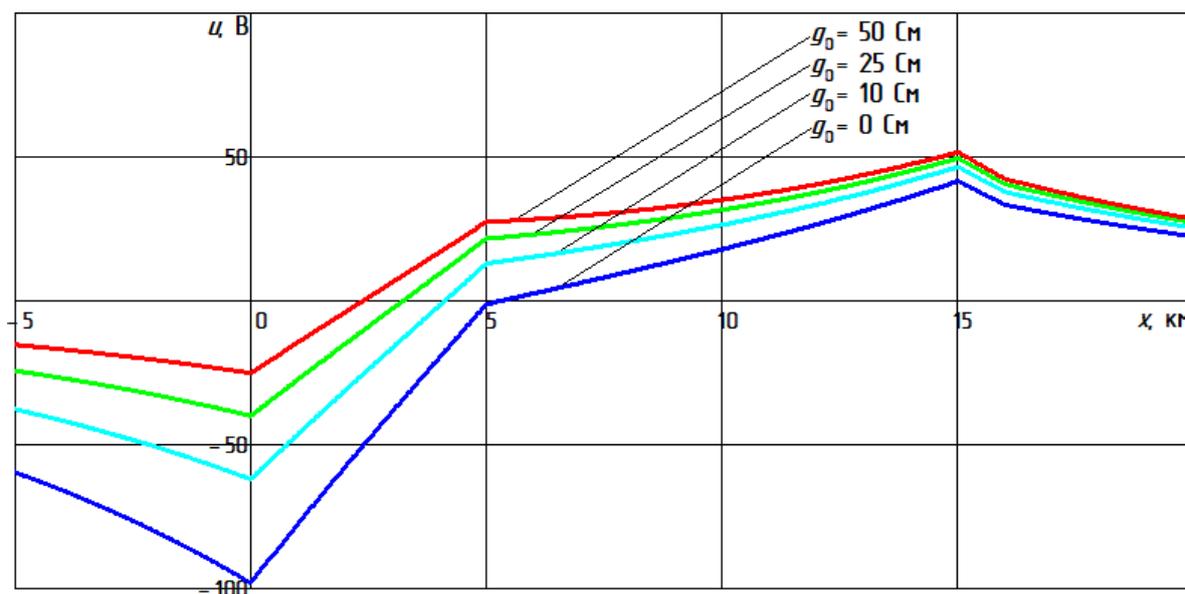


Рис. 4. Зависимость потенциала «рельс — земля» на четном пути от координаты

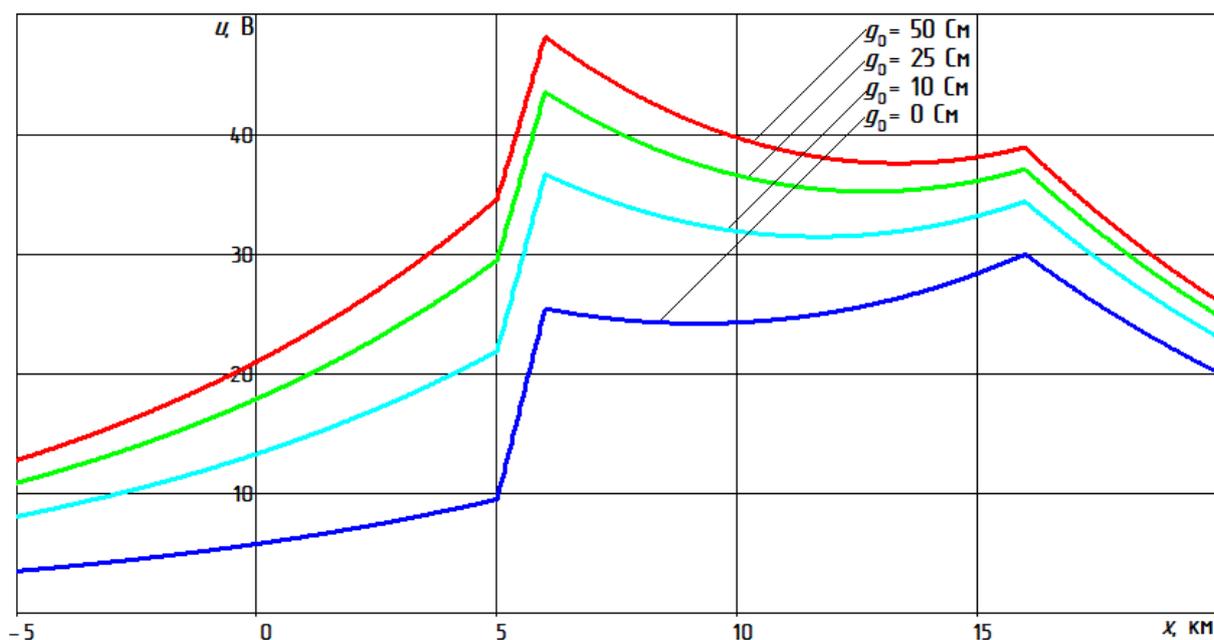


Рис. 5. Зависимость потенциала «рельс — земля» на нечетном пути от координаты

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод о том, что вблизи тяговой подстанции возникают наибольшие по модулю значения потенциала «рельс — земля». Уменьшение потенциала напрямую зависит от уменьшения проводимости заземляющего устройства. Причем потенциал на нечетном пути не превысил 50 В.

Согласно требованиям нормативной документации [12], заземляющее устройство, выполняемое с соблюдением требований к сопротивлению, должно

при любых условиях эксплуатации иметь сопротивление не более 0,5 Ом (2 См) для распределительных устройств и оборудования напряжением свыше 1000 В постоянного тока сети с глухозаземленной или с эффективно заземленной нейтралью. Если нейтраль изолированная, то заземляющее устройство должно быть выполнено таким образом, чтобы его сопротивление при прохождении расчетного тока замыкания на землю в любое время года с учетом сопротивления естественных заземлителей было не более 10 Ом (0,1 См).

Согласно техническим требованиям [6], напряжение прикосновения в любой точке рельсового пути не должно превышать 150 В в течение промежутка времени 300 с.

Заключение

В ходе исследования разработана схема замещения ТРС двухпутного участка железной дороги в виде совокупности однородных участков, каждый из которых является П-образным четырехполюсником, в которой также учтено наличие междупутных перемычек. На основе метода узловых потенциалов в математическом пакете Mathcad 15 разработана программа расчета ТРС двухпутного участка железной дороги. Получены графики зависимости потенциала на рельсах от координаты пути при различных значениях проводимости заземляющего устройства тяговой подстанции. На следующем этапе необходимо усовершенствовать разработанную программу для возможности расчета ТРС двухпутного участка железной дороги с двухсторонним питанием.

Библиографический список

1. Котельников А. В., Кандаев В. А. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: монография. М.: УМЦЖДТ, 2013. 552 с. EDN QIOYVJ.
2. Шаманов В. И., Балуев Н. Н. Нормирование сопротивления элементов тяговой рельсовой сети // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 2. С. 13–18. EDN RZNXAB.
3. Исайчева А. Г., Солдатов А. А. Расчет распределения тока в тяговой рельсовой сети методом наложения // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 220–222. EDN ZPVKIS.
4. Башаркин М. В., Исайчева А. Г. Особенности токораспределения в тяговой рельсовой сети при тяжеловесном движении // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 52–58. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-52-58. EDN MCDXEN.
5. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
6. Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети: требования и нормы содержания (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 03.04.2012 № 651). М., 2012. 40 с.
7. European standard EN 59122-1:2022. Railway applications — Fixed installations — Electrical safety, earthing and the return circuit — Part 1: Protective provisions against electric shock. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2022. 111 p.

8. Кузнецов К. Б., Лесников Д. В. Совершенствование системы заземления при защите опор контактной сети постоянного тока от электрической коррозии // Транспорт Урала. 2016. № 2 (49). С. 113–118. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-113-118. EDN WCKOFV.

9. Estimation of electrical energy losses in a DC traction rail network during heavy traffic / A. G. Isaicheva [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 990. P. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/990/1/012023. EDN WCQRZV.

10. Basharkin M. V., Isaicheva A. G. An Algorithm for Monitoring the Transient Resistance of a Prefabricated Conductive Rail Joint // Russian Electrical Engineering. 2023. Vol. 94, no. 10. P. 742–747. DOI: 10.3103/s1068371223100024. EDN QGLOEK.

11. Стрижевский И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами. М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. 240 с.

12. ГОСТ Р 58320-2018. Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги постоянного тока. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.

Дата поступления: 19.06.2024

Решение о публикации: 07.08.2024

Контактная информация:

БАШАРКИН Максим Викторович — канд. техн. наук, доцент; m.basharkin@samgups.ru

Dependence of rail potential on the resistance of the traction substation grounding device and rail line parameters

M. V. Basharkin

Volga State Transport University, 2v, Svobody str., Samara, 443066, Russia

For citation: *Basharkin M. V.* Dependence of rail potential on the resistance of the traction substation grounding device and rail line parameters // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 24–33. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-24-33

Abstract

Purpose: to analyse the dependence of the potential on rails on the track coordinate at different values of conductivity of the grounding device of the traction substation ($g_0 = 0 \text{ S}, 10 \text{ S}, 25 \text{ S}, 50 \text{ S}$). **Methods:** the analysis was carried out on the developed substitution diagram of the traction rail network section using the method of nodal potentials. The calculation was implemented in Mathcad 15 mathematical package. Selection of initial data was carried out taking into account the values established in the current normative documentation. **Results:** an equivalent substitution scheme of the traction rail network on a double-track section has been developed, in which each homogeneous section of the rail line is replaced by an equivalent U-shaped quadrupole. This allows to transform an electric circuit with distributed parameters into a circuit with concentrated parameters. If it is necessary to simulate transverse or longitudinal asymmetry of traction current in a section, such a section is replaced by a three-wire substitution diagram in which the earth conductor

is taken into account. To improve the accuracy of the modelling results, the inter-track jumpers are taken into account, and the number of nodal potentials is increased to 7. It is established that the highest modulus value of voltage on rails is observed near the traction substation. It has been determined that the voltage value on rails near the traction substation decreases when the conductivity of the earthing device increases. **Practical significance:** values of rail-ground potential at different values of conductivity of grounding device of traction substation for tracks of both directions of traffic — even and odd tracks — are determined. The value of conductivity of the traction substation grounding device at which it is safe for the personnel to stay on the rails near the traction substation has been determined. The obtained results can be recommended for practical use in railway transport.

Keywords: traction rail network, rail line, potential on rails, grounding device, traction current

References

1. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. Bluzhdayushchie toki i ekspluatatsionnyj kontrol korrozionnogo sostoyaniya podzemnyh sooruzhenij sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta: monograph. M.: UMCZDT, 2013. 552 s. EDN QIOYVJ. (In Russian)
2. Shamanov V.I., Baluev N.N. Normirovanie soprotivleniya elementov tyagovoj relsovoi seti // *Avtomatika, svyaz, informatika*. 2014. № 2. S. 13–18. (In Russian)
3. Isaicheva A. G., Soldatov A. A. Raschet raspredeleniya toka v tyagovoj relsovoj seti metodom nalozheniya // *Nauka i obrazovanie transportu*. 2023. № 1. S. 220–222. (In Russian)
4. Basharkin M. V., Isaicheva A. G. Osobennosti tokoraspredeleniya v tyagovoj relsovoj seti pri tyazhelovesnom dvizhenii // *Transport Urala*. 2021. № 3 (70). S. 52–58. (In Russian)
5. GOST 9.602-2016. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii. M.: Federal Center for regulation and standardization Publ., 2016, 57 s. (In Russian)
6. Ustrojstva i elementy relsovyh linij i tyagovoj relsovoj seti: trebovaniya i normy sodержaniya (utv. rasporyazheniem OAO “RZHD” ot 03.04.2012 № 651). M., 2012. 40 p. (In Russian)
7. European standard EN 59122-1:2022. Railway applications — Fixed installations — Electrical safety, earthing and the return circuit — Part 1: Protective provisions against electric shock. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2022. 111 p.
8. Kuznecov K. B., Lesnikov D. V. Sovershenstvovanie sistemy zazemleniya pri zashchite opor kontaktnoj seti postoyannogo toka ot elektricheskoy korrozii // *Transport Urala*, 2016. № 2 (49). S. 113–118. (In Russian)
9. Estimation of electrical energy losses in a DC traction rail network during heavy traffic / A. G. Isaicheva [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 990. P. 012023. DOI: 10.1088/1755–1315/990/1/012023.
10. Basharkin M. V., Isaicheva A. G. An Algorithm for Monitoring the Transient Resistance of a Prefabricated Conductive Rail Joint // *Russian Electrical Engineering*. 2023. Vol. 94, no. 10. P. 742–747. DOI: 10.3103/s1068371223100024.
11. Strizhevskij I. V. Teoriya i raschet drenazhnoj i katodnoj zashchity magistralnyh truboprovodov ot korrozii bluzhdayushchimi tokami. M.: Gosudarstvennoe nauchno-tekhicheskoe izdatel'stvo neftyanoy i gorno-toplivnoj literatury Publ. 1963. 240 s. (In Russian)

12. GOST R 58320-2018. Elektroustanovki sistem tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi postoyannogo toka. M.: Federal Center for regulation and standardization Publ., 2019. 28 s. (In Russian)

Received: 19.06.2024

Accepted: 07.08.2024

Author's information:

Maksim V. BASHARKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; m.basharkin@samgups.ru