



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.331.1:625.14

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ РЕЛЬСОМ И ЗЕМЛЕЙ ДЛЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ И ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА РАСТЕКАНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ В ЗЕМЛЯНОМ ПОЛОТНЕ

А. Б. Косарев¹, Р. А. Рудашевский^{1,2}, А. В. Рудашевская^{1,2},
П. И. Смолин^{1,2}, И. А. Ребров^{1,2} ✉

¹ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

² Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave.,
Sochi, Russian Federation

АННОТАЦИЯ

Введение. Переходное сопротивление рельсовый путь—земля является важным параметром электрифицированных железных дорог, который напрямую влияет на уровень электробезопасности тяговой сети и распределение потенциала в зоне верхнего строения пути. Повышенный потенциал негативно влияет на процесс эксплуатации системы электроснабжения, безопасность пассажиров и обслуживающего персонала станции, а также может вызвать повреждение изоляции сигнального оборудования и несет угрозу безопасности движению поездов. Развитие высокоскоростного движения в России предполагает применение безбалластной конструкции пути. Переходное сопротивление безбалластного пути отличается от сопротивления балластного пути.

Материалы и методы. В статье рассмотрена математическая модель безбалластного пути для определения переходного сопротивления рельсовый путь — земля. Также представлено описание метода определения переходного сопротивления при известном входном сопротивлении рельсового пути, определенном экспериментальным путем.

Результаты. Представлены относительные значения падения напряжения на элементах строения безбалластного пути. Полученные данные будут использоваться для анализа и расчетов режимов работы системы тягового электроснабжения, возникающих в рельсовом пути при коротких замыканиях в тяговой сети, и оценки электромагнитной совместимости электроустановок.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволят проводить исследования переходного сопротивления безбалластного пути при стекании с рельсов больших токов короткого замыкания, в том числе посредством имитации короткого замыкания на перегоне вблизи и в отдалении от тяговой подстанции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовый путь, переходное сопротивление, схема замещения, математическая модель, система тягового электроснабжения, безбалластный путь, высокоскоростная магистраль, тяговая сеть

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51017.

Для цитирования: Косарев А. Б., Рудашевский Р. А., Рудашевская А. В., Смолин П. И., Ребров И. А. Определение переходного сопротивления между рельсом и землей для безбалластного пути и влияние сопротивления на растекание токов утечки в земляном полотне // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 7–15. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15>.

✉ rebrov.ilya@vniizht.ru (И. А. Ребров)

© Косарев А. Б., Рудашевский Р. А., Рудашевская А. В.,
Смолин П. И., Ребров И. А., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.331.1:625.14

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15



DETERMINATION OF THE RAIL-TO-EARTH TRANSITION RESISTANCE OF THE BALLASTLESS TRACK AND INFLUENCE OF THE RESISTANCE ON THE CURRENT SPREADING IN THE SUBGRADE

Alexander B. Kosarev¹, Roman A. Rudashevskiy^{1,2},
Anna V. Rudashevskaya^{1,2}, Pavel I. Smolin^{1,2},
Il'ya A. Rebrov^{1,2}✉

¹Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

²Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave.,
Sochi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The rail-to-earth transition resistance is an important parameter of electrified railways, which directly affects the electrical safety level of the traction network and the potential distribution in the upper structure track area. The increased potential adversely affects the operation of the power supply system, the safety of passengers and service staff. Moreover, the mentioned potential leads to the insulation damage of the signaling equipment and to the threat of the train traffic security. The high-speed traffic development in Russia involves the ballastless track usage. The transition resistance of the ballastless track differs from that of a ballast track.

Materials and methods. The article considers mathematical model of the ballastless track for determining the rail-to-earth transition resistance. The authors presented a description of the method for rail-to-earth transition resistance with a known input resistance of the rail track, determined experimentally.

Results. The paper demonstrates relative values of the voltage drop on the ballastless track structural elements. The obtained data will be used to analyse and calculate the modes of operation of the traction power supply system that occur in the rail track during short circuits in the traction network, and to assess the electromagnetic compatibility of electrical installations.

Discussion and conclusion. Obtained results will lead to study the transition resistance of the ballastless track concerning high short-circuit currents drainage from the rails by simulating a short circuit both near the traction substation and away from it.

KEYWORDS: rail track, transition resistance, equivalent circuit, mathematical model, traction power supply system, ballastless track, high-speed highway, traction network

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project number 20-38-51017.

For citation: Kosarev A. B., Rudashevskiy R. A., Rudashevskaya A. V., Smolin P. I., Rebrov I. A. Determination of the rail-to-earth transition resistance of the ballastless track and influence of the resistance on the current spreading in the subgrade. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):7–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15>.

✉ rebrov.ilya@vniizht.ru (I. A. Rebrov)

© Kosarev A. B., Rudashevskiy R. A., Rudashevskaya A. V., Smolin P. I., Rebrov I. A., 2022

Введение. Высокоскоростная магистраль (ВСМ) проектируется как единый технологический комплекс, включающий в себя совокупность подсистем железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. В современных условиях необходимо применять новые конструкции пути, обеспечивающие высокую стабильность при повышенных скоростях движения поездов, а также минимизацию времени на все виды путевых работ.

Верхним строением пути является составная часть подсистемы железнодорожного пути инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта, предназначенная для обеспечения пространственной стабильности рельсовой колеи и направляющей функции для колес подвижного состава, распределения нагрузки от подвижного состава на нижнее строение пути и снижения генерируемых подвижным составом вибраций до приемлемого уровня. Верхнее строение пути может быть представлено безбалластной конструкцией или конструкцией на балласте.

Одними из преимуществ безбалластного верхнего строения пути являются низкие затраты на текущее содержание железнодорожного пути и устойчивость бесстыкового пути. При этом есть ряд недостатков, таких как высокая стоимость строительства, повышенный уровень шума, высокие требования к выбору строительных материалов [1, 2].

Важно отметить, что рельсовый путь не только обеспечивает механическую поддержку для подвижного состава, но также выполняет роль проводника как для канализации обратного тягового тока, так и для сигналов рельсовой цепи. Значение тока утечки с рельсов на землю зависит от потенциала рельсов относительно земли, их сопротивления, переходного сопротивления рельсовый путь — земля и метеорологических условий. Утечка происходит с подошвы рельсов через костыли, шурупы и подкладки, противоугоны, междурельсовые и междупутные соединения и заземляющие устройства.

С увеличением скоростей движения и массы поездов повышается нагрузка на систему тягового электроснабжения и, как следствие, соответственно увеличивается обратный тяговый ток. Это влияет также на устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), в том числе на длину, чувствительность и безопасность передачи сигнала в рельсовых цепях. Предположим, что собственное сопротивление рельса и тяговый ток имеют неизменные значения. Если сопротивление току утечки с рельсового пути на землю слишком велико, это может вызвать появление повышенного электрического потенциала в рельсовом пути. Повышенный потенциал негативно влияет на процесс эксплуатации системы электроснабжения, безопасность пассажиров и обслуживающего персонала станции, а также может вызвать повреждение

изоляции сигнального оборудования и несет угрозу безопасности движущихся поездов [3].

Из-за повышенной нагрузки, которую оказывает на рельсовый путь высокоскоростной подвижной состав, прокладка между рельсами и подложкой пути в безбалластном пути, как правило, утолщена, что делает такой путь более электроизоляционным. Сигналы управления системы СЦБ также требуют хорошей изоляции между двумя рельсами и между рельсами и землей. Эти факторы приводят к большему сопротивлению утечке тока с рельсового пути на землю. Для высокоскоростной железной дороги необходимо принять соответствующие меры для снижения тока пути и потенциала рельсов. Таким образом, для того чтобы добиться хорошей электромагнитной совместимости между системой тягового электроснабжения и сигналами управления СЦБ, при строительстве и эксплуатации электрифицированной высокоскоростной железной дороги необходимо знать и учитывать точное значение сопротивления токам утечки с рельсов и распределенной емкости между землей и рельсовым путем.

Построение математической модели. Сопротивление току утечки с рельсового пути на землю является важным параметром для определения токов и напряжений в земле. Расчетная схема общей картины протекания токов в рельсах и земле представлена на рис. 1.

Поскольку рельсы не изолированы от земли, ток проходит и по земле. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на ряд рассматриваемых параметров, в том числе на сопротивление тяговой сети. В [4, 5] рассматривается схема замещения с одной составляющей переходного сопротивления рельсовый путь — земля. Однако для случая безбалластного пути, строение которого значительно отличается [6] от балластного пути, предлагается рассмотреть схему замещения с несколькими составляющими переходного сопротивления: рельсы, крепления рельсов, армированный бетонный слой, подстилающий слой и земляное полотно.

Значение переходного сопротивления проводник — земля определяется по формуле [7]:

$$r_n = r_n' + r_n'', \quad (1)$$

где r_n' — переходное сопротивление бесконечно тонкого слоя изоляции между проводником и поверхностью земли, Ом·км.

Составляющая переходного сопротивления проводник — земля r_n'' зависит от сопротивления земли [8]:

$$r_n'' = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{\alpha \gamma}, \quad (2)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление однородной земли, Ом·м; α — эквивалентный радиус

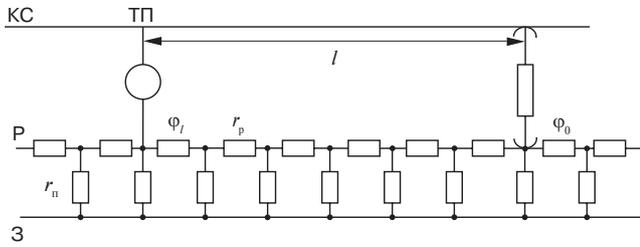


Рис. 1. Общая расчетная схема протекания токов в рельсах и земле:

КС — контактная сеть; ТП — тяговая подстанция; Р — рельс; З — земля; l — расстояние между тяговыми подстанциями; φ_l — потенциал рельса на расстоянии l ; r_p — сопротивление 1 км рельсового пути; r_n — переходное сопротивление от рельса к земле; φ_0 — потенциал рельса у нагрузки

Fig. 1. General design model for the flow of currents in rails and earth: КС — contact network; ТП — traction substation; Р — rail; З — earth; l — distance between traction substations; φ_l — potential of the rail at a distance l ; r_p — resistance of the 1 km rail track; r_n — rail-to-earth transition resistance; φ_0 — rail potential at the load

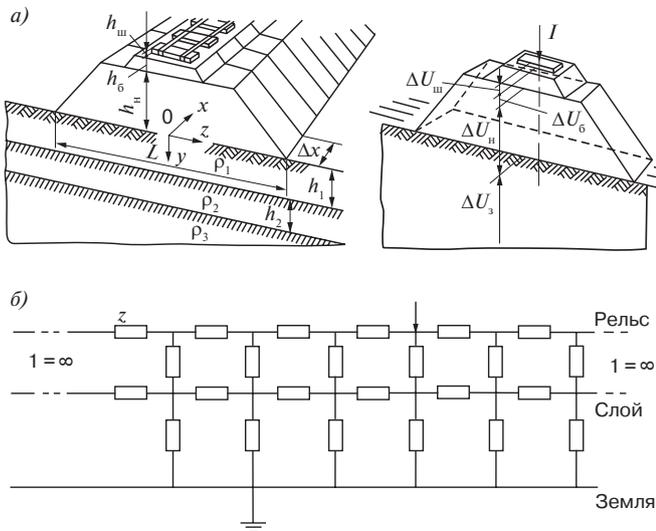


Рис. 2. Безбалластный путь:

a — конструкция: $h_{ш}$, h_6 , h_n — высота шпалы, безбалластного основания и насыпи; h_1 , h_2 — мощности слоев земли; ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 — удельные электрические сопротивления слоев земли; L — ширина основания насыпи; I — приложенный ток; $\Delta U_{ш}$ — падение напряжения на шпале; ΔU_n — падение напряжения на теле насыпи; ΔU_6 — падение напряжения на безбалластном слое; ΔU_3 — падение напряжения на земле; Δx — расчетный шаг элемента пути; *b* — модель переходного сопротивления рельсовый путь — безбалластное основание — земля: z — элементы схемы замещения участка рельсовый путь — земля

Fig. 2. Ballastless track:

a — construction: $h_{ш}$, h_6 , h_n — height of the sleeper, non-ballast base and embankment; h_1 , h_2 — thicknesses of the earth layers; ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 — specific electrical resistance of the earth layers; L — width of the embankment base; I — applied current; $\Delta U_{ш}$ — voltage drop across the sleeper; ΔU_n — voltage drop on the back of ballast bed; ΔU_6 — voltage drop on the non-ballast layer; ΔU_3 — voltage drop on the earth; Δx — calculated step of the track element; *b* — model of the rail track — ballastless base — earth transition resistance: z — equivalent circuit elements of the rail-to-earth section

проводника; γ — коэффициент распространения эквивалентной длинной линии, $\gamma = \sqrt{Z_p / r_n}$ (Z_p — продольное сопротивление проводника, Ом/м).

Значение r_n' в формуле (1) обусловлено сопротивлением шпал, балласта и земляного полотна. Поэтому для конструкций безбалластного пути определение зависимости r_n' от сопротивления шпал, безбалластного основания и земляного полотна (насыпи) представляет практический и теоретический интерес.

Рассмотрим модель переходного сопротивления рельсовый путь — земля, позволяющую установить распределение потенциала на поверхности шпал, безбалластного основания, насыпи и земли в зависимости от удельного электрического сопротивления с учетом реальной геометрии этих составляющих (рис. 2, *a*).

В основу построения модели переходного сопротивления безбалластного пути положим следующие допущения. Прямолинейный однородный проводник бесконечной длины, обладающий продольным сопротивлением на 1 км длины (определение значения сопротивления 1 км рельсов будет представлено ниже), имеет дискретный контакт с землей только через последовательно соединенные сопротивления шпалы $R_{ш}$, безбалластного основания R_6 , насыпи R_n , земли R_3 . Шпалы расположены равномерно с постоянным шагом Δx . Удельные электрические сопротивления шпалы, безбалластного основания, насыпи ($\rho_{ш}$, ρ_6 , ρ_n) постоянны, однородная земля характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ . Поверхность земли горизонтальна. Геометрические размеры шпал, безбалластного основания, насыпи неизменны на всем протяжении. При расчете сопротивления безбалластного основания и насыпи допустимо пренебрегать продольной составляющей. Электрические параметры системы линейны во всем рассматриваемом диапазоне токов. Поскольку на безбалластном пути шпалы и монолитная основа состоят из однородного армированного бетонного слоя, составляющие $R_{ш}$ и R_6 можно объединить ($R_{ш6}$).

Рассмотрим математическую модель, в которой приложенный ток находится в произвольной точке рельсов [7]. Приложенный ток I изменяется во времени по закону $Ie^{i\omega t}$. В силу симметрии системы достаточно рассмотреть процесс одностороннего растекания тока, втекающего в произвольную точку рельса [9]. С учетом принятых допущений математическая модель переходного сопротивления будет выглядеть следующим образом: рельсовый путь — безбалластное основание — земля (рис. 2, *b*).

Для любой точки рельсового пути x напряжение рельсовый путь — земля на участке Δx можно записать в виде

$$U_2 = \Delta U_{ш}(x) + \Delta U_6(x) + \Delta U_n(x) + \varphi_3(x), \quad (3)$$

где $\Delta U_{\text{ш}}(x), \Delta U_6(x), \Delta U_{\text{н}}(x)$ — падение напряжения в шпале, безбалластном основании и теле насыпи, В; $\varphi_3(x)$ — потенциал земли, В.

Уравнение (3) можно представить в виде

$$U_2 = \Delta I_i(x)(R_{\text{ш}} + R_6 + R_{\text{н}} + R_3), \quad (4)$$

где $\Delta I_i(x)$ — ток утечки с рельса на землю через i -й контакт, А.

Сопротивление безбалластного основания и насыпи определяется по формуле (5) для каждого участка рельсового пути Δx

$$R_{\text{ш}} = \rho_{\text{ш}} \frac{h_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}}; R_6 = \rho_6 \frac{h_6}{\Delta S_6}; R_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \frac{h_{\text{н}}}{\Delta S_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{ш}}$ — площадь подошвы шпалы, м^2 ; $\Delta S_6, \Delta S_{\text{н}}$ — площади продольных сечений безбалластного основания и насыпи по средней линии для участка рельсового пути, м^2 .

Метод определения переходного сопротивления.

Ниже предложен алгоритм расчета переходного сопротивления рельсовый путь — земля на основании входного сопротивления рельсовый путь — земля, определенного экспериментальным путем.

Входное сопротивление рельсового пути на частоте ω , превышающей $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$, определяется по формуле

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_{\text{п}}}{g_{\text{п}} + j\omega C_{\text{п}}}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{п}}$ — продольное сопротивление рельсового пути на частоте ω ; $g_{\text{п}}$ — поперечная проводимость рельсовый путь — земля, $g_{\text{п}} = 1/r_{\text{п}}$; $C_{\text{п}}$ — емкость рельсового пути относительно земли.

Зная $Z_{\text{вх}}$, можно определить $r_{\text{п}}$ из выражения

$$r_{\text{п}} = \frac{4Z_{\text{вх}}^2}{Z_{\text{п}} - 4Z_{\text{вх}}^2 j\omega C_{\text{п}}}. \quad (7)$$

Продольное сопротивление рельсового пути на частоте ω определяется по формуле

$$Z_{\text{п}} = j\omega L_{\text{внш}} + j\omega \frac{1}{P_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\omega \mu}{\gamma}} 0,6 + \frac{1}{P_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\omega \mu}{\gamma}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{внш}}$ — индуктивность контура рельсовый путь — земля; $P_{\text{п}}$ — периметр рельса; μ — абсолютная магнитная проницаемость рельсовой стали, при расчетах принимаем $\mu = 100\mu_0, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; γ — удельная электрическая проводимость рельсовой стали.

Емкость рельсового пути согласно расчетам составляет $C_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}$.

Емкость рельсового пути (материала) колеблется в зависимости от диэлектрической проницаемости безбалластного основания. В этой связи желательно выбрать такую частоту тока, подаваемого в рельсовую

цепь, при которой емкостное сопротивление $1/\omega C_{\text{п}}$ было бы существенно больше переходного сопротивления рельсовый путь — земля.

Принимая условия [10] определения переходного сопротивления рельсовый путь — земля при $k = 2 [\text{Ом/км}]$, следует

$$r_{\text{п}} = kZ_{\text{вх}}^2 [\text{Ом} \cdot \text{км}], \quad (9)$$

где $Z_{\text{вх}}$ — модуль входного сопротивления в Ом при $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$, определяемый экспериментальным путем.

Таким образом, при известном, определенном экспериментальным путем входном сопротивлении, переходное сопротивление рельсовый путь — земля можно рассчитать по приведенному выше соотношению.

Результаты и обсуждение. Для расчета переходного сопротивления рассмотрим участок безбалластного пути на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (рис. 3, а).

Конструкция состоит из модифицированных двухблочных шпал с арматурой, скреплений для безбалластной конструкции, монолитного армированного бетонного несущего слоя и гидравлически связанного несущего слоя.

Бетонный несущий слой шириной 2,8 м и толщиной 0,240 м опирается на гидравлически связанный несущий слой шириной 3,4 м и толщиной 0,300 м (рис. 3, б).

С учетом допущений высота шпал, армированного бетонного несущего слоя и гидравлически связанного несущего слоя $h_{\text{шб}} = h_{\text{ш}} + h_6 = 0,550 \text{ м}$, принятая средняя ширина основания насыпи $L = 3,1 \text{ м}$, $\Delta x = 0,25$.

Следовательно

$$R_{\text{шб}} = \rho_{\text{шб}} \frac{h_{\text{шб}}}{L\Delta x} = \rho_{\text{шб}} \frac{0,550}{3,1 \cdot 0,25} = 0,71\rho_{\text{шб}}. \quad (10)$$

В качестве размеров насыпи примем размеры слоя под бетонным основанием $h_{\text{н}} = 0,500 \text{ м}$, $L = 4 \text{ м}$, $\Delta x = 0,25$.

Тогда

$$R_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \frac{h_{\text{н}}}{L\Delta x} = \rho_{\text{н}} \frac{0,500}{4 \cdot 0,25} = 0,5\rho_{\text{н}}. \quad (11)$$

В произвольной точке x математической модели эквивалентной линии с равномерно распределенными параметрами $Z_{\text{п}}$ и полного переходного сопротивления $Z_{\text{п}}$ для рассматриваемых условий определяется потенциал.

Воспользовавшись уравнением электрического равновесия и соотношением для потенциала земли, определим переходное сопротивление рельсовый путь — земля. Ток, стекающий с пластины в месте приложения нагрузки к бесконечному рельсовому пути, находим по формуле

$$\Delta I_{|x|=0} = 0,5\eta\gamma_2\Delta x I, \quad (12)$$

где η — коэффициент экранирования рельсового пути; γ_2 — постоянная распространения рельсового пути, км^{-1} , $0,1\text{км}^{-1} \leq |\gamma_2| \leq 2\text{км}^{-1}$.

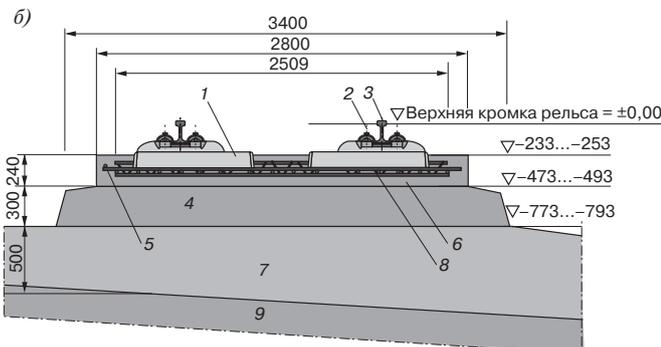
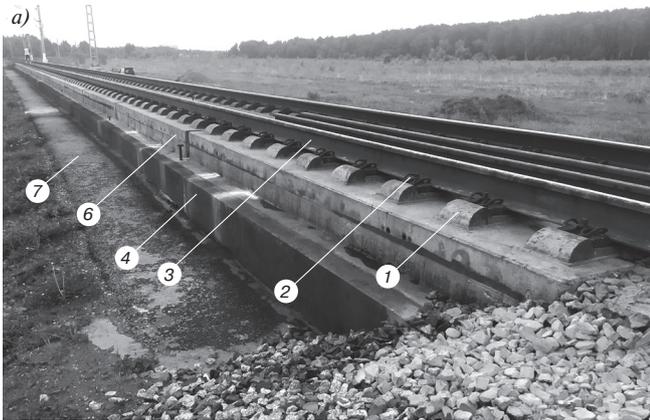


Рис. 3. Участок безбалластного пути на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»: а — общий вид; б — конструкция пути:

1 — шпала V355 интервал 650 мм; 2 — крепление рельсов по системе Vossloh W300; 3 — рельс 60E1; 4 — гидравлически связанный несущий слой; 5 — поперечное армирование 20; 6 — бетон железнодорожного полотна С30/37; 7 — морозозащитный слой; 8 — продольное армирование 18/20; 9 — постель балласта

Fig. 3. Section of the ballastless track on the JSC “VNIIZhT” Test Loop: а — general view; б — track design:

1 — sleeper V355 interval 650 mm; 2 — fastening of rails according to the Vossloh W300 system; 3 — 60E1 rail; 4 — hydraulically connected carrier layer; 5 — transverse 20 reinforcement; 6 — concrete of the C30/37 railway track; 7 — frost-protective layer; 8 — longitudinal reinforcement 18/20; 9 — metal bed

Тогда падение напряжения в элементах верхнего строения пути будет определяться из следующих выражений:

$$\Delta U_2(x=0) = 0,5\eta Z_b I; \quad (13)$$

$$\Delta U_{ш}(x=0) = 0,5\eta\gamma_2\Delta x R_{ш} I; \quad (14)$$

$$\Delta U_6(x=0) = 0,5\eta\gamma_2\Delta x \rho_6 \frac{h_6}{\Delta S_6} I; \quad (15)$$

$$\Delta U_n(x=0) = 0,5\eta\gamma_2\Delta x \rho_n \frac{h_n}{\Delta S_n} I, \quad (16)$$

где Z_b — волновое сопротивление рельсового пути, Ом, $Z_b = \sqrt{Z_p r_n}$.

Преобразовав уравнение (1), получим

$$r'_n = \Delta x \cdot 10^{-3} (R_{ш6} + R_n); \quad (17)$$

$$r'_n = \Delta x \cdot 10^{-3} (0,71\rho_{ш6} + 0,5\rho_n). \quad (18)$$

После преобразования выражений получим

$$r'_n = r_{ш6} + r_n; \quad (19)$$

$$r_{ш6} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \rho_{ш6}; \quad (20)$$

$$r_n = 0,125 \cdot 10^{-3} \rho_n. \quad (21)$$

Переходное сопротивление земли принято $r''_n = 2,2 \cdot 10^{-3} \rho$.

Таким образом, для расчета переходного сопротивления рельсовый путь — безбалластное основание — насыпь — земля может быть использована формула

$$r_n = 0,1775 \cdot 10^{-3} \rho_{ш6} + 0,125 \cdot 10^{-3} \rho_n + 2,2 \cdot 10^{-3} \rho. \quad (22)$$

Для решения этого уравнения необходимо определить удельные электрические сопротивления материала шпал, безбалластного основания и насыпи. Удельное сопротивление в решетке Веннера [11] определяется по формуле

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}, \quad (23)$$

где a — расстояние между электродами; V — падение напряжения между измеряемыми электродами; I — ток, подаваемый на электроды.

Значения удельного электрического сопротивления материалов представлены в таблице.

Исходя из результатов проведенных экспериментов, а также аналогичных исследований [7, 12, 13] могут быть рекомендованы следующие значения удельных электрических сопротивлений: $\rho_{ш6} = 100 \cdot 10^3$, $\rho_n = 1 \cdot 10^3$, $\rho = 0,04 \cdot 10^3$.

Определение удельного электрического сопротивления материалов безбалластного пути проведено непосредственно на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» без отбора проб грунта по четырех-электродной схеме. Электроды размещались на поверхности земли по одной прямой линии, совпадающей с осью трассы для проектируемого сооружения, а для сооружения, уложенного в землю, на линии, проходящей перпендикулярно или параллельно, —

на расстоянии в пределах от 2 до 4 м от оси сооружения. Измерения были выполнены с интервалом от 100 до 200 м в период, когда на глубине заложения сооружения отсутствует промерзание грунта [14].

Полученные зависимости эквивалентного удельного электрического сопротивления безбалластного пути от геоэлектрической структуры пути (рис. 4) дают возможность проанализировать изменение переходного сопротивления на электрифицированных участках железных дорог с безбалластной конструкцией пути [15].

Для расчета потенциала на поверхности земли под осью рельсового пути многослойную землю заменим однородным полупространством с эквивалентным удельным электрическим сопротивлением и получим

$$\Phi_3 \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0 \\ z=0}} = \eta \gamma_2 \rho_{31}^0 I F_3(\gamma_2; \Delta x m; l; r_{\text{эш}}), \quad (24)$$

где x, y, z — координаты точки земли, в которой определяется потенциал; ρ_{31}^0 — неоднородная структура земли, приведенная к однородной эквивалентным удельным электрическим сопротивлением, Ом·м; I — значение стекания тока с элемента F_3 с характерными свойствами ($\Delta x m$ — длина стекающего элемента; l — расстояние между влияющими элементами рельса, $r_{\text{эш}}$ — сопротивление элемента).

$$F_3(\gamma_2; \Delta x m; l; r_{\text{эш}}) = a_0 + \frac{a_1}{|\gamma_2|} + \frac{a_2}{|\gamma_2|^2} + a_3 h_n + a_4 h_n^2 \quad \text{при}$$

$$a_0 = 0,91; a_1 = 0,06636; a_2 = -0,01413; a_3 = -0,06171;$$

$$a_4 = 0,0046; 0,1_{\text{км}}^{-1} \leq |\gamma_2| \leq 2_{\text{км}}^{-1}.$$

Исходя из ранее принятых допущений математической модели, найдем относительные значения падения напряжения на шпалах, безбалластном основании, насыпи и земле:

$$r_n = 0,1775 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^3 + 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 + 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04 \cdot 10^3 = 17,963; \quad (25)$$

$$\Delta U_{\text{шб}} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\text{шб}}}{r_n} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \frac{100 \cdot 10^3}{17,963} = 0,988; \quad (26)$$

$$\Delta U_n = 0,125 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_n}{r_n} = 0,125 \cdot 10^{-3} \frac{1 \cdot 10^3}{17,963} = 0,007; \quad (27)$$

$$\Delta U_3 = 2,2 \cdot 10^{-3} \frac{\rho}{r_n} = 2,2 \cdot 10^{-3} \frac{0,04 \cdot 10^3}{17,963} = 0,005. \quad (28)$$

Значение переходного сопротивления рельсовый путь—земля на основании экспериментального исследования составило $r_n = 17$ Ом·км, расхождение с расчетным значением — 5,4%.

Удельные электрические сопротивления материалов
Specific electrical resistance of materials

Грунт	ρ , Ом·м
Асфальт	300–5 300
Бетон	900–10 000
Вечномерзлый грунт – талый слой (у поверхности летом)	500–1 000
Гравий глинистый, неоднородный	300
Гравий однородный	800
Дресва (мелкий щебень/крупный песок)	5 500
Песок слегка влажный	400–1 500
Песок сухой	1 500–4 200
Щебень мокрый	3 000
Щебень сухой	5 000

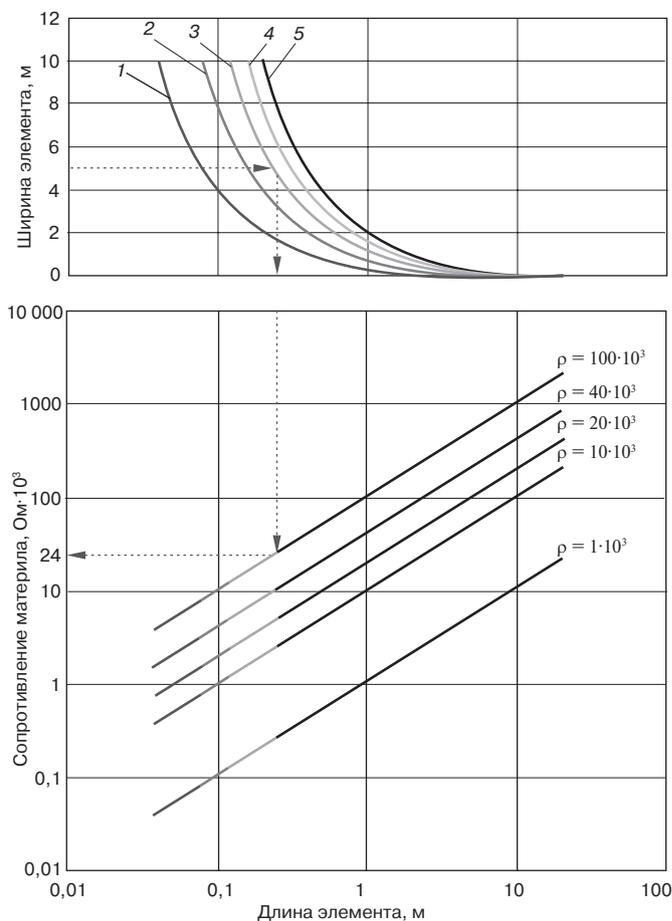


Рис. 4. Зависимость эквивалентного удельного электрического сопротивления безбалластного пути от геоэлектрической структуры пути:
1 — $h_1 = 0,1$; 2 — $h_2 = 0,2$; 3 — $h_3 = 0,3$; 4 — $h_4 = 0,4$; 5 — $h_5 = 0,5$
Fig. 4. Dependence of the equivalent specific electrical resistance of a ballastless track on the geoelectric track structure:
1 — $h_1 = 0,1$; 2 — $h_2 = 0,2$; 3 — $h_3 = 0,3$; 4 — $h_4 = 0,4$; 5 — $h_5 = 0,5$

Заключение. В результате расчетов установлено, что на долю среднего значения показателя удельного электрического сопротивления шпал и безбалластного

основания приходится 80% переходного сопротивления рельсовый путь — земля на участках с безбалластным основанием. Доля удельного электрического сопротивления земли и насыпи под безбалластным путем не превышает 10–20%. Результаты экспериментального исследования показали, что на исследуемом участке переменного тока безбалластного пути переходное сопротивление рельсовый путь — земля одного пути равно 17 Ом·км, что сопоставимо с расчетным значением.

В рамках дальнейшей работы необходимо будет произвести исследования переходного сопротивления безбалластного пути при стекании с рельсов больших токов короткого замыкания. При этом должна быть выполнена имитация короткого замыкания на перегоне вблизи тяговой подстанции и в удалении от тяговой подстанции на n -расстоянии.

На основе проделанного эксперимента можно сделать вывод о правомерности основных исходных предпосылок и допущений в разработанной математической модели переходного сопротивления рельсовый путь — безбалластное основание — земля, а также о значимости величины разности потенциалов составляющих путевой призмы на линиях ВСМ. На основную часть математической модели рельсовый путь — безбалластное основание приходится большая доля падения напряжения. Это говорит о том, что напольные устройства, расположенные на строении безбалластного пути, находятся под существенным потенциалом в момент прохода высокоскоростного поезда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савин А. В. Опыт укладки и эксплуатации безбалластного пути LVT // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 2. С. 2–8.
2. Савин А. В., Разуваев А. Д. Сферы применения безбалластного пути // Техника железных дорог. 2016. № 3. С. 32–41.
3. Косарев А. Б., Барч А. В., Розенберг Е. Н. Обеспечение электробезопасности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока для линий ВСМ // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 6. С. 337–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>.
4. Pan Rui, Wu Mingli, Yang Shaobing. Performance of the integrated grounding system of hefei-nanjing passenger dedicated railway [Electronic resource] // 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, 6–7 April 2009: [coll. of articles] / IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348003> (access date: 10.12.2021).
5. Finite element calculation of leakage resistance and distributed capacitance of rail to earth in ballastless track [Electronic resource] / Li Teng [et al.] // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, 18–20 July 2013: [coll. of articles]. http://doi.org/10.1007/978-3-642-53751-6_22.
6. Chawla S., Shahu J. T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Numerical analysis // Geotextiles and Geomembranes. 2016. No. 44. P. 344–357.
7. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987. 279 с.
8. Михайлов М. И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. М.: Связьиздат, 1959. 583 с.

9. Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.

10. Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 348 с.

11. Keller G. V. Dipole method for deep resistivity studies // Geophysics. 1966. Vol. 6, no. 31. P. 1088–1104.

12. ГОСТ 9.602–2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2016 г. № 1327-ст: дата введения 2017-06-01. М.: Стандартинформ, 2016. 92 с.

13. Котельников В. А., Наумов В. А. Обратная тяговая сеть переменного тока при пропуске поездов повышенной массы // Автоматика, телемеханика и связь. 1983. № 4. С. 5–8.

14. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость устройств электропитания систем железнодорожной автоматики с тяговыми сетями // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2004. № 7. С. 31–34.

15. Патент на изобретение № 2251495 Российская Федерация, МПК В60М 3/00. Устройство для снижения электромагнитных влияний электрических железных дорог на линии проводной связи: № 2003101577/11: заявл. 20.01.2003; опубл. 10.05.2005 / Косарев А. Б. [и др.]. 5 с.

REFERENCES

1. Savin A. V. Opyt ukladki i ekspluatatsii bezballastnogo puti LVT [Experience in laying and operating a ballastless LVT track]. *Put' i putevoye khozyaystvo = Railway Track and Facilities*. 2014;(2):2–8. (In Russ.).
2. Savin A. V., Razuvaev A. D. Sfery primeneniya bezballastnogo puti [Spheres of application of the ballastless track]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railway technology*. 2016;(3):32–41. (In Russ.).
3. Kosarev A. B., Barch A. V., Rozenberg E. N. Obespechenie elektrobezopasnosti sistem elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka dlya liniy VSM [Ensuring electrical safety of power supply systems of electrified AC railways for high-speed lines]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2018;77(6):337–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>. (In Russ.).
4. Pan Rui, Wu Mingli, Yang Shaobing. Performance of the integrated grounding system of hefei-nanjing passenger dedicated railway. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, April 6–7, 2009: [coll. of articles] / IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348003> (access date: 10.12.2021).
5. Li Teng, Wu Mingli, He Fan, Song Kejian. Finite element calculation of leakage resistance and distributed capacitance of rail to earth in ballastless track. International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, July 18–20, 2013: [coll. of articles]. http://doi.org/10.1007/978-3-642-53751-6_22.
6. Chawla S., Shahu J. T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Numerical analysis. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016;(44):344–357.
7. Karyakin R. N. Tyagovye seti peremennogo toka [Traction networks of AC]. Moscow: Transport Publ.; 1987. 279 p. (In Russ.).
8. Mikhaylov M. I. Vliyaniye vneshnykh elektromagnitnykh poley na tsepi provodnoy svyazi i zashchitnye meropriyatiya [Influence of external electromagnetic fields on wire communication circuits and protective measures]. Moscow: Svyaz'izdat Publ.; 1959. 583 p. (In Russ.).
9. Kosarev B. I. Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. Moscow: Intext Publ.; 2008. 480 p. (In Russ.).
10. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo

toka [Electromagnetic processes in power supply systems for AC railways]. Moscow: VMG-Print; 2015. 348 p. (In Russ.).

11. Keller G. V. Dipole method for deep resistivity studies. *Geophysics*. 1966;6(31):1088–1104.

12. GOST 9.602–2016. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii [Unified system of corrosion and ageing protection. Underground constructions. General requirements for corrosion protection], data vvedeniya [introduction date] 2017-06-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. 92 p. (In Russ.).

13. Kotelnikov V.A., Naumov V.A. Obratnaya tyagovaya set' perrmennogo toka pri propuske poezdov povyshennoy massy [Reverse traction network of AC when passing trains of increased mass]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz' = Automation, telemechanics and communication*. 1983;(4):5–8. (In Russ.).

14. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv elektropitaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki s tyagovymi setyami [Electromagnetic compatibility of power supply devices for railway automation systems with traction networks]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik = Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2004;(7):31–34. (In Russ.).

15. Kosarev A. B., Semenova E. Yu., Getta Yu. N., et al. Ustroystvo dlya snizheniya elektromagnitnykh vliyaniy elektricheskikh zheleznykh dorog na linii provodnoy svyazi [Device for reducing the electromagnetic effects of electric railways on wired communication lines]. Patent No. 2251495 Rossiyskaya Federatsiya [Russian Federation], MPK B60M 3/00, publ. 10.05.2005. 5 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Борисович КОСАРЕВ, д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Роман Андреевич РУДАШЕВСКИЙ, ведущий специалист, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1135363, <https://orcid.org/0000-0001-6026-2510>

Анна Владимировна РУДАШЕВСКАЯ, заместитель начальника, ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1072959, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6950>

Павел Игоревич СМОЛИН, руководитель проектов, ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 5578-1739, <https://orcid.org/0000-0002-9555-5492>

Илья Алексеевич РЕБРОВ, заместитель директора ЦЭТ, начальник ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1029015, <https://orcid.org/0000-0003-4811-7155>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, First Deputy General Director of JSC “VNIIZhT”, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Roman A. RUDASHEVSKIY, Leading Specialist, Scientific Center “Electrification and Thermal Power Engineering” (TsET), JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 1135363, <https://orcid.org/0000-0001-6026-2510>

Anna V. RUDASHEVSKAYA, Deputy Head, TsNTKE, JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 1072959, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6950>

Pavel I. SMOLIN, Project Manager, TsNTKE, JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 5578-1739, <https://orcid.org/0000-0002-9555-5492>

Il'ya A. REBROV, Deputy Director of CET, Head of TsNTKE, JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 1029015, <https://orcid.org/0000-0003-4811-7155>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Борисович КОСАРЕВ. Разработка концепции статьи, формулирование целей, задач, структуры подачи материала, формирование заключительной части (40%).

Роман Андреевич РУДАШЕВСКИЙ. Выполнение расчета потенциала на поверхности земли под осью рельсового пути, построение математической модели (15%).

Анна Владимировна РУДАШЕВСКАЯ. Описание особенностей безбалластной конструкции строения железнодорожного пути, ее преимуществ и областей применения (15%).

Павел Игоревич СМОЛИН. Методология экспериментального определения переходного сопротивления рельсовый путь — земля, описание практических измерений и параметров (15%).

Илья Алексеевич РЕБРОВ. Участие в построении математической модели верхнего строения пути, формирование заключительной части (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV. Formulation of the article idea, goals, objectives, structure of the presentation of the material, formation of the final part (40%).

Roman A. RUDASHEVSKIY. Performing the calculation of the potential on the subgrade surface under the axis of the rail track, building a mathematical model (15%).

Anna V. RUDASHEVSKAYA. Description of the features of the ballastless design of the structure of the railway track, its advantages and areas of application (15%).

Pavel I. SMOLIN. Methodology for the experimental determination of the rail-to-earth transition resistance, description of practical measurements and parameters (15%).

Il'ya A. REBROV. Participation in the construction of a mathematical model of the upper structure track, the formation of the final part (15%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15.12.2021, первая рецензия получена 20.12.2021, вторая рецензия получена 10.01.2022, принята к публикации 02.02.2022.

The article was submitted 15.12.2021, first review received 20.12.2021, second review received 10.01.2022, accepted for publication 02.02.2022.