

Ресурсосберегающие технологии при проектировании, строительстве и эксплуатации заземлителей в системах ЖАТ



А. М. Костроминов,
доктор техн. наук,
профессор кафедры
«Электрическая
связь» Петербургского
государственного
университета путей
сообщения (ПГУПС)



О. Г. Евдокимова,
аспирант ПГУПС

Одним из стратегических направлений научно-технического развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. является совершенствование систем управления и обеспечения безопасности движения поездов, предусматривающее в том числе повышение эффективности работы систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Заземляющее устройство – один из неотъемлемых элементов СЖАТ, гарантирующий стабильность работы всей системы и электробезопасность обслуживающего персонала.

Масштабное обновление СЖАТ в настоящее время требует модернизации заземляющих устройств (ЗУ), особенно в той проводящей части, которая находится в электрическом контакте с землей (заземлитель). Применяемые при проектировании СЖАТ типовые решения и конструкции заземлителей обладают рядом недостатков:

- не обеспечивают сезонную стабильность нормируемой величины сопротивления ЗУ;
- отличаются высокой металлоемкостью;
- требуют высоких трудозатрат при монтаже;
- не удовлетворяют требованиям устойчивости к коррозии;
- затрудняют визуальный контроль их технического состояния;

- не позволяют оперативно наращивать число заземляющих электродов при ухудшении их электрических характеристик.

Как следствие, на ремонт и обслуживание сотен тысяч существующих заземлителей, а также на строительство новых требуются значительные затраты. Поэтому необходимо разрабатывать методы и средства, позволяющие повысить эффективность заземлителей в части их ресурсосберегающих свойств.

Особенности заземления СЖАТ

Существует ряд специфических особенностей организации заземления СЖАТ, а именно:

- СЖАТ обладает малыми токами короткого замыкания на землю в подсистеме внешнего электроснабжения, что обуславливает сравнительно высокие нормативы на допустимые сопротивления заземлений (4 Ом);
- многочисленные кабели и цепи, расположенные радиально относительно заземлителя СЖАТ, непреднамеренно соединяют его с удаленной землей, в том числе с рельсами с их высокой электропроводностью, и подвержены гальваническому влиянию, обусловленному протеканием в земле обратных тяговых токов.

Опыт показывает, что проблемы, возникающие при эксплуатации СЖАТ в управлении процессом перевозок, зачастую обусловлены сопротивлением ЗУ, превышающим нормативное значение ($R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом}$).

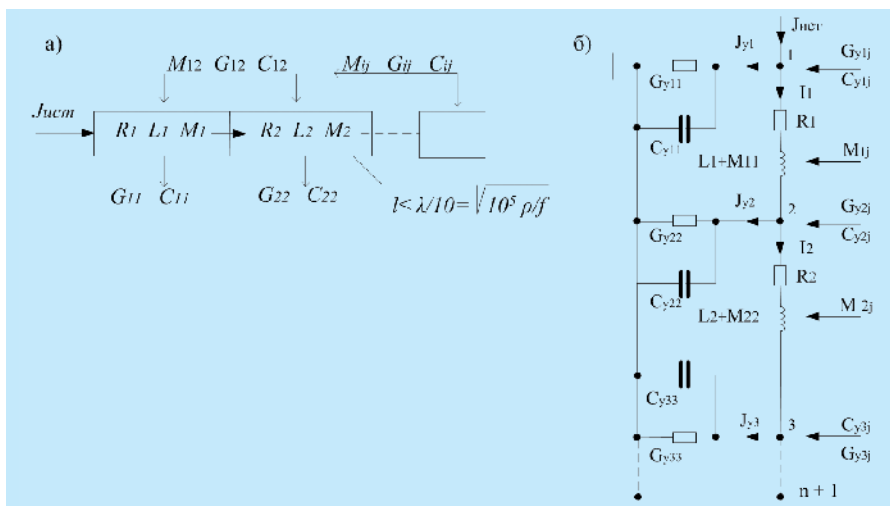


Рис. 1. Модель элемента стержневого заземлителя: а – полевая, б – цепная

Анализ известной теории и методов расчета заземляющих устройств дает основания для вывода, что наиболее адекватным инструментом для моделирования заземлителей СЖАТ является цепно-полевая модель (ЦПМ), разработанная профессором С. Л. Шишигиным [1].

Анализ топологий заземлителей

Рассмотрим применение ЦПМ для определения параметров заземлителей СЖАТ различных топологий в произвольных геологических условиях.

В ЦПМ заземлителя для определения сопротивлений, индуктивностей, емкостей элементов заземлителя используется полевая модель (рис. 1а). Входное сопротивление, потенциалы элементов заземлителя, продольные и стекающие токи элементов определяются аппаратом теории цепей по цепной модели (рис. 1б) после переноса на нее найденных электромагнитных параметров. На основе полученных токов по полевой модели рассчитываются распределение потенциала и напряженности электрического и магнитного поля.

В полевой модели заземлителя электрические и магнитные связи между элементами заземлителя представляются в виде квадратных матриц проводимостей G , емкостей C и индуктивностей M . При нахождении обратной квадратной матрицы активных сопротивлений элементов получается матрица проводимостей $G = R^{-1}$. Инверсией матрицы потенциальных коэффициентов определяется матрица емкостей $C = \alpha^{-1}$.

Для учета влияния границы раздела двух сред применяется метод зеркальных изображений.

Взаимная индуктивность элементов описывается следующим выражением:

$$M_{ij} = \Psi_{ij} / I_j,$$

где Ψ_{ij} — потокосцепление i -го стержня, создаваемое током j -го стержня.

Принимая во внимание аналогию со стационарными полями, для нахождения элементов матрицы взаимной индуктивностей M и матрицы потенциальных коэффициентов α достаточно рассчитать матрицу сопротивлений R , и повторных расчетов не требуется.

Цепная модель описывает схему с симметричными П-образными четырехполюсниками с продольными сопротивлениями и поперечными проводимостями. Для определения GC -параметров элементов ЗУ в узлах П-четыреполюсников ЦПМ производится преобразование матриц G, C , найденных методами теории поля в средних точках элементов, в узловые матрицы G_y, C_y из условия неизменности стекающего тока элементов

$$G_y = B \cdot G \cdot B^T, C_y = B \cdot C \cdot B^T,$$

где A — матрица соединений, описывающая топологию продольных ветвей ЗУ;

B — связанная с A матрица ($b_{ij} = |a_{ij}|/2$), позволяющая связать стекающие токи элементов J с поперечными токами J_y узлов четырехполюсников $J_y = B \cdot J$, а также потенциалы средних точек элементов ϕ с потенциалами U узлов четырехполюсников $\phi = B^T \cdot U$.

При воздействии источников синусоидального тока расчет модели стержневого заземлителя (рис. 1) выполняется одним из методов расчета электрических цепей — методом узловых потенциалов. Тогда система узловых уравнений имеет следующее матричное представление:

$$(AZ^{-1} \cdot A^T + B \cdot Y \cdot B^T) \cdot U = J_{ист},$$

где $Z = R + j\omega(L + M)$ — матрица продольных сопротивлений ветвей;

$Y = G + j\omega C$ — матрица поперечных проводимостей элементов;

U — искомый вектор потенциалов узлов;

$J_{ист}$ — вектор задающего тока источника.

Потенциалы узлов U , стекающие J и продольные токи I определяются согласно выражениям:

$$J = Y \cdot B^T \cdot U, I = Z^{-1} \cdot A^T \cdot U.$$

Описание геометрии ЗУ СЖАТ в ЦПМ в матричной форме позволяет рассчитывать произвольные трехмерные конструкции.

Важно отметить, что допущение ЦПМ о том, что заземлитель состоит из элементов круглого сечения, не препятствует ее применению для решения задач настоящей работы, поскольку все характерные элементы системы заземления СЖАТ можно моделировать стержнями эквивалентного диаметра.

Используя ЦПМ, выполним анализ условий, влияющих на значение сопротивления заземления, таких как методы предпроектных изысканий грунта, непостоянство удельного сопротивления грунта в зависимости от сезонных атмосферных и климатических условий, геометрические параметры и топология заземлителя [2]. При этом для расчета параметров ЗУ СЖАТ с помощью ЦПМ воспользуемся программой ЗУМ (разработана С. Л. Шишигиным), реализующей автоматизированный расчет на базе Autocad-совместимых систем и Mathcad.

Полученные результаты (рис. 2) показывают, что вертикальный стержневой заземлитель СЖАТ длиной $H = 7,5$ м на различной глубине укладки

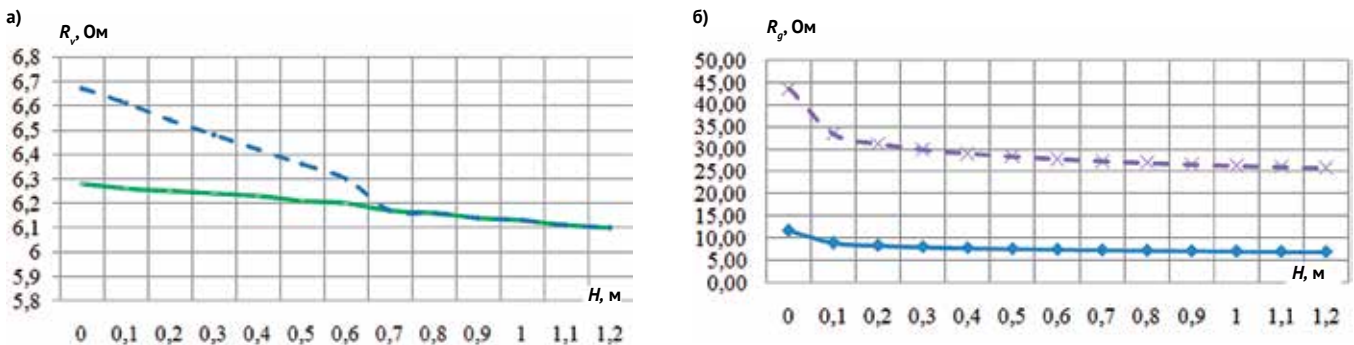


Рис. 2. Зависимость сопротивления: а — R_v , вертикального, б — R_g , горизонтального заземлителя от глубины H ; тип грунта — суглинок
 — R_v , суглинок увлажненный $\rho_1 = \rho_2 = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при T выше $0 \text{ }^\circ\text{C}$)
 — R_v , суглинок промерзший $\rho_1 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при $T = -5 \text{ }^\circ\text{C}$),
 $\rho_2 = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при T выше $0 \text{ }^\circ\text{C}$)
 — R_g , суглинок увлажненный $\rho_1 = \rho_2 = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при T выше $0 \text{ }^\circ\text{C}$)
 — R_g , суглинок промерзший $\rho_1 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при $T = -5 \text{ }^\circ\text{C}$)

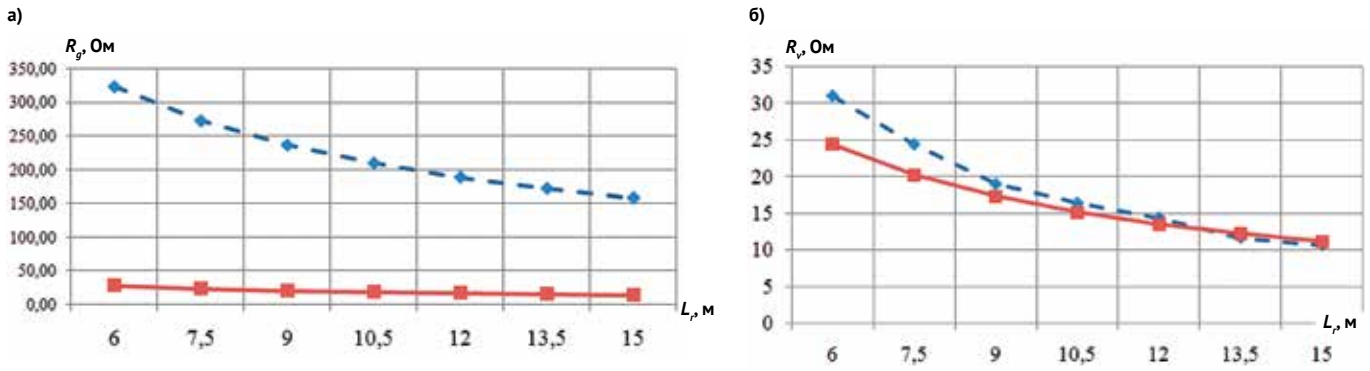


Рис. 3. Зависимость сопротивления заземления от длины электрода L: а – горизонтальный, б – вертикальный электрод
 — R_g , песок $\rho_1 = 1500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_2 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$
 — R_g , песок влажный $\rho_1 = \rho_2 = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (при T выше 0°C)

(расстояние от поверхности земли до заземлителя) от 0 до 1,2 м обеспечивает меньшее в отличие от аналогичного горизонтального значение сопротивления заземления при сезонном увеличении удельного сопротивления грунта на глубину до 0,7 м.

Важно отметить, что граница раздела двух сред земля – воздух, которая практически не влияет на растекание тока из вертикального стержня, мешает току растекаться из горизонтального стержня, поэтому увеличение H при малых глубинах сильнее сказывается на снижении сопротивления горизонтального стержня.

Анализ результатов исследования (рис. 3) показывает, что увеличение длины горизонтальных и вертикальных заземлителей снижает влияние сезонных изменений параметров грунта на значение сопротивления заземления. При этом можно оценить длину электрода, наращивание которой (для принятого в примере типа грунта – песок, 12 м) с точки зрения снижения сопротивления неэффективно (рис. 3б). Для

подтверждения результатов моделирования (рис. 3б) были проведены натурные испытания модульно-стержневого заземлителя типа МСЗ-16 вблизи поста электрической централизации (ЭЦ) станции Сестрорецк, где параметры грунтов схожи с принятыми при расчете. Полученные результаты согласуются с теоретическими (длина вертикального заземлителя составляет 12 м) и указывают на то, что точечные глубинные вертикальные МСЗ позволяют достигать слоев грунта, не подверженных температурным колебаниям, при этом не требуют больших площадей для монтажа, обладают большей технологичностью установки по сравнению с существующими методами и средствами заземления в СЖАТ.

Выполненные исследования зависимости значения сопротивления заземления от топологии заземлителя СЖАТ (рис. 4) показывают, что для горизонтального заземлителя двухлучевая ($n_n = 2$, где n_n – число горизонтальных лучей) топология наиболее рациональна, причем при длине луча заземлителя

более 10 м начинают сказываться его собственное сопротивление и индуктивность.

Для оценки степени снижения значения сопротивления заземляющего устройства из горизонтальных R_g заземлителей при добавлении вертикальных $R_{г,в}$ введен коэффициент K_b :

$$K_b = R_{г,в} / R_g.$$

Анализ результатов исследования показал, что сопротивление заземления снижается с увеличением длины вертикальных электродов L_b относительно длины горизонтальных лучей ($n_n L_n$).

При одинаковой металлоемкости вертикальных заземлителей и фиксированном относительном расстоянии между смежными электродами (a/L_b) эффективнее использовать более длинные заземлители (рис. 5). Под металлоемкостью в данном случае понимается объем металла, расходуемого на стержневые вертикальные заземлители радиусом r , длиной L_b в количестве n_b , которое требуется установить в 2-, 3- или 4-лучевую горизонтальную топологию ЗУ для достижения K_b .

В современных нормативных и руководящих документах отсутствуют рекомендации по расположению глубинных вертикальных заземлителей (длиной более 5 м) друг относительно друга. Нами была установлена функциональная связь относительного расстояния между вертикальными заземлителями a/L_b и их длины L_b . Выявлено, что одно и то же значение коэффициента эффективного использования k вертикальных стержней соответствует разным относительным расстояниям a/L_b между глубинными и короткими заземлителями (рис. 6).

Для наглядности обоснования рациональности перехода от традици-

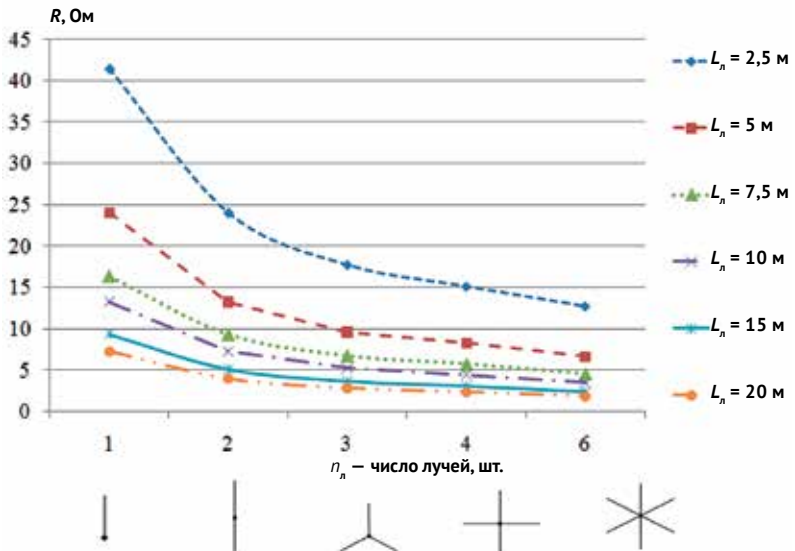


Рис. 4. Зависимость сопротивления горизонтальных заземлителей от количества и длины лучей

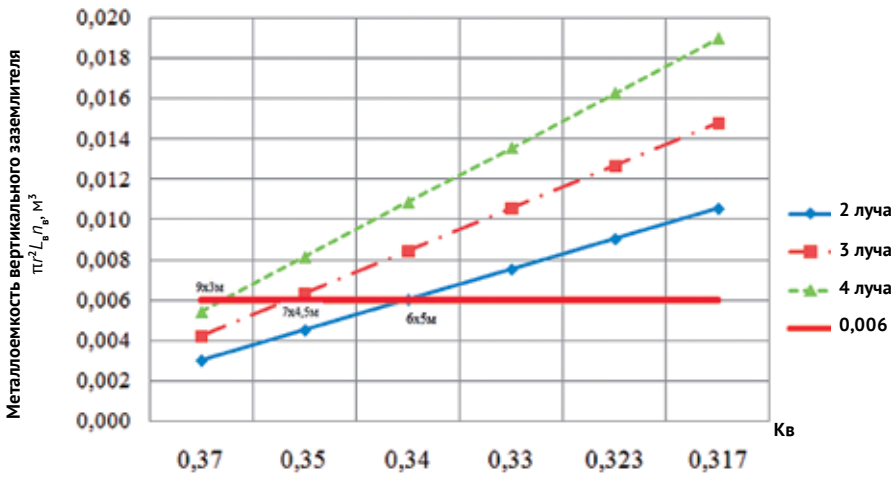


Рис. 5. График зависимости K_b от металлоемкости при $a/L_b = 0,5$

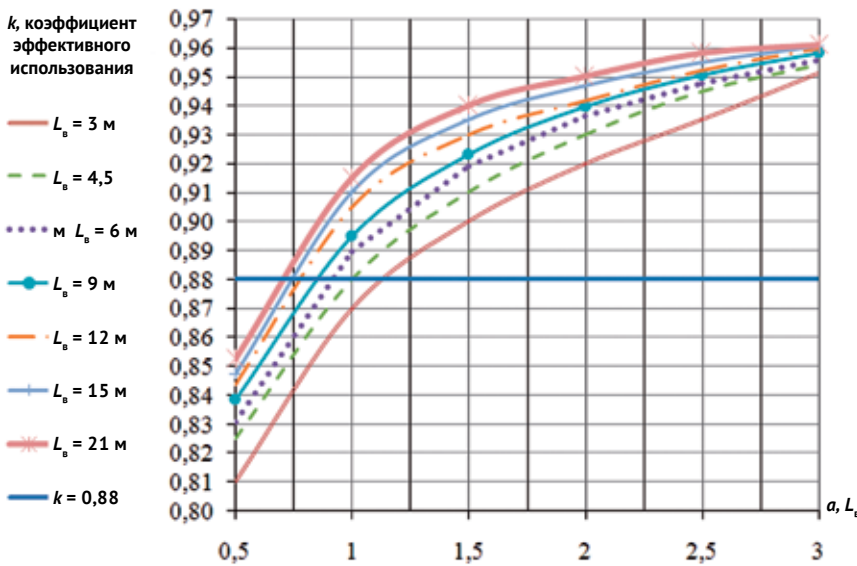


Рис. 6. График зависимости k от a/L_b в грунте 100 Ом·м

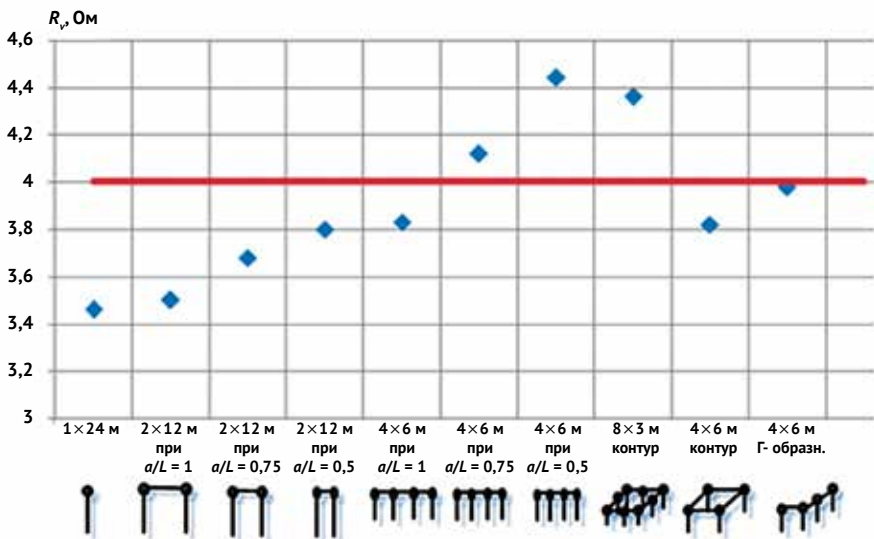


Рис. 7. Зависимость сопротивления заземления от топологии заземлителя

онных контурных конструкций заземлителей устройств ЖАТ к точечным глубинным стержневым на рис. 7 показана зависимость сопротивления за-

земления от топологий заземлителей поста ЭЦ в двухслойном грунте с удельным сопротивлением верхнего слоя $\rho_1 = 100$ Ом·м, толщиной верхнего слоя

$h_1 = 0,25$ м, удельным сопротивлением нижнего слоя $\rho_2 = 60$ Ом·м.

Совершенствование модульно-стержневых конструкций заземлителей

Недостатки существующих конструкций МСЗ связаны с видом соединения стержней между собой и с антикоррозийным покрытием.

Наиболее распространенное соединение с помощью резьбовой муфты не только затрудняет заглубление заземлителей из-за дополнительного сопротивления погружению (навинчиваемая на концы соединяемых стержней муфта имеет больший диаметр по сравнению с диаметром стержней), но и не обеспечивает надежности соединения стержней, поскольку используемый для погружения стержней ударный инструмент (в частности, перфоратор) нарушает резьбу.

Вместо резьбовой муфты предлагается конструкция сочленения стержней заземлителя с помощью расклинивающей вставки [3]. Эта конструкция обеспечивает, в отличие от существующих видов соединений, надежный электрический контакт между отдельными стальными стержнями благодаря повышению стойкости соединения таких стержней к изломам при погружении в грунт (рис. 8).

Для обеспечения минимального лобового сопротивления грунта при заглублении модульно-стержневых за-

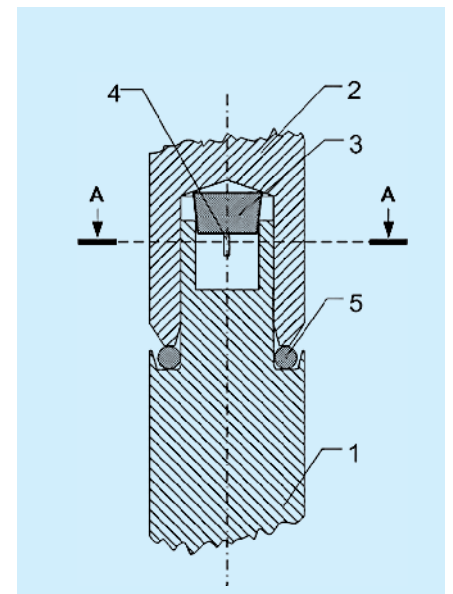


Рис. 8. Разработанное механическое сочленение стержней. 1 – первый заглубляемый стержень, 2 – верхний стержень, 3 – расклинивающая вставка, 4 – диаметральный разрез шейки стержня, 5 – уплотняющее кольцо

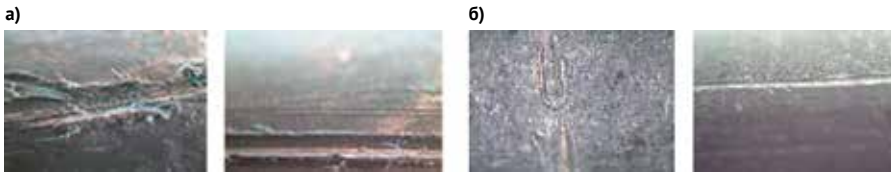


Рис. 9. Повреждения на поверхности стержней МСЗ:

а – омедненных, б – оцинкованных с использованием термодиффузионной технологии

землителей разработана математическая модель, позволяющая определять оптимальный угол заострения $\alpha_{\text{опт}}$ наконечника стержневого заземлителя при известном угле трения о грунт ϕ [4]:

$$2\text{tg}\alpha = \sin 2(\alpha + \phi).$$

Применение наконечника с оптимальным углом заострения 68° обеспечивает более высокую технологичность заглубления МСЗ, сокращая время, затрачиваемое на погружение стержней, и снижая потребление электроэнергии перфоратором.

В качестве антикоррозионного покрытия стержней широко применяется медь [5]. В грунтах вблизи железнодорожного полотна присутствуют щебень, куски бетона, другие опасные для этого покрытия МСЗ объекты, поэтому в качестве альтернативы медному предлагается цинковое покрытие, выполненное по термодиффузионной технологии. Для сравнения травмоустойчивости этих двух типов антикоррозионного покрытия проведено экспериментальное испытание в реальном грунте, поверхностный слой которого содержал щебенку, перемешанную с землей. Полученные при этом повреждения покрытий показаны на рис. 9. Точные измерения показали, что механическая прочность исследуемого цинкового покрытия при заглублении заземлителей в 3 раза выше медного. Учитывая влияние собственных электродных потенциалов металлов на их взаимодействие с грунтом, термодиффузионное цинковое покрытие можно оценить как несомненно более эффективное для снижения интенсивности коррозионного процесса заземлителей систем ЖАТ.

Рассмотрим конкретные примеры повышения эффективности заземляющих устройств с помощью перечисленных методов.

Для модульного поста ЭЦ на станции Арабатук Забайкальской железной дороги в грунте с большой глубиной сезонного промерзания до 4,2 м выпол-

нен сравнительный расчет двух вариантов заземлителей: с использованием угловой стали (традиционный способ) и с применением МСЗ. В обоих случаях ЗУ рассматриваемого поста ЭЦ должно обеспечивать значение R_n не более 4 Ом при переменном токе 50 Гц и наихудших свойствах грунта.

Результаты моделирования, проведенного с помощью ЦПМ и программы ЗУМ, показали, что оптимальная длина проектируемого вертикального заземлителя составляет 9 м. Это подтверждает большую эффективность способа заземления с применением МСЗ по сравнению с уголковыми: стабильное значение сопротивления заземлителя поста ЭЦ с 10 МСЗ длиной 9 м на 1 Ом меньше, чем с 44 уголковыми конструкциями длиной 3 м, при этом расход металла снижен в 12,9 раза.

Также выполнены аналогичные расчеты для модульного поста ЭЦ на станции Кирсанов Юго-Восточной железной дороги, отличающейся от рассмотренной в предыдущем примере меньшей глубиной промерзания грунта. Средняя глубина сезонного промерзания грунта на предполагаемой территории строительства поста ЭЦ составляет 2 м, а ниже 3 м расположены водоносные пески с низким удельным сопротивлением грунта, что характерно для обширной территории России. Поэтому разработка технического решения для оборудования данного поста ЭЦ заземлением может лечь в основу типового проектирования.

Результаты моделирования заземлителей с использованием ЦПМ и ЗУМ показывают, что установка только одного МСЗ длиной 6 м вместо четырех уголковых заземлителей длиной 2,5 м с горизонтальным контуром по периметру поста позволила достичь нормируемого значения R_n , обеспечив снижение расхода металла в 11,8 раза.

Выводы

- Предложенный метод сравнения топологий заземлителей с помощью

ЦПМ позволяет еще на этапе проектирования определить оптимальный по критерию минимального расхода металла вариант, решающий задачу ресурсосбережения.

- Для повышения надежности и ресурсосберегающих свойств модульно-стержневых заземлителей рекомендуется соединять стержни заземлителя с помощью расклинивающей вставки, а наконечник изготавливать в виде кругового конуса с оптимальным углом заострения 68° , что повышает производительность работ по заглублению и обеспечивает минимум усилий при его погружении в грунт.

- Антикоррозионное покрытие стержней МСЗ, выполненное по технологии термодиффузионного цинкования, обладает повышенной травмоустойчивостью, что в условиях погружения заземлителей в грунты с примесью щебенки гарантирует длительный срок службы покрытия и, как следствие, сохранение стабильного сопротивления заземления. Благодаря этому реже возникает потребность в ремонте заземлителя, а технологию термодиффузионного цинкования можно отнести к категории ресурсосберегающих. ■

Литература

1. Шишигин С. Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Третья Рос. конф. по заземляющим устройствам: сб. докл. Новосибирск: Сибирск. энергетич. академия, 2008. С. 29–38.
2. Костроминов А. М., Евдокимова О. Г. Модели заземляющих устройств в системах обеспечения движения поездов // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 138–142.
3. Пат. 103424 РФ, МПК Н 01 R 4/66. Заземлитель / Громов О. И., Иващенко В. Б., Каменев А. А., Костроминов А. А., Костроминов А. М., Насонов Г. Ф., Соседов Ю. К., Шабалин А. Н., Шершакова (Евдокимова) О. Г.; опубл. 10.04.2011. Бюл. № 10.
4. Шершакова (Евдокимова) О. Г. Оптимальный угол раскрытия наконечника модульно-стержневого заземлителя // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. 2011. Вып. 3 (28). С. 217–226.
5. Зингер М. Б. Заземляющие устройства и средства их контроля. Какими им быть? // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 12. С. 9–12.