

УДК 621.331.3.025.1

## Повышение эффективности заземления устройств контактной сети на участках переменного тока

И. А. Кремлев<sup>1</sup>, Е. Ю. Салита<sup>1</sup>, И. А. Терехин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, К. Маркса пр., 35

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Кремлев И. А., Салита Е. Ю., Терехин И. А. Повышение эффективности заземления опор контактной сети на участках переменного тока // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 106–118. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-106-118

### Аннотация

**Цель:** Дать обоснование способам повышения эффективности работы устройств заземления и улучшения электробезопасности при эксплуатации участков железной дороги переменного тока благодаря изменению способов заземления опор контактной сети. **Методы:** Аналитически дана оценка рассматриваемым техническим решениям с точки зрения обеспечения электробезопасности и электромагнитной совместимости; путем имитационного моделирования проведен сравнительный анализ существующей и альтернативной систем заземления; расчетным путем получены оптимальные значения сопротивлений растеканию групп опор контактной сети. **Результаты:** В тексте рассмотрены аспекты воздействия аварийных режимов короткого замыкания на безопасность работников во время эксплуатации и обслуживания устройств контактной сети при различных вариантах заземления опор. Были разработаны модели различных систем заземления для проведения сравнительного анализа их эффективности с использованием программы MatLab — Simulink, а также выполнены расчеты необходимых значений сопротивления растеканию для групп опор. **Практическая значимость:** Преднамеренный отказ от соединения заземляющих спусков опор контактной сети с рельсами позволит снизить расходы на обслуживание и содержание заземляющих устройств. Полученные результаты могут быть использованы при организации эксплуатации разземленных от рельса участков тяговой сети переменного тока.

**Ключевые слова:** Контактная сеть, переменный ток, заземление, трос группового заземления, сопротивление растеканию, электробезопасность, разземленные опоры, релейная защита, распределение потенциала.

### Введение

В настоящее время эксплуатируется пилотный опытный участок тяговой сети (ТС) на Западно-Сибирской железной дороге, опоры контактной сети (КС) которого были преднамеренно отсоединены от рельсов. Положительный опыт длительной эксплуатации показал, что в результате данного технического решения на указанном участке полностью были исключены отказы, связанные с эксплуатацией рельсовых цепей, а также снижены эксплуатационные расходы на

поддержание в необходимом состоянии устройств заземления. Вышеуказанные факты, а также иные гипотезы, нашедшие подтверждение при моделировании, дают повод говорить о внедрении подобных решений на всей протяженности ТС переменного тока.

Одной из основных причин соединения защитного заземления опор КС, которое не находится под напряжением в нормальном режиме эксплуатации, с тяговыми рельсами, является повышение чувствительности релейных защит (РЗ) фидеров, питающих КС [1]. В то же время необходимо учитывать тот факт, что наличие короткого замыкания (КЗ) в ТС, когда существует электрическое соединение опор с рельсами, аварийный ток посредством троса группового заземления (ТГЗ) поступает сразу в рельсовую сеть. Это приводит к появлению недопустимо высоких потенциалов, которые в ряде случаев могут превышать допустимые значения с точки зрения электробезопасности и электромагнитного влияния на прокладываемые параллельно железнодорожному полотну кабельные линии связи. Формируемая зона выноса потенциала может распространяться вдоль рельсовой сети в обе стороны от точки КЗ на сотни метров, что приводит к появлению высоких напряжений на устройствах, которые по условиям их работы должны иметь соединение с рельсами. Этот процесс, например, может вызывать многократные пробой искровых промежутков (ИП) неповрежденных групп опор, приводя к выходу их из строя [2].

Негативный эффект от соединения опор с рельсами также проявляется в том, что при обслуживании устройств КС электромонтер, находящийся на опоре, имеющей заземление на рельс через ИП, находится под потенциалом, близким к потенциалу удаленной земли. В режиме КЗ ИП может быть пробит в обратном направлении, и монтер попадет под разность потенциалов ( $U_{\pi}$ ) между ТГЗ (или рельсом) и опорой (землей). Попадание под такой потенциал возможно и в случае нарушения изоляции КС.

Исключить указанные недостатки можно, если отказаться от глухого соединения элементов контактной сети с рельсами.

### **Исследование процессов при различных способах заземления опор**

В случае отсутствия металлического соединения опор КС с тяговыми рельсами при возникновении КЗ зона выноса потенциала будет ограничиваться только несколькими метрами в зоне стекания тока с опор в землю, а следовательно, выноса опасного потенциала вдоль рельсовой сети наблюдаться не будет.

Также важно отметить, что в случае нарушения изоляции КС ее высокий потенциал, естественно, попадает на ТГЗ за счет его металлической связи с КС, однако за счет организованной гальванической связи между ТГЗ и арматурой опор одновременно с потенциалом ТГЗ будет расти и потенциал опоры, на которой

находится электромонтер, а следовательно, разности потенциалов возникать не будет. В связи с этим и ТГЗ, и работник будут находиться под одним и тем же потенциалом, поражения электрическим током не произойдет.

Таким образом, с точки зрения обеспечения безопасности система с разземленными опорами является более предпочтительной по сравнению с эксплуатируемой повсеместно.

Необходимо учитывать и изменение условий влияния контактной сети на смежные устройства при различных видах заземления.

Влияющая цепь электрической железной дороги представляет собой контур, который включает тяговую подстанцию, электроподвижной состав (ЭПС) и ТС. Напряжение в ТС соответствует рабочему напряжению переменного тока, а ток в земле, являющейся частью ТС и обеспечивающей параллельное протекание тока, может быть сопоставим с рабочим током. Известно, что ТС в значительной мере асимметрична и значительно влияет на соседние цепи. Изначально цепь, находящаяся под воздействием этого влияния, называется смежной. Положение влияющей и смежной линии, при котором могут возникнуть опасные и помеховые воздействия, обозначается как сближение, а расстояние между линиями, измеряемое перпендикулярно к влияющей линии, называется шириной сближения [3].

Напряжение, приложенное к линии, и ток, протекающий в ней, создают электрическое и магнитное поля в окружающем пространстве. Магнитное поле формируется током, проходящим по проводу, в то время как электрическое поле возникает из-за напряжения, приложенного к цепи «провод — земля».

Если около цепи «провод — земля» с действующим переменным напряжением и током разместить другую цепь, то под влиянием электрической и магнитной индукции в ней возникнут индуцированные напряжение и ток, а также будет протекать ток, обусловленный наличием земли в рассматриваемых электрических цепях. Влияющей называют электрическую цепь, в которой действует переменное напряжение и протекает переменный ток, а цепь, в которой индуцируются напряжение и ток, называют электрической цепью, подверженной влиянию.

Причиной, вызывающей влияние одной электрической цепи на другую, является наличие между проводами этих цепей емкостной и магнитной связи.

Для определения наведенных на ТГЗ потенциалов была разработана имитационная модель стандартной системы заземления, которая представлена на рис. 1. Максимальная длина ТГЗ ограничивается максимально допустимыми значениями наведенных потенциалов на нем. Однако максимальное значение напряжения в нормальном режиме работы согласно [4, 5] должно быть меньше или равно 2,0 В. Поэтому длина ТГЗ в приведенной системе должна составлять не более 400 м в случае Т-образной схемы [6].

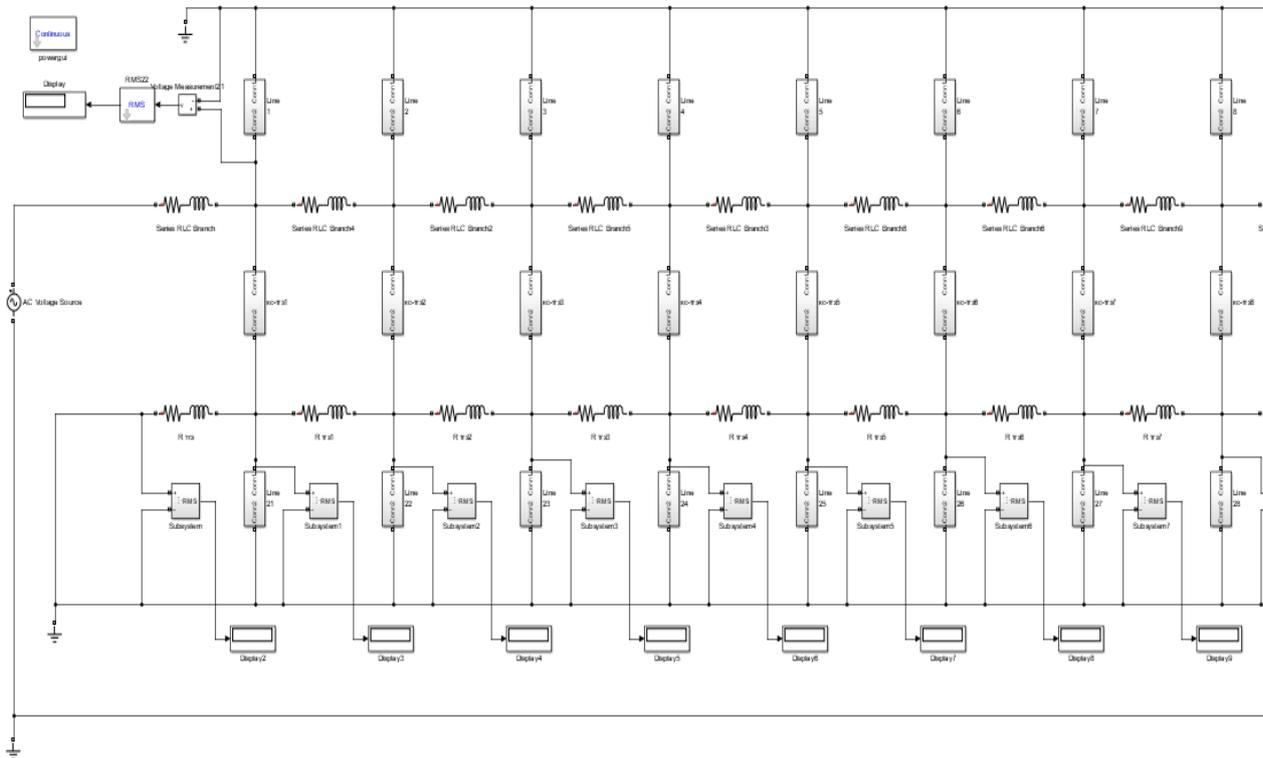


Рис. 1. Модель обычной системы заземления (на рельсовую цепь)

Результатом моделирования стала качественная диаграмма распределения потенциала вдоль всей длины ТГЗ в нормальном режиме эксплуатации (рис. 2), исходя из которой можно сделать следующие выводы:

1. Величина наведенного напряжения прямо пропорциональна длине ТГЗ.
2. При длине плеча ТГЗ, равной 200 м, наведенное напряжение достигает значение в 1,6 В.

Очевидным является вывод о том, что дальнейшее увеличение количества опор в группе невозможно.

Далее рассчитаем значение наведенного тока посредством электрического влияния в соответствии с выражением:

$$I_2 = Y_{(1-2)} U_1 l, \tag{1}$$

где  $U_1$  — напряжение в контактной сети, принимаем 25 кВ;  
 $Y_{(1-2)}$  — модуль полной взаимной проводимости между однопроводными линиями, являющийся параметром электрического влияния, Ом.

Для того чтобы найти ток, возникающий из-за электрического влияния, необходимо определить емкость между влияющим и подверженным влиянию проводниками. Ее можно определить через собственные ( $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{22}$ ) и взаимные ( $\alpha_{12}$  и  $\alpha_{21}$ ) потенциальные коэффициенты, которые характеризуются геометрическими размерами линий, их геометрическим расположением в пространстве и свойствами окружающей среды [3, 7]. Схема для их расчета приведена на рис. 3.

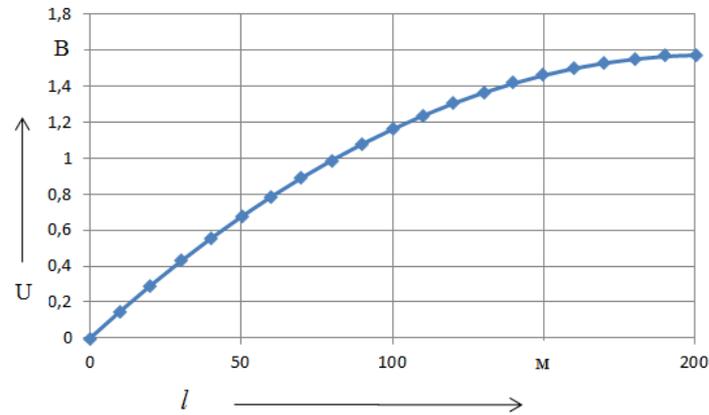


Рис. 2. Качественная диаграмма распределения потенциала по длине ТГЗ

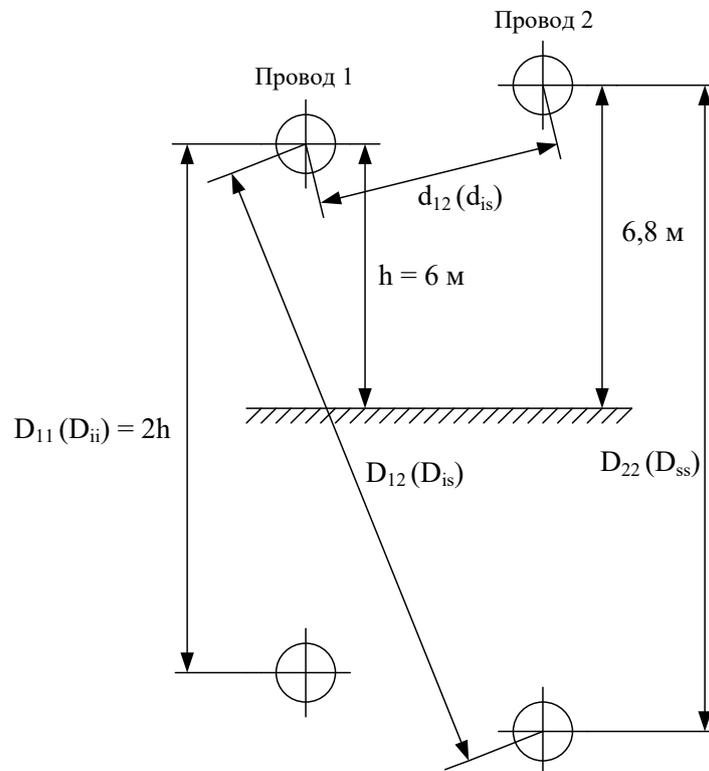


Рис. 3. Схема для расчета потенциальных коэффициентов

Потенциальные коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$\alpha_{11} = \ln \left( \frac{D_{11}}{r_{11}} \right); \quad (2)$$

$$\alpha_{22} = \ln \left( \frac{D_{22}}{r_{22}} \right); \quad (3)$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \ln\left(\frac{D_{12}}{r_{12}}\right), \quad (4)$$

где  $r_{11}$ ,  $r_{22}$  — радиусы соответственно ТГЗ, в рассматриваемом случае используются параметры провода ПБСМ-95 и контактного провода, рассматривается провод марки МФ-100, мм.

Полученные значения коэффициентов приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Значения потенциальных коэффициентов

№ п/п	Потенциальный коэффициент	Значение
1	$\alpha_{11}$	7,69
2	$\alpha_{22}$	7,79
3	$\alpha_{12} = \alpha_{21}$	1,19

Межпроводные емкости определяются по следующим формулам:

$$C_{(1-1)} = \frac{1}{k} \left( \frac{\alpha_{22} - \alpha_{12}}{\alpha_{11}\alpha_{22} - (\alpha_{12})^2} \right); \quad (5)$$

$$C_{(2-2)} = \frac{1}{k} \left( \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{\alpha_{11}\alpha_{22} - (\alpha_{12})^2} \right); \quad (6)$$

$$C_{(1-2)} = \frac{1}{k} \left( \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}\alpha_{22} - (\alpha_{12})^2} \right), \quad (7)$$

где  $k$  — коэффициент, равный  $18 \cdot 10^{-6}$  км/Ф.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Значения емкостей между проводами

№ п/п	Емкость между проводами	Значение, Ф
1	$C_{(1-1)}$	$6,27 \cdot 10^{-9}$
2	$C_{(2-2)}$	$6,17 \cdot 10^{-9}$
3	$C_{(1-2)}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$

Модуль полной взаимной проводимости определяется по выражению:

$$Y_{(1-2)} = \sqrt{g_{(1-2)}^2 \alpha + (j \omega C_{(1-2)} \alpha 10^{-3})^2}.$$

В результате вычислений получаем модуль полной взаимной проводимости  $Y_{(1-2)} = 4 \cdot 10^{-5}$ . После чего, подставив полученные значения в выражение (1), получаем значение наведенного тока при электрическом влиянии, равное  $I_2 = 0,2$  А.

В отличие от описанной ранее схемы группового заземления опор, в данной системе альтернативный трос заземляется с обеих сторон в каждом пролете через сопротивление растеканию опоры. Это приводит к тому, что в середине пролета трос оказывается под наибольшим напряжением относительно земли, которое уменьшается по мере приближения к концам троса. Это означает, что величина наведенного напряжения на участке пролета между соседними и заземленными опорами не может достигать установленного норматива в 2 В. Моделирование этой ситуации также проводилось в программе MatLab — Simulink (рис. 4).

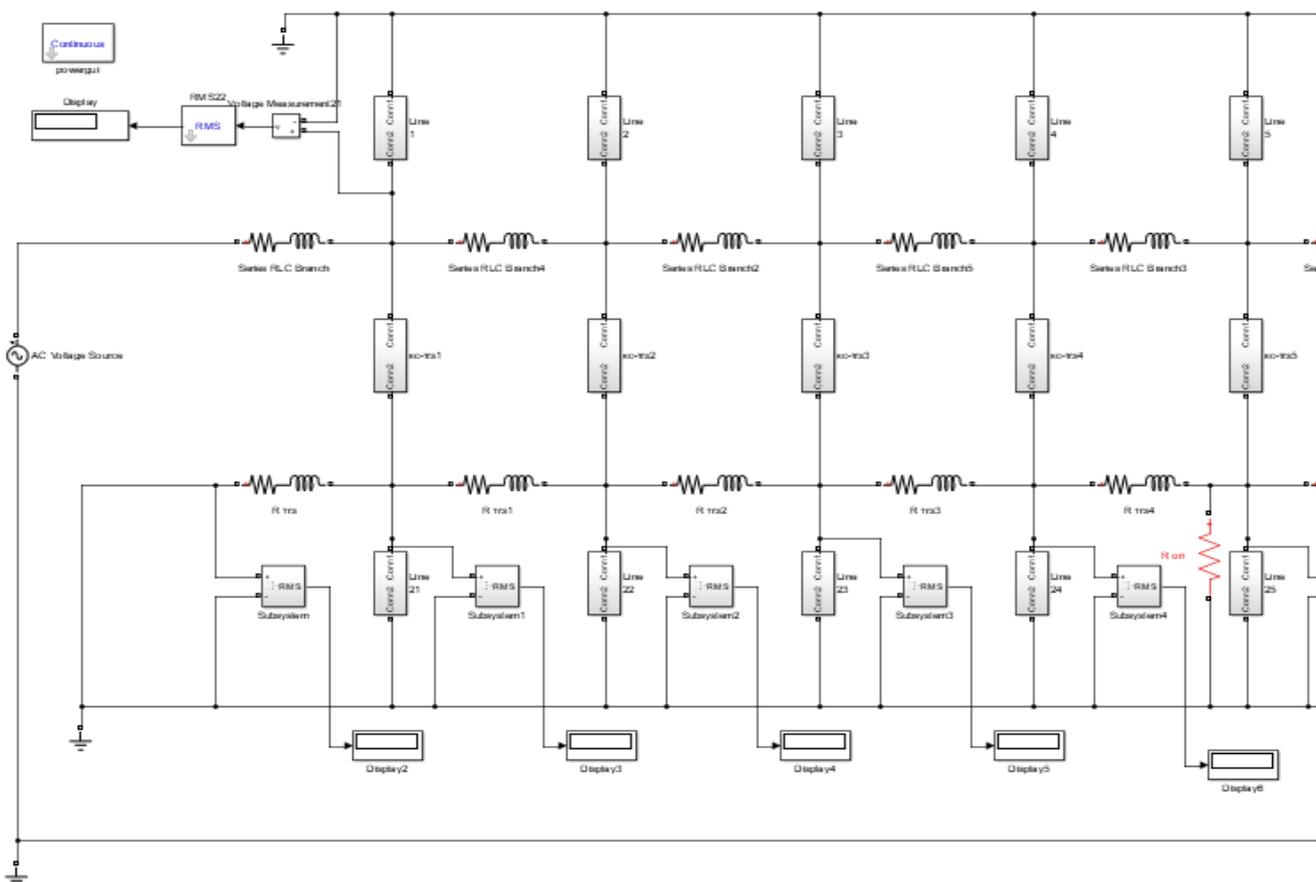


Рис. 4. Модель системы с разземленными опорами

По результатам моделирования получена диаграмма, отражающая характер изменения потенциала вдоль ТГЗ в системе с разземленными опорами (рис. 5). Как видно, полученные значения существенно меньше нормируемых значений, что позволяет гипотетически формировать группы опор, которые могут ограничиваться по длине только длиной блок-участков рельсовых цепей во избежание их случайного шунтирования [8].

Так как в качестве заземлителей в альтернативной системе используются опоры, это накладывает требования и к плотности тока через арматуру в различных режимах работы тяговой сети. Расчет тока показал, что наведенный ток при электрическом влиянии составит 0,05 А. Таким образом, плотность тока в длительном (нормальном) режиме не будет превышать допустимого нормированного значения 1 А/м<sup>2</sup>.

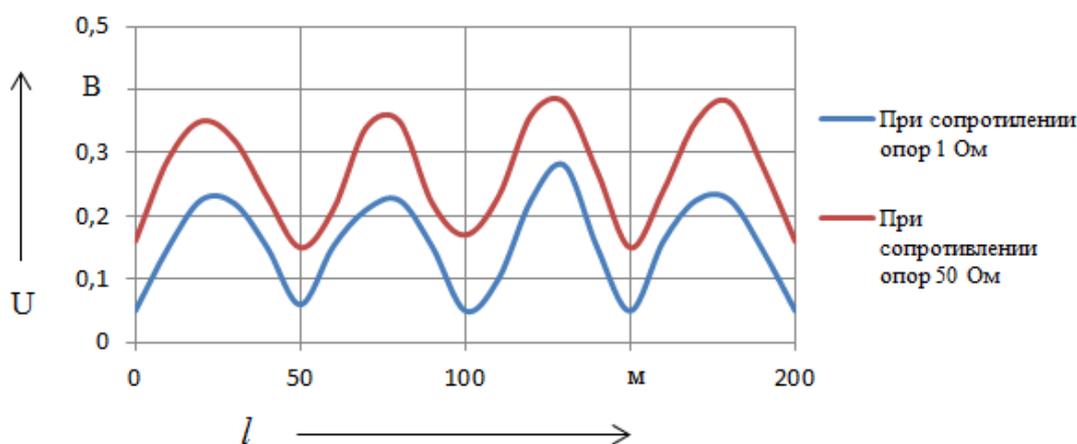


Рис. 5. Диаграмма, отражающая характер изменения потенциала вдоль ТГЗ в системе с разземленными опорами

При переходе к системе с разземленными опорами необходимо учесть и изменение условий функционирования релейной защиты, задачей которой является предотвращать или существенно снижать ущерб от КЗ и ненормальных режимов в ТС [9, 10].

Для обеспечения требуемой чувствительности защит необходимо обеспечение минимального сопротивления в месте возникновения короткого замыкания.

### Определение оптимальных значений сопротивления растеканию опор

Очевидно, что при отказе от соединения опор с рельсами необходимо обеспечить электрическое соединение металлических конструкций опоры КС, которые в нормальном режиме изолированы от КС с арматурой опор КС или с их внутренним спуском заземления, что, в свою очередь, способствует уменьшению сопротивления растеканию тока КЗ с опор до значений, характерных для их фундаментных частей [11]. Объединение подобных опор ТГЗ позволит добиться снижения сопротивления растеканию до значений, при которых будет обеспечиваться надежная работа РЗ, т. е. будет соблюдаться необходимая чувствительность и селективность работы РЗ, а следовательно, необходимо обязательное соблюдение требований к допустимым параметрам, в том числе к максимально допустимому сопротивлению в месте КЗ [12].

Так, сопротивление перехода «группа опор — земля» с учетом дуги не должно превышать значения, определяемого выражением:

$$R_{\Pi} \leq \frac{\frac{Z_{H.min}}{K_B K_3 K_{\text{ч}} n} - z_{mn} l_{\text{АП}}}{1 + \frac{z_{\text{ПА}} + z_{mn} l_{\text{АП}}}{z_{\text{ПВ}} + z_{mn} l_{\text{ПВ}}}} - z_{\text{ТГЗ}} l_{\text{ТГЗ}}, \quad (9)$$

где  $Z_{H.min}$  — минимальное сопротивление нагрузки, Ом;  
 $z_{mn}$  — удельное (погонное) сопротивление тяговой сети, Ом/км;  
 $n$  — количество задействованных путей на межподстанционной зоне;  
 $K_{\text{ч}}$  — коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,25;  
 $z_{\text{ТГЗ}}$  — погонное сопротивление троса группового заземления, Ом/км;  
 $K_3$  — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,1–1,3;  
 $l_{\text{АП}}, l_{\text{ПВ}}$  — расстояния между подстанцией А и постом секционирования, постом секционирования и подстанцией В соответственно;  
 $K_B$  — коэффициент возврата, принимаемый равным 1,1–1,15;  
 $l_{\text{ТГЗ}}$  — максимальная длина троса группового заземления, км.  
 Расчетная схема участка тяговой сети приведена на рис. 6.

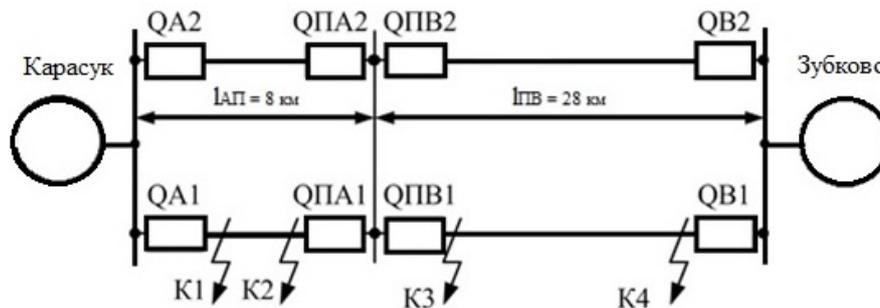


Рис. 6. Расчетная схема для определения сопротивления растеканию группы опор

После расчетов по выражению (9) с точки зрения обеспечения требуемой чувствительности РЗ максимально допустимое сопротивление перехода «опоры КС — земля» будет равно:

для участка Карасук — Чебачий:  $R_{\Pi} = 8,1$  Ом.

для участка Чебачий — Зубково:  $R_{\Pi} = 7,1$  Ом.

Полученные значения необходимо учитывать при формировании групп разземленных опор в пределах указанных участков.

В результате можно отметить, что необходимость группового заземления опор в тяговых сетях обусловлена следующими факторами:

- 1) повышением надежности эксплуатации рельсовых цепей;
- 2) обеспечением более эффективной электробезопасности обслуживающего персонала;

3) экономичностью в результате снижения затрат на обслуживание элементов цепи заземления;

4) простотой в обслуживании.

При этом для повышения эффективности группового заземления необходимо обеспечение надежной гальванической связи арматуры опор с ТГЗ и в случае необходимости устройство дополнительных контуров заземления [13].

## Заключение

Система с опорами контактной сети, не имеющими гальванической связи с рельсами, является более безопасной, надежной и экономически выгодной в сравнении с эксплуатируемой с настоящее время системой, в которой опоры соединяются с тяговыми рельсами.

## Список источников

1. Терехин И. А. К вопросу электробезопасности при разземлении опор контактной сети / И. А. Терехин, И. А. Кремлев // *Успехи современного естествознания*. — 2012. — № 6.
2. Кузнецов А. А. Обеспечение электробезопасности при преднамеренном разземлении опор контактной сети на участках железных дорог переменного тока / А. А. Кузнецов, Ю. В. Кондратьев, В. А. Квашук // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. — 2013. — № 1. — С. 328–333.
3. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: учебник для вузов железнодорожного транспорта / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС, 2002. — 638 с.
4. ГОСТ Р 12.1.038—2024. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. — 2021. — 173 с.
6. Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах: ЦЭ-346. — М., 1995, 65 с.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебное пособие / Л. А. Бессонов. — М.: Гардарик, 2003. — 317 с.
8. Кремлев И. А. Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока / И. А. Кремлев, И. А. Терехин, И. В. Тарабин и др. // *Транспортные системы и технологии*. — 2020. — С. 92–100.
9. Пинчуков П. С. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока / П. С. Пинчуков, С. И. Макашева, А. П. Костин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. — 2020. — № 7. — С. 27–38.
10. Кремлев И. А. Проблемы внедрения системы тягового электроснабжения переменного тока с опорами контактной сети, не заземленными на рельс и пути их решения / И. А. Кремлев, И. А. Терехин, Е. Г. Абишов и др. // *Вопросы электротехнологии*. — 2020. — № 1. — С. 88–94.

11. Дынькин Б. Е. Защита контактной сети переменного тока при разземлении опор: учебное пособие / Б. Е. Дынькин. — Хабаровск: Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2002. — 151 с.

12. Кремлев И. А. Перспектива перевода участков тяговой сети без заземления на рельсы / И. А. Кремлев, И. А. Терехин, И. В. Тарабин и др. // Тез. докл. междунар. симпозиума «Eltrans 10.0». — СПб.: Санкт-Петербургский ун-т путей сообщения, 2019. — С. 66–97.

13. Кремлев И. А. Перспектива внедрения системы тягового электроснабжения переменного тока с опорами контактной сети, не заземленными на рельс / И. А. Кремлев, Р. Б. Скоков, И. А. Терехин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — № 4. — С. 57–66.

Дата поступления: 12.12.2024

Решение о публикации: 14.02.2025

#### Контактная информация:

КРЕМЛЕВ Иван Александрович — канд. техн. наук, доц.; ivkreml@mail.ru

САЛИТА Евгений Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; salitaey@gmail.com

ТЕРЕХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

## Increasing the Efficiency of Grounding the Overhead Catenary Supports on AC Railway Sections

I. A. Kremlev<sup>1</sup>, E. Yu. Salita<sup>1</sup>, I. A. Terekhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University, 35, K. Marx Ave., Omsk, 644046, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kremlev I. A., Salita E. Yu., Terekhin I. A. Increasing the Efficiency of Grounding the Overhead Catenary Supports on AC Railway Sections. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 106–118. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-106-118

### Summary

**Purpose:** To provide justification of increasing the efficiency of grounding devices and improving electrical safety on AC railway sections using the new methods of grounding overhead catenary supports. **Methods:** Analytical assessment of the technical solutions under study in terms of electrical safety and electromagnetic compatibility has been made; a comparative analysis of the existing grounding systems and alternative ones has been carried out using simulation modelling; optimum values of the resistance to dissipation of groups of overhead catenary supports have been obtained by calculations. **Results:** The impact of short-circuit failure modes on the workers' safety during the operation and maintenance of catenary network devices at different types of support grounding have been considered in this paper. Different grounding system models have been developed for their efficiency comparative analysis using *MatLab-Simulink* software and the required values of resistance to dissipation for groups of supports have been calculate. **Practical significance:** The intended refusal

from connecting the catenary support grounding to the rails will reduce the grounding maintenance costs. The obtained results can allow organizing the operation of AC railway sections with the rail ungrounded system.

**Keywords:** Contact network, alternating current (AC), grounding, group grounding cable, resistance to dissipation, electrical safety, ungrounded supports, relay protection, potential distribution.

## References

1. Terekhin I. A., Kremlev I. A. K voprosu elektrobezopasnosti pri razzemlenii opor kontaktnoy seti [On the issue of electrical safety during de-grounding of contact network supports]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science]. 2012, Iss. 6. (In Russian)
2. Kuznetsov A. A., Kondrat'ev Yu. V., Kvashchuk V. A. Obespechenie elektrobezopasnosti pri prednamerennom razzemlenii opor kontaktnoy seti na uchastkakh zheleznnykh dorog peremennogo toka [Ensuring electrical safety during intentional de-grounding of contact network supports on sections of alternating current railways]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East.]. 2013, Iss. 1, pp. 328–333. (In Russian)
3. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost': uchebник dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Electromagnetic compatibility: a textbook for universities of railway transport]. Moscow: UMK MPS Publ., 2002, 638 p. (In Russian)
4. *GOST R 12.1.038—2024. SSBT. Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazheniy prikosnoveniya i tokov* [GOST R 12.1.038—2024. SSBT. Electrical safety. Maximum permissible values of touch voltages and currents]. (In Russian)
5. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley* [Rules for the technical operation of electrical installations of consumers]. 2021, 173 p. (In Russian)
6. *Instruktsiya po zazemleniyu ustroystv energosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorogakh: TsE-346* [Instructions for grounding power supply devices on electrified railways: CE-346]. Moscow, 1995, 65 p. (In Russian)
7. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromag-nitnoe pole: uchebnoe posobie* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic field: textbook]. Moscow: Gardarik Publ., 2003, 317 p. (In Russian)
8. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Tarabin I. V. et al. Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya opasnogo napryazheniya v smezhnykh liniyakh svyazi pri magnitnom vliyaniy tyagovoy seti peremennogo toka [Improving the methodology for determining hazardous voltage in adjacent communication lines under the magnetic influence of an AC traction network]. *Transportnye sistemy i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2020, pp. 92–100. (In Russian)
9. Pinchukov P. S., Makasheva S. I., Kostin A. P. Kompleksnaya otsenka raboty releynoy zashchity tyagovoy seti peremennogo toka [Comprehensive assessment of the operation of relay protection of an AC traction network]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2020, Iss. 7, pp. 27–38. (In Russian)
10. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Abishov E. G. et al. Problemy vnedreniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s oporami kontaktnoy seti, ne zazemlennymi na rel's i puti ikh resheniya [Problems of implementing an AC traction power supply system with contact network

supports not grounded to the rail and ways to solve them]. *Voprosy elektrotekhnologii* [Issues of Electrotechnology]. 2020, Iss. 1, pp. 88–94. (In Russian)

11. Dyn'kin B. E. *Zashchita kontaktной seti peremennogo toka pri razzemlenii opor: uchebnoe posobie* [Protection of an AC contact network when supporting ungrounded: a tutorial]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2002, 151 p. (In Russian)

12. Kremlev I. A., Terekhin I. A., Tarabin I. V. et al. Perspektiva perevoda uchastkov tyagovoy seti bez zazemleniya na rel'sy [Prospects for transferring sections of a traction network without grounding to rails]. *Tez. dokl. mezhdunar. simpozima "Eltrans 10.0"* [Abstracts of the report of the international. symposium "Eltrans 10.0"]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy un-t putey soobshcheniya Publ., 2019, pp. 66–97. (In Russian)

13. Kremlev I. A., Skokov R. B., Terekhin I. A. Perspektiva vnedreniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s oporami kontaktной seti, ne zazemlennymi na rel's [Prospects for the implementation of an alternating current traction power supply system with contact network supports not grounded to the rail]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2020, Iss. 4, pp. 57–66. (In Russian)

Received: December 12, 2024

Accepted: February 14, 2025

**Author's information:**

Ivan A. KREMLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; ivkreml@mail.ru

Evgeniy Yu. SALITA — PhD in Engineering, Associate Professor; salitaey@gmail.com

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru