

Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор

Ю.И. Жарков, А. И. Осипова

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В статье приводится методика расчета токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока. Система группового заземления опор, рассматриваемая в статье, снабжена дополнительным проводником, улучшающим условия работы всего участка электрифицированной железной дороги за счет снижения сопротивления петли короткого замыкания.

Ключевые слова: групповое заземление опор, ток короткого замыкания, электрифицированная железная дорога, тяговая сеть, волоконно-оптическая линия связи.

На электрифицированных железных дорогах постоянного и переменного тока все металлические части опор контактной сети, которые не находятся под напряжением, должны быть заземлены на рельс. Один из путей реализации данного требования – это использование схем группового заземления, при которых группа опор объединяется тросом, который, в свою очередь, особым образом подключается к рельсовому пути (ЦЭ–191 Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах). Такое решение при наличии ряда очевидных преимуществ обладает существенным недостатком в случае использования на электрифицированных железных дорогах постоянного тока. Значительные токи тяговых нагрузок нормального режима в ряде случаев бывают соизмеримы с удаленными токами короткого замыкания в системе с групповым заземлением опор, что может приводить к сбоям в работе релейной защиты участка [1].

Внедрение в систему группового заземления опор контактной сети дополнительного проводника, выполненного с помощью металлической оболочки оптоволоконного кабеля типа ОКГТ [2–4] (рис. 1), позволит существенно улучшить эксплуатационные характеристики существующей на

сегодняшний день системы и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [5, 6], достигаемой, в том числе, за счет снижения негативного влияния мощного электромагнитного поля [7, 8]. Однако, использование известных методов определения токов короткого замыкания [9] для предлагаемого способа организации системы группового заземления становится затруднительным ввиду того, что между тросом группового заземления (ТГЗ), рельсом и металлической оболочкой ОКГТ образуются множественные электрические связи, расположение которых зависит от места возникновения короткого замыкания (КЗ).

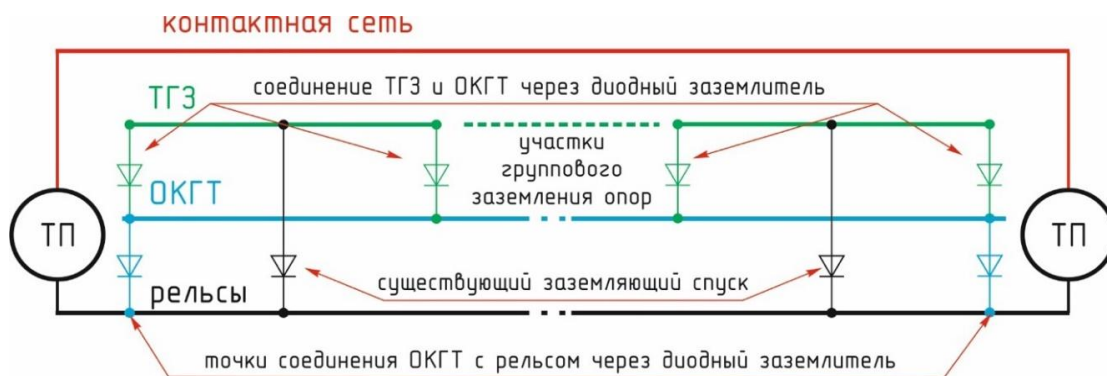


Рис. 1. – Система с дополнительным заземлением опор контактной сети на металлическую оболочку волоконно-оптического кабеля

Для расчета токов короткого замыкания можно составить эквивалентную схему замещения участка группового заземления. Данная схема (рис. 2) предназначена для расчета тока КЗ в пределах одного пролета ТГЗ. В схеме приняты следующие обозначения. Сопротивление контактной сети от шин тяговой подстанции до места аварии обозначено переменной $R_{КС}$; R_{P1} , R_{P2} – сопротивление рельсов от точки соединения с металлической обмоткой ОКГТ левее и правее точки присоединения заземляющего спуска расчетного участка. Сопротивление ТГЗ в одном пролете между соседними опорами обозначено R_T ; $R_{ОП}$ – сопротивление опоры контактной сети. R_A , R_B обозначены активные сопротивления металлической оболочки ОКГТ между

точкой соединения с контуром ТП и местом соединения с рельсом, слева и справа от расчетного участка. $R_{A''}$, $R_{B''}$ – тоже сопротивление для рельсового пути. Сопротивление тяговой подстанции обозначено $R_{ТП}$.

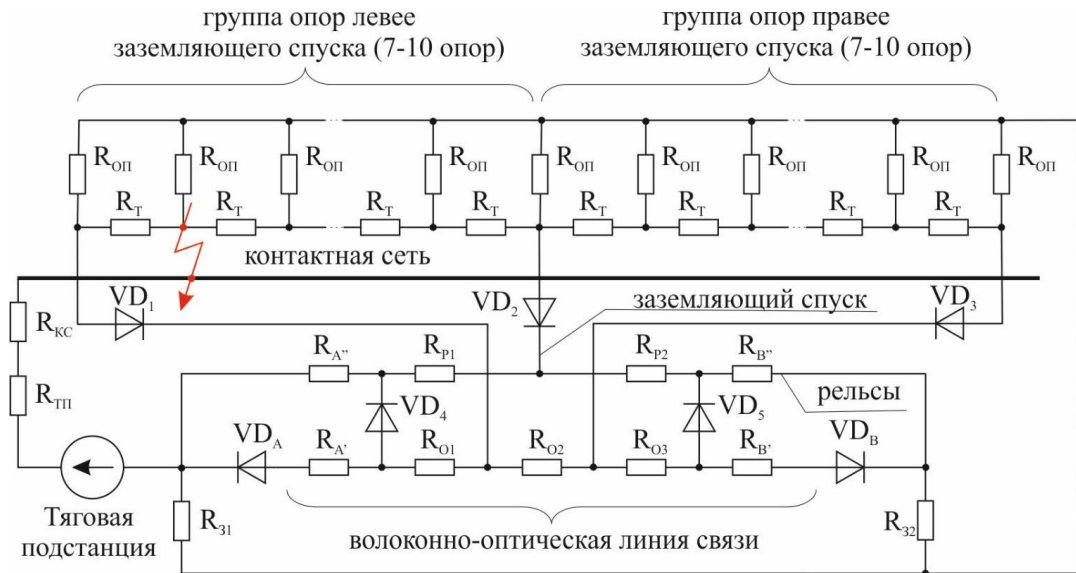


Рис. 2. – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ при одностороннем питании контактной сети

Ток короткого замыкания в разрабатываемой системе двухуровневого заземления опор будет протекать не только по рельсам, но и по металлической оболочке ОКГТ. В схеме введены обозначения R_{O1} и R_{O3} – это элементы, учитывающие активное сопротивление ОКГТ от ближайшего места соединения ОКГТ и рельса до места электрического контакта между ТГЗ к ОКГТ. Элемент R_{O2} учитывает сопротивление металлической оболочки ОКГТ в пределах участка между точками соединения с существующим грозозащитным тросом. Элементами $R_{З1}$ и $R_{З2}$ учтено влияние на токораспределение ненулевого сопротивления контура заземления тяговой подстанции.

Используемый в настоящее время трос группового заземления должен быть соединен левым и правым концом с проводящей оболочкой кабеля

ОКГТ. Такое соединение должно быть выполнено с использованием полупроводниковых диодов, применяемых при монтаже заземляющих спусков на железных дорогах постоянного тока. Отсутствие диодных вентилей приведет к тому, что при возникновении короткого замыкания на группе опор опасный потенциал будет вынесен на все опоры, присоединенные к ОКГТ. Указанное решение обеспечивает защиту от попадания на неповреждённый участок группового заземления опор потенциала, вызванного аварией на другом участке. Таким образом, при помощи диодов выполняется изоляция расчетного участка. Указанные особенности токораспределения при аварии позволяют при расчете токов короткого замыкания исключить из расчётной схемы соседние неповреждённые участки группового заземления.

В методике расчета были сделаны допущения. Первое допущение – при определении тока КЗ принимается, что сопротивление опоры бесконечно велико в течение времени срабатывания релейной защиты, и ток КЗ по опоре в землю не стекает. Второе допущение – ток, протекающий по рельсам, не ответвляется в землю и течет до минусовой шины тяговой подстанции только по рельсовому пути. Такой режим работы участка железной дороги возможен для условий весьма жаркого и сухого климата либо для условий низких температур. Кроме этого, токораспределение в данной нелинейной схеме имеет ряд особенностей. При аварии левее существующего заземляющего спуска очевидно потенциал рельса в точке электрического контакта с диодом заземляющего спуска будет определяться величиной тока, протекающего по рельсу влево, в сторону подстанции. Очевидно, что диод соединяющий ТГЗ и ОКГТ справа в такой ситуации будет закрыт. Данный факт позволит упростить расчетную схему. Аналогичным образом исключаем левый заземляющий шлейф в случае короткого замыкания правее существующего заземляющего спуска. Ввиду всего вышеизложенного расчет токов короткого замыкания для

схемы двухуровневого заземления необходимо вести с учетом места расположения аварии – левее либо правее заземляющего спуска.

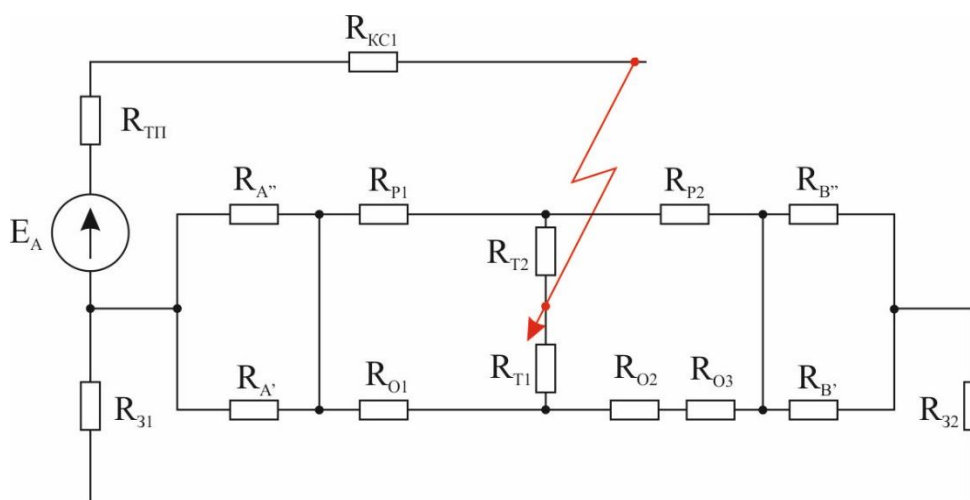


Рис. 3. – Пример расчетной схемы, когда авария произошла левее существующего заземляющего спуска

На рис. 3 приведена схема расположения точки КЗ левее заземляющего спуска. В схеме обозначения соответствуют ранее принятым на рис. 2. Кроме этого, вновь введены элементы R_{T1} – сопротивление участка существующего ТГЗ от начала до места короткого замыкания; R_{T2} – сопротивление участка существующего ТГЗ от места короткого замыкания до заземляющего спуска. Все полупроводниковые диоды, находящиеся в открытом состоянии заменены на схеме перемычками с нулевым сопротивлением. Диоды, находящиеся в закрытом состоянии заменены разрывом цепи. Такой подход позволяет рассчитывать нелинейную электрическую цепь сравнительно простым методом. Расчёт величины тока короткого замыкания в полученной схеме предполагает использование метода эквивалентных преобразований [10].

Таблица № 1

Методика расчета тока короткого замыкания

	$R_A = \frac{R_{A''} \cdot R_{A'}}{R_{A''} + R_{A'}},$ $R_{B^*} = \frac{R_{B''} \cdot R_{B'}}{R_{B''} + R_{B'}} + R_{31} + R_{32},$ $R_{O4} = R_{O2} + R_{O3}.$
	$R_1 = R_A + R_{P1} + R_A \cdot R_{P1} / R_{O1},$ $R_2 = R_{O1} + R_{P1} + R_{O1} \cdot R_{P1} / R_A,$ $R_3 = R_A + R_{O1} + R_A \cdot R_{O1} / R_{P1},$ $R_4 = R_{O4} + R_{P2} + R_{O4} \cdot R_{P2} / R_{B^*},$ $R_5 = R_{B^*} + R_{P2} + R_{B^*} \cdot R_{P2} / R_{O4},$ $R_6 = R_{O4} + R_{B^*} + R_{O4} \cdot R_{B^*} / R_{P2}.$
	$R_7 = \frac{R_5 \cdot R_1}{R_5 + R_1},$ $R_8 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4},$ $R_9 = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}.$
	$R_{10} = \frac{R_7 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9},$ $R_{11} = \frac{R_7 \cdot R_8}{R_7 + R_8 + R_9},$ $R_{12} = \frac{R_8 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9}.$
	$R_9 = R_{TII} + R_{KCI} + R_{10} + \frac{(R_{11} + R_{T1})(R_{12} + R_{T2})}{R_{11} + R_{T1} + R_{12} + R_{T2}}$ $I_{K3} = \frac{E}{R_9}.$

В таблице № 1 приведен один из вариантов преобразования схемы, показанной на рис. 3 с последующим определением тока короткого замыкания. Все операции, показанные в таблице, можно выполнять ручными методами расчета либо при помощи программного обеспечения, перемещая расчетную точку короткого замыкания. После перехода точки короткого замыкания правее заземляющего спуска расчет следует вести по методике, приведенной в таблице № 2.

Таблица № 2

Методика расчета тока короткого замыкания

	$R_A = \frac{R_{A''} \cdot R_{A'}}{R_{A''} + R_{A'}}$ $R_{B^*} = \frac{R_{B''} \cdot R_{B'}}{R_{B''} + R_{B'}} + R_{31} + R_{32}$ $R_{O4} = R_{O1} + R_{O2}$
	$R_1 = R_A + R_{P1} + R_A \cdot R_{P1} / R_{O4}$ $R_2 = R_{O4} + R_{P1} + R_{O4} \cdot R_{P1} / R_A$ $R_3 = R_A + R_{O4} + R_A \cdot R_{O4} / R_{P1}$ $R_4 = R_{O3} + R_{P2} + R_{O3} \cdot R_{P2} / R_{B^*}$ $R_5 = R_{B^*} + R_{P2} + R_{B^*} \cdot R_{P2} / R_{O3}$ $R_6 = R_{O3} + R_{B^*} + R_{O3} \cdot R_{B^*} / R_{P2}$

Дальнейшие преобразования необходимо вести аналогично ранее рассмотренному случаю. Предложенная в статье методика позволит рассчитать токи короткого замыкания на однопутных и многопутных участках (при отсутствии схем параллельного соединения подвесок) железных дорог, электрифицированных на постоянном токе и оснащенных предлагаемой в статье системой заземления опор.

Литература

1. Фигурнов, Е. П. Релейная защита: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Москва: Желдориздат, 2002. – 720 С. ISBN 5-94069-013-0.
2. Оптический кабель ОКГТ в грозозащитном тресе. Оптический кабель ОКФП в фазном проводе и арматура. URL: smartenergo.net/nkt/okgt_okfp.pdf/.
3. Кабель ОКГТ // Сайт компании «Транс-ВОК». – URL: transvoc.ru/production/okms.php.
4. Баланчевадзе В., Ишкин В., Стегний В. Телекоммуникационные сети электроэнергетики России // Мир связи. – 1998. – № 10. – С.64-68.
5. Осипов В. А., Соловьев Г. Е., Гороховский Е. В., Капкаев А. А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения // Инженерный вестник Дона, 2013. №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539.
6. Стороженко Е. А., Кляморов А. С., Стороженко Д. Е., Гукасов К. С. Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи // Инженерный вестник Дона, 2013. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645.
7. Keller D. A., Benze D. J., Bonicel J. P., Bastide C., Davidson E. Continued Investigation of ADSS Design and Reliability Consideration with Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices // 46-th International Wire & Cable Symposium Proceedings. - Eatontown, New Jersey, 17-20 November, 1997. - pp. 24–31.
8. Carter, Waldron Mathematical model of dry-band arcing on self-supporting, all-dielectric, optical cable strung on overhead power lines, IEEE Proceedings s-c, vol.139, No. 3, May 1992, p.p. 185–196.
9. Фигурнов, Е. П., Петрова Т.Е. Релейная защита систем электроснабжения. Расчёты защит от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1

Тяговые сети постоянного тока напряжением 3, 3 кВ: учебное пособие / Ростов-на-Дону: РГУПС, 1998. – 90 с.

10 Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: учебник для ВУЗов // М: Высшая школа. –1987. – 264 с.

References

1. Figurnov, E. P. Relejnaya zashhita [Relay protection] Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta Moskva: Zheldorizdat, 2002. 720 p.

2 Opticheskiy kabel` OKGT v grozozashhitnom trose. Opticheskiy kabel` OKFP v faznom provode i armature [OKGT optical cable in a lightning protection cable OKFP optical cable in the phase wire and fittings]. URL: smartenergo.net/nkt/okgt_okfp.pdf/.

3 Kabel` OKGT armature [OKGT cable] Sajt kompanii Trans-VOK. URL: transvoc.ru/production/okms.php.

4 Balanchevadze V., Ishkin V., Stegnij V. Mir svyazi. 1998. № 10. pp.64-68.

5 Osipov V. A., Solov`ev G. E., Goroxovskij E. V., Kapkaev A. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013 №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539.

6 Storozhenko E. A., Klyamorov A. S., Storozhenko D. E., Gukasov K. S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645.

7 Keller D. A., Benze D. J., Bonicel J. P., Bastide C., Davidson E. Continued Investigation of ADSS Design and Reliability Consideration with Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices 46-th International Wire & Cable Symposium Proceedings. Eatontown, New Jersey, 17-20 Nowember, 1997. pp. 24–31.

8 Carter, Waldron IEEE Proceedings, vol.139, No. 3, May 1992, pp. 185–196.



9 Figurnov, E. P., Petrova T. E. Relejnaya zashhita sistem e`lektrosnabzheniya. Raschyoty` zashhit ot korotkix zamy`kanij i peregruzki. Ch. 1 Tyagovy`e seti postoyannogo toka napryazheniem 3,3 kV [Relay protection of power supply systems. Calculations of protection against short circuits and overload. Part 1 DC traction networks with a voltage of 3.3 kV]. Uchebnoe posobie, Rostov-na-Donu. RGUPS, 1998. 90 p.

10 Bessonov, L.A. Teoreticheskie osnovy` e`lektrotexniki [Theoretical foundations of electrical engineering: textbook for universities]. Uchebnik dlya VUZov. M. Vy`sshaya shkola. 1987. 264 p.