

УДК 621.33

## Электромагнитные процессы в системе тягового снабжения 2×25 кВ с отсоединенными от рельсового пути опорами контактной сети

**А. Б. КОСАРЕВ**

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),  
Москва, 129626, Россия

**Аннотация.** В статье обоснована возможность отказа от применения для заземления опор контактной сети рельсового пути и использования в этих целях искусственного заземлителя. Искусственный заземлитель (ИЗ) состоит из двух расположенных в земле металлических полос, на поверхности которых располагаются кабельные линии с металлическими покровами, заземляемыми на эти полосы через 1,2 – 1,5 км, но не ближе 200 м от мест подключения к ним заземляющих спусков.

Металлические полосы на тяговых подстанциях, автотрансформаторных пунктах (АП), а также в середине между двумя соседними АП подключаются к рельсовому пути либо на среднюю точку специально установленного между АП путевого дроссель-трансформатора.

При соединении троса группового заземления с арматурой опор контактной сети возможно отказаться от заземления ИЗ на путевые дроссель-трансформаторы.

Показано, что в месте короткого замыкания напряжение искусственный заземлитель — земля (рельсовый путь — земля) имеет точку максимума на каждом автотрансформаторном участке. По мере удаления первого участка от подстанции его величина снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10 – 15%. В месте подключения ИЗ к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются примерно на 30 – 40%.

**Ключевые слова:** опоры контактной сети; заземлитель; система тягового электроснабжения; автотрансформаторы; ток; напряжение

**Введение.** Обеспечение электромагнитной совместимости устройств СЦБ и связи с системами электроснабжения железных дорог неразрывно связано с коммутационными процессами, происходящими в тяговых сетях. Так, при разрядах токов молнии в контактную сеть часть этого тока через заземляющие спуски опор контактной сети стекает с рельсового пути, вызывая на изоляции кабельных сетей перенапряжения. Исключить появление этих перенапряжений возможно отсоединением опор контактной сети от рельсового пути. Согласно [1], опоры контактной сети индивидуально либо посредством троса группового заземления соединяются с рельсовым путем. Это объясняется необходимостью отключения токов короткого замыкания при нарушении изоляции контактной сети.

Использование рельсового пути в качестве естественного заземлителя позволяет с большой

вероятностью исключить возникновение двух- и трехфазных коротких замыканий при разряде токов молнии как в одну из фаз трехфазной воздушной линии напряжением свыше 1000 В при ее расположении на опорах контактной сети, так и при разряде токов молнии в контактную сеть.

Эти же требования к условиям заземления опор контактной сети предъявляются и к системе тягового электроснабжения 2×25 кВ с питающим проводом и автотрансформаторами (далее — СТЭ 2×25 кВ).

В ряде публикаций обоснована возможность отказа от применения для заземления опор контактной сети рельсового пути и использования в этих целях экранирующего провода (ЭП) [2, 3]. Однако система тягового электроснабжения с ЭП имеет ряд недостатков, а именно:

- отсутствуют технические решения по плавке гололеда на ЭП;
- нет токовых (дистанционных) защит, фиксирующих обрыв ЭП;
- возможно шунтирование рельсового пути при незначительных сопротивлениях растеканию железобетонных фундаментов опор и т. д.

Устранить указанные выше недостатки возможно путем использования искусственного заземлителя (ИЗ) [4, 5, 6, 7]. Металлические конструкции опор объединяются тросом группового заземления (ТГЗ) протяженностью 400 м, который в середине посредством заземляющих спусков подключается к ИЗ.

ИЗ состоит из двух расположенных в земле металлических полос, на поверхности которых располагаются кабельные линии с металлическими покровами, заземляемыми на эти полосы через 1,2 – 1,5 км, но не ближе 200 м от мест подключения к ним заземляющих спусков.

Металлические полосы на тяговых подстанциях и автотрансформаторных пунктах подключаются к рельсовому пути. Учитывая жесткие требования к надежности работы систем тягового электроснабжения на высокоскоростных участках, в частности линии Москва — Казань, необходимо соединить ИЗ со средней точкой специально установленного между АП

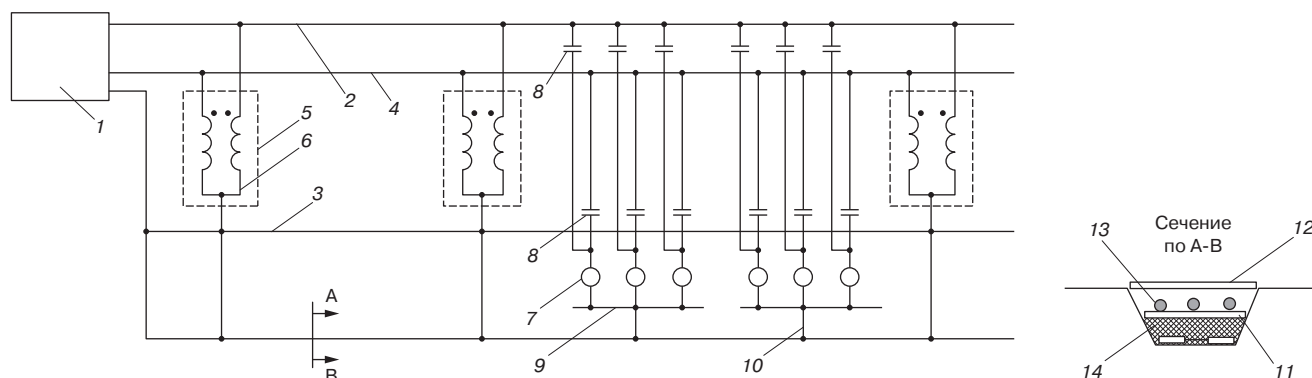


Рис. 1. Устройство заземления опор контактной сети системы тягового электроснабжения:

1—тяговая подстанция с силовыми тяговыми трансформаторами; 2—контактная сеть; 3—рельсовый путь; 4—питающий провод; 5—автотрансформаторный пункт; 6—автотрансформаторы; 7—опоры контактной сети; 8—изоляторы; 9—трос группового заземления; 10—заземляющие спуски; 11—металлические полосы; 12—проводящий бетон; 13—покровы кабельной сети; 14—слой грунта (земли)

Fig. 1. Structure of grounding of catenary supports of traction power supply system:

1—traction substation with power traction transformers; 2—catenary network; 3—railway track; 4—feeding cable; 5—autotransformer point; 6—autotransformers; 7—catenary supports; 8—insulators; 9—cable of group grounding; 10—grounding wires; 11—metallic strips; 12—conducting concrete; 13—covers of cable network; 14—soil layer (earth)

путевого дроссель-трансформатора. Такое соединение не приводит к нарушению работы рельсовых цепей.

Предлагаемое устройство заземления опор контактной сети СТЭ 2×25 кВ с питающим проводом и автотрансформаторами представлено на рис. 1.

Устройство работает следующим образом: при нормальной работе СТЭ 2×25 кВ токи в металлических полосах практически не протекают, поскольку тяговые токи в контактной сети 2 и питающем проводе 4 равны по фазе и сдвинуты относительно друг друга на 180 град (подробное обоснование приведено ниже).

При нарушении изоляции контактной сети (питающего провода) ток короткого замыкания протекает от тяговой подстанции 1 по контактной сети 2 (питающему проводу 4), тросу группового заземления 9, заземляющему спуску 10, расположенным в земле металлическим полосам 11 и далее на тяговую подстанцию 1 по рельсовому пути 3. Входные сопротивления расположенных в земле металлических полос, в том числе и из-за их соединения у автотрансформаторных пунктов с рельсовым путем 3 и металлическими конструкциями опор (арматура фундаментов), не превышают аналогичные величины для рельсового пути. Соответствующая токовая защита автотрансформаторов 6 автотрансформаторных пунктов 5, тяговой подстанции 1 селективно отключает аварийный режим.

На металлических покровах кабельной сети 13 напряжение из-за его затухания по длине естественно-го заземлителя при грозовых разрядах ниже допустимых значений по условиям отсутствия пробоя изоляции кабелей.

При соединении ТГЗ с арматурой опор возможно отказаться от заземления ИЗ на установленные между АП путевые дроссель-трансформаторы.

Электрический расчет электротяговой сети системы 2×25 кВ на участках, где для заземления опор контактной сети используется искусственный заземлитель, сопряжен с рядом трудностей. Прежде всего это вызвано наличием магнитных связей между проводками тяговой сети, неоднородностями в местах включения автотрансформаторов, особенностями процессов стекания тока с рельсов и ИЗ в землю [6]. Естественно, что при выборе расчетной схемы замещения электротяговой сети 2×25 кВ [3] можно вводить только обоснованные упрощения, пренебрегая лишь компонентами, влияние которых на исследуемые характеристики незначительно.

Наиболее трудоемким этапом расчета электротяговых сетей является учет процесса стекания обратного тока с рельсов и ИЗ в землю, в том числе при присоединении ИЗ к рельсовому пути на тяговых подстанциях, автотрансформаторных пунктах и в середине между АП. Интенсивность этого процесса во многом определяется величинами переходных сопротивлений рельсы — земля и искусственный заземлитель — земля, которые изменяются в довольно широких пределах [2].

Исчерпывающий анализ распределения токов и напряжений в элементах электротяговой сети 2×25 кВ можно провести лишь с помощью адекватной математической модели с применением современных вычислительных комплексов, в частности Matlab, использование которого для расчета электромагнитных процессов в электрических сетях с большим числом взаимно-индуктивных связей приводит к неконтролируемым погрешностям. Вместе с тем изучение характеристик системы 2×25 кВ допустимо и на относительно простой схеме замещения (рис. 2) [8].

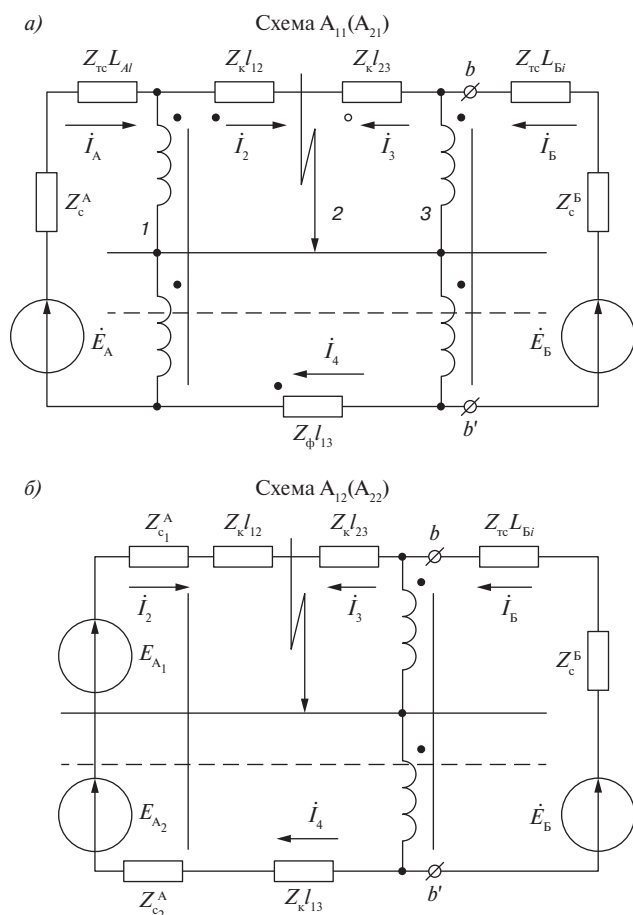


Рис. 2. Расчетные схемы замещения электротяговой сети 2×25 кВ:  $L_i$  — расстояние между подстанцией А и автотрансформатором, в обмотках которого протекают токи  $i_i$  и  $i_{i+1}$ , км;  $Z_{ci(2)}^{A(B)}$  — сопротивление полуобмотки трансформатора тяговой подстанции А(Б), включающее и соответствующую часть сопротивления питающей системы, Ом

Fig. 2. Calculated equivalent circuit of electric traction network 2×25 kV:

$L_i$  — distance between the substation A and the auto-transformer, in the coils of which flow the currents  $i_i$  and  $i_{i+1}$ , km;  $Z_{ci(2)}^{A(B)}$  — resistance of a semi-winding of the transformer of traction substation A and (B) including corresponding part of resistance of the feeding system, Ohms

Далее в формулах использованы следующие величины:

$z_k$  — удельное сопротивление контура контактная подвеска однопутного участка — земля, Ом/км;

$z_{\phi}$  — удельное сопротивление контура питающий провод — земля, Ом/км;

$z_{k\phi}$  — удельное сопротивление взаимоиндукции между контурами контактная сеть — земля, питающий провод-земля, Ом/км;

$Z_{ci(2)}^{A(B)}$  — сопротивление полуобмотки трансформатора тяговой подстанции А(Б), включающее и соответствующую часть сопротивления питающей системы, Ом;

$L_{Ai(j)}$  — расстояние между подстанцией А и  $i(j)$ -м автотрансформатором, км;

$z_{ATcv}$  — сопротивление автотрансформатора, Ом.

Порядок системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в электротяговой сети 2×25 кВ, определяется в первую очередь числом АП. Поэтому выбор и анализ расчетной схемы будем вести по пути ее упрощения с целью нахождения минимального количества автотрансформаторных участков, которое позволило бы получить основные зависимости в виде конечных аналитических выражений.

Установлено, что вычисление токов в элементах системы 2×25 кВ с малой погрешностью может проводиться при нулевом значении переходного сопротивления рельсы — земля. Аналогичное допущение делается и при расчетах токораспределения в традиционной системе тягового электроснабжения [9, 10].

При принятом допущении в дальнейших расчетах токораспределения под  $z_p$  следует понимать эквивалентное сопротивление, определяемое после проведения магнитной развязки [7] из соотношения

$$z_p = (z_3 - z_{M2.3})(z_2 - z_{M2.3})z_{M2.3} / ((z_3 - z_{M2.3})(z_2 - z_{M2.3}) + (z_3 - z_{M2.3})z_{M2.3} + (z_2 - z_{M2.3})z_{M2.3}),$$

где  $z_{M2.3}$  — взаимное индуктивное сопротивление между контурами металлические полосы — земля и рельсовый путь — земля, Ом/км;  $z_3$  — полное сопротивление контура металлические полосы — земля (искусственный заземлитель — земля), Ом/км;  $z_2$  — полное сопротивление контура рельсовый путь — земля, Ом/км.

Дальнейшее исследование токораспределения проведем на примере участка электротяговой сети 2×25 кВ с пятью автотрансформаторами.

Примем следующий порядок обозначений. Автотрансформаторные участки будем нумеровать начиная с первого в направлении от тяговой подстанции А к месту короткого замыкания и далее к тяговой подстанции Б. Автотрансформаторному участку, на котором находится место короткого замыкания, присваивается номер  $i$ .

Тогда у автотрансформаторов, находящихся на границе  $(i-1)$ -го и  $(i+1)$ -го участков, номера соответственно  $j$  и  $(j+1)$ .

В настоящее время питание электротяговой сети 2×25 кВ на Российских железных дорогах осуществляется как от однофазных, так и от трехфазных трансформаторов [2, 6, 9, 10].

При использовании тяговых трансформаторов с номинальным напряжением вторичной обмотки  $U_{2H} = 55$  кВ для расчета удаленного короткого замыкания схема замещения имеет вид, представленный на рис. 2, а. Если точка короткого замыкания расположена между первым автотрансформатором и подстанцией, то рассчитывается схема, представленная на рис. 2, б. Расчетные схемы приведены для участка

электротяговой сети  $2 \times 25$  кВ с двусторонним питанием. При одностороннем питании в схемах на рис. 2 в точках  $bb'$  следует произвести разрыв цепи. На рис. 2 приведены условные обозначения расчетных схем. При этом в двухзначных индексах первая цифра 1 указывает на одностороннее питание участка, цифра 2 — на двустороннее.

Рассмотрим решение схемы  $A_{11}$ , которая соответствует случаю удаленного короткого замыкания на однопутном участке при одностороннем питании. Электрический расчет схемы замещения выполнен методом контурных токов. В результате решения системы уравнений получено [7, 8]

$$\begin{aligned} i_{K3} &= 2i_1 = \frac{2\dot{E}_A}{Z_{K3}}; i_3 = i_{K3} \frac{Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT}}{Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT}}; \\ Z_{K3} &= Z_C^A + Z_{TC}L_{Ai} + 4Z_{AT} + \\ &+ 4(Z_K - \mu_1 Z_{KP})I_{12} - 4 \frac{(Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT})^2}{Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT}} \end{aligned} \quad (1)$$

при

$$\begin{aligned} Z_{TC} &= Z_K + Z_\Phi - 2Z_{K\Phi} - Z_P(\mu_1 + \mu_2); \\ Z_{K\Phi} &= Z_K - \mu_1 Z_{KP} - \mu_2 Z_{FP} + Z_{K\Phi}; \\ Z_{K-\Phi} &= (Z_K - \mu_1 Z_{KP}) + \\ &+ (Z_\Phi - \mu_2 Z_{FP}) + 2(Z_{K\Phi} - \mu_1 Z_{FP}); \\ \mu_1 &= \frac{Z_{KP}}{Z_P}; \mu_2 = \frac{Z_{FP}}{Z_P}. \end{aligned}$$

Здесь через  $Z_{TC}$  обозначено эквивалентное сопротивление тяговой сети между автотрансформаторами  $AT_{j(j+1)}$  и подстанциями А(Б). При равенстве сопротивлений взаимной индукции  $Z_{KP}$  и  $Z_{FP}$  величина  $Z_{TC}$  представляет собой сопротивление двухпроводной питающей линии контактная сеть — питающий провод. Для этого случая с незначительной погрешностью также можно принять  $Z_{K\Phi} \approx Z_K$ ,  $Z_{K\Phi} \approx Z_{K-\Phi} + Z_\Phi$ . При нарушении изоляции между питающим проводом и искусственным заземлителем сопротивлений  $(Z_K - \mu_1 Z_{KP})$  и  $Z_{K\Phi}$  заменяются соответственно на  $(Z_\Phi - \mu_2 Z_{FP})$  и  $Z_{K\Phi} = Z_\Phi - \mu_1 Z_{KP} - \mu_2 Z_{FP} + Z_{K\Phi}$ .

Аналогичным образом рассчитаны другие схемы замещения.

Для схемы  $A_{12}$  (рис. 2, б)

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{\dot{E}_{A1}Z_3 + \dot{E}_{A2}Z_{23}}{Z_2Z_3 - Z_{23}^2}; i_3 = \frac{\dot{E}_{A2}Z_2 - \dot{E}_{A1}Z_{23}}{Z_2Z_3 - Z_{23}^2}; \\ i_{K3} &= i_2 + i_3. \end{aligned} \quad (2)$$

В частном случае при равенстве ЭДС полуобмоток тягового трансформатора, т. е.  $\dot{E}_{A1} = \dot{E}_{A2}$ , имеем

$$\begin{aligned} i_3 &= i_{K3} \frac{Z_{C1}^A + Z_{K\Phi}I_{12}}{Z_C^A + Z_{K-\Phi}I_i + 4Z_{AT}}; \\ Z_2 &= Z_{C1}^A + (Z_K - \mu_1 Z_{K\Phi})I_{12}; \\ Z_3 &= Z_{C2}^A + 4Z_{AT} + Z_{K-\Phi}I_{23} + (Z_\Phi - \mu_2 Z_{FP})I_{12}; \end{aligned}$$

$$Z_{23} = (Z_{K\Phi} - \mu_1 Z_{FP})I_{12}.$$

Приведенные соотношения с погрешностью, не превышающей 5%, позволяют рассчитать токи короткого замыкания при одностороннем питании электротяговой сети. Вместе с тем приведенные выше формулы могут быть применены и для оценки распределения токов между автотрансформаторами  $i$ -го участка.

Для получения практически полной картины токо-распределения в электротяговой сети  $2 \times 25$  кВ в большинстве случаев достаточно учесть только токи автотрансформаторов  $(i-1)$ -го,  $i$ -го и  $(i+1)$ -го участков. Указанное обстоятельство объясняется тем, что токи в тяговой сети за  $AT_{j+2}$  пренебрежимо малы, а между подстанцией и  $(i-1)$ -м автотрансформаторным участком практически не зависят от сопротивления  $Z_{AT}$ .

Значения токов в контактной сети  $i_K$  и в питающем проводе  $i_\Phi$  на участках  $1 \dots (i-2)$  найдем, полагая  $Z_{AT} = 0$ . В результате решения схемы замещения с  $AT_{j-1}$ ,  $AT_j$  и  $AT_{j+1}$  получено

$$\begin{aligned} i_K &= i_{K3} \frac{Z_{\Phi\Phi}}{Z_{K\Phi}} = i_{K3} \frac{Z_\Phi}{Z_K + Z_\Phi}; \\ i_\Phi &= i_{K3} \frac{Z_{K\Phi}}{Z_{K\Phi}} = i_{K3} \frac{Z_K}{Z_K + Z_\Phi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины токов, протекающих через отсосы автотрансформаторов, определены с помощью схем замещения электротяговой сети, содержащих участки  $i$  и  $(i+1)$ , а также  $(i-1)$  и  $i$ . В результате получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} i_{ATj-1} &= 2i_{K3} \frac{Z_{K\Phi}}{Z_{K-\Phi}} - i_{ATj} - i_{ATj+1} - i_{ATj+2}; \\ i_{ATj} &= 2i_{K3} \times \\ &\times \frac{Z_{K\Phi}I_{12}(Z_{K-\Phi}I_{i-1} + 4Z_{AT})}{(Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i-1} + 8Z_{AT}) - 16Z_{AT}^2} - \\ &- \frac{(Z_{K-\Phi}I_i + 4Z_{AT})(Z_{K\Phi}I_{i-1} + 2Z_{AT})}{(Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i-1} + 8Z_{AT}) - 16Z_{AT}^2}; \\ i_{ATj+1} &= 2i_{K3} \times \\ &\times \frac{(Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i+1} + 4Z_{AT})}{(Z_{K-\Phi}I_i + 8Z_{AT})(Z_{K-\Phi}I_{i+1} + 8Z_{AT}) - 16Z_{AT}^2}; \\ i_{ATj+2} &= 8i_{ATj+1} \frac{Z_{AT}}{Z_{K-\Phi}I_{i+1} + 4Z_{AT}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если протяженности автотрансформаторных участков разнятся между собой не более чем на 15%, то расчеты можно проводить по усредненным длинам участков  $l_0$ .

Тогда имеем

$$\begin{aligned} i_{ATj} &= 2Z_0^{-1}(Z_{K\Phi}I_{23} + 2Z_{AT})i_{K3}; \\ i_{ATj+1} &= 2Z_0^{-1}(Z_{K\Phi}I_{12} + 2Z_{AT})i_{K3}; \\ i_{ATj-1} &= 2i_{K3} \times \end{aligned}$$



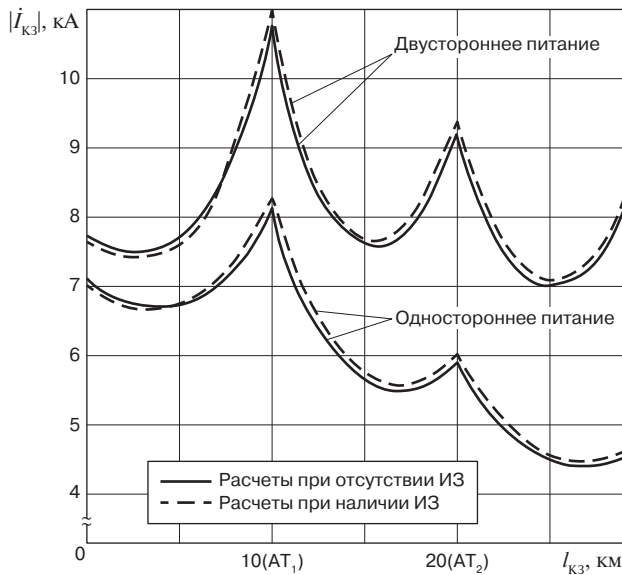


Рис. 3. Результаты расчетов токов короткого замыкания  
Fig. 3. Results of calculations of short-circuit currents

$$\times \left[ \frac{Z_{KЭ}}{Z_{K-Ф}} - Z_0^{-1} \left( Z_{KЭ} l_0 + 2Z_{AT} + 4Z_{AT} \frac{Z_{KЭ} l_{12} + 2Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}} \right) \right];$$

$$i_{ATj+2} = 8i_{ATj+1} \frac{Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}},$$

где

$$Z_0^{-1} = \frac{Z_{KФ} l_0 + 4Z_{AT}}{(Z_{K-Ф} l_0 + 8Z_{AT})^2 - 16Z_{AT}^2}.$$

Расчет токораспределения при двустороннем питании может быть сведен к расчету двух схем с односторонним питанием, что дает возможность использовать все полученные соотношения.

В схемах замещения  $A_{21}$  токи вычисляются по следующим формулам:

$$i_A = \frac{\dot{E}_A Z_B - \dot{E}_B Z_{AB}}{Z_A Z_B - Z_{AB}^2}; i_B = \frac{\dot{E}_B Z_A - \dot{E}_A Z_{AB}}{Z_A Z_B - Z_{AB}^2}; \quad (5)$$

$$i_A + i_B = 0,5 i_{K3};$$

$$z_{A(B)} = z_c^{A(B)} + z_{TC} L_{A(B)} + 4z_{AT} +$$

$$+ 4(z_K - \mu_1 z_{KP}) l_{12(23)} - 4 \frac{(z_{KЭ} l_{12(23)} + 2z_{AT})^2}{z_{KФ} l_i + 8z_{AT}};$$

$$Z_{AT} = \frac{(Z_{KЭ} l_{12} + 2Z_{AT})(Z_{KЭ} l_{23} + 2Z_{AT})}{Z_{K-Ф} l_i + 8Z_{AT}}.$$

В общем случае решение схемы  $A_{22}$  получается довольно громоздким. Однако, если принять условия  $\dot{E}_{A1} = \dot{E}_{A2} = 0,5 \dot{E}_A$ ,  $|(Z_{KЭ} - Z_{ФЭ}) l_i| < 5$ , протяженности автотрансформаторных участков примерно одинаковыми, то токи автотрансформаторов  $AT_j$  и  $AT_{j-1}$  можно вычислить с помощью соотношений (5), а токи  $AT_{j-1}$  и  $AT_{j+2}$  находятся из следующего выражения:

$$i_{K3} = \frac{\dot{E}_A}{2z_{K3}} + \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{\Delta z_{K3}}; i_3 = i_{K3} \frac{0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12}}{z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i}; \quad (6)$$

$$z_{K3} = 0,5z_c^A + (z_K - \mu_1 z_{KP}) l_{12} -$$

$$\frac{(0,5z_c^A + z_{KЭ}^* l_{12})^2}{z_c^A + z_c^B + z_{TC} L_{AB}} - \frac{(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})^2}{z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i};$$

$$\Delta z_{K3} = (z_c^A + z_c^B + z_{TC} L_{AB}) \times$$

$$\times \frac{(z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i)[0,5z_c^A + (z_K - \mu z_{KP}) l_{12}]}{(z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i)(0,5z_c^A + z_{KЭ}^* l_{12})} -$$

$$\frac{(0,5z_c^A + z_{KЭ} l_{12})^2}{(z_c^A + 4z_{AT} + z_{KФ} l_i)(0,5z_c^A + z_{KЭ}^* l_{12})} -$$

$$-(0,5z_c^A + z_{KЭ}^* l_{12});$$

$$z_{KЭ}^* = z_K - \mu z_{KP} + \mu z_{ФР} - z_{KФ}.$$

Значения токов в обмотках автотрансформаторов рассчитываются по формулам

$$i_{ATj-1(j+2)} = 4i_{A(B)} \left[ \frac{Z_{KЭ}}{Z_{K-Ф}} - Z_0^{-1} \times \right.$$

$$\times \left( Z_{KЭ} l_0 + 2Z_{AT} + 4Z_{AT} \frac{Z_{KЭ} l_{12(23)} + 2Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}} \right) \left. \right] +$$

$$+ 16i_{B(A)} Z_0^{-1} \frac{Z_{AT}}{Z_{K-Ф} l_0 + 4Z_{AT}} (Z_{KЭ} l_{23(12)} + 2Z_{AT}). \quad (7)$$

Значения токов в контактной сети и в дополнительном проводе на автотрансформаторных участках  $1 \dots (i-2)$  и  $(i+2) \dots n$  рассчитываются по формулам, аналогичным (7):

$$i_{K^{A(B)}} = 2i_{A(B)} \frac{Z_{ФЭ}}{Z_{K-Ф}} \approx 2i_{A(B)} \frac{Z_{Ф}}{Z_K + Z_{Ф}};$$

$$i_{Ф^{A(B)}} = 2i_{A(B)} \frac{Z_{KЭ}}{Z_{K-Ф}} \approx 2i_{A(B)} \frac{Z_K}{Z_K + Z_{Ф}}. \quad (8)$$

Выражения (5) и (6) приведены применительно к электротяговым сетям с тяговыми трансформаторами с  $U_{2H} = 55$  кВ.

Рассмотрим общую картину распределения токов при коротком замыкании в электротяговой сети  $2 \times 25$  кВ.

Кривые изменения токов для  $K_{AT} = 2$  при одно- и двустороннем питании электротяговой сети имеют характер, представленный на рис. 3.

Отметим, что место короткого замыкания практически подпитывается только от автотрансформаторов  $i$ -го участка. Причем это положение справедливо для всего диапазона изменения значений коэффициентов трансформации автотрансформаторов. Поэтому при расчете токов короткого замыкания, а также определении входного сопротивления электротяговой сети  $2 \times 25$  кВ с небольшой погрешностью можно учитывать только автотрансформаторы  $AT_j$  и  $AT_{j+1}$ , пренебрегая шунтирующим действием других автотрансформаторов.

При коэффициенте  $K_{AT} = 2$  токи, протекающие по рельсовому пути и искусственному заземлителю между подстанциями А(Б) и  $i$ -м участком, обусловлены величиной сопротивления  $Z_{AT}$ , а также неравенством сопротивлений контактной сети и питающего провода. При реальных значениях  $Z_{AT}$  и экономически оправданных сочетаниях типов проводов величина нескомпенсированного тока на этих участках пути составляет малую долю от тока в контактной сети [2]. Поэтому в большинстве случаев с незначительной погрешностью ток короткого замыкания может быть вычислен без учета гальванической связи с рельсами отсоса тяговой подстанции А(Б). Это в свою очередь показывает, что эффективность применения ИЗ, соединенного с рельсовым путем при системе тягового электроснабжения  $2 \times 25$  кВ, для повышения напряжения и снижения потери электроэнергии незначительна.

При выборе окончательных вариантов схем замещения необходимо исходить из способа питания электротяговой сети и положения точки короткого замыкания относительно тяговой подстанции А(Б) и автотрансформатора  $AT_{j(j+1)}$ . Это обусловлено тем, что при расчете токов короткого замыкания на первом автотрансформаторном участке и питании тяговой сети от однофазных трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой [2, 9] нельзя пренебрегать гальванической связью между рельсами и отсосом подстанции.

**Расчет напряжений искусственный заземлитель — земля.** Напряжение искусственный заземлитель — земля рассчитывается по формуле

$$\dot{U}_3 = \left(1 - \frac{z_{K.P}}{z_p}\right) \left[ z_{B.P} (2 \dot{I}_{ATi} (e^{-\gamma |e_{ATi} - x|} - e^{-\gamma x})) + z_{B.X.P} \dot{I}_{K3} (e^{-\gamma |e_{ATi} - x|} - e^{-\gamma x}) \right], \quad (9)$$

$$\text{где } z_{B.P} = \sqrt{\frac{z_p r_{\Pi} r_3}{r_{\Pi} + r_3}}; \gamma = \sqrt{\frac{r_{\Pi} + r_3}{z_p r_3}};$$

$$z_{B.X.P} = \frac{z_{M2.3} z'_{BX}}{z_{M2.3} + z'_{BX}}; z'_{BX} = \frac{(z_3 x + z_{B.P})(z_3(l - x) + z_{B.P})}{z_3 l + 2 z_{B.P}},$$

$x$  — текущая координата (отсчет ведется от места подключения ИЗ к рельсовому пути), км;  $l$  — расстояние между соседними точками подключения искусственного заземлителя к рельсовому пути.

Необходимо отметить, что все выражения, описывающие токораспределение и распределение напряжений, являются функцией тока короткого замыкания, что дает возможность рассматривать полученные соотношения как результат решения схем, содержащих источники тока величиной, равной току короткого замыкания. В принципе использование приведенных выше выражений будет правомерно и для тяговых нагрузок. При нескольких электровазах, одновременно находящихся в межподстанционной зоне,

распределение токов и напряжений находится методом наложения.

Результаты расчетов напряжений искусственный заземлитель — земля в точке короткого замыкания для участка с пятью автотрансформаторами при двустороннем питании от двух однофазных трансформаторов на каждой подстанции приведены на рис. 4. Расчеты сделаны для тяговой сети типа ПБСМ1-70 + МФ-100 + А-185 с рельсами Р65 на железобетонных шпалах и при подключении к рельсам ИЗ.

Кривые изменения напряжений искусственный заземлитель — земля позволяют отметить следующие особенности распределения потенциалов в системе  $2 \times 25$  кВ с отсоединенными от рельсового пути опорами контактной сети. В месте короткого замыкания напряжение искусственный заземлитель — земля имеет точку максимума  $U_{3 \max}$  на каждом автотрансформаторном участке.

По мере удаления 1-го участка от подстанции величина  $U_{3 \max}$  снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10–15%. В месте подключения ИЗ к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются примерно на 30–40%. Тем самым установлена эффективность использования предлагаемой системы заземления для уменьшения напряжений ИЗ — земля, рельсы — земля для СТЭ  $2 \times 25$  кВ с отсоединенными от рельсов опорами.

Следует указать на целесообразность использования ИЗ для заземления металлических ограждений

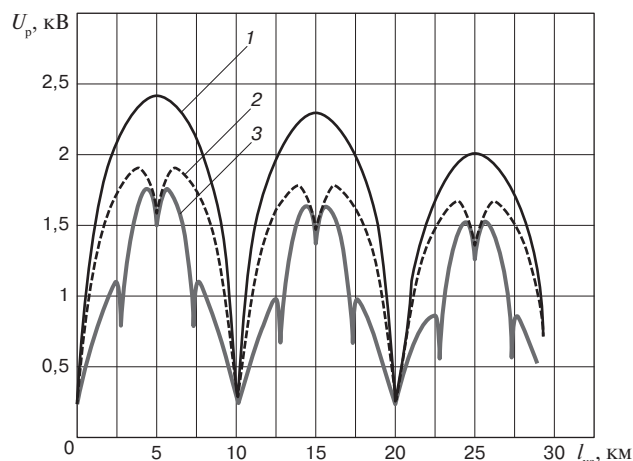


Рис. 4. Результаты расчетов напряжений искусственный заземлитель — земля в точке короткого замыкания:

1 — искусственный заземлитель подключен к рельсовому пути у автотрансформаторных пунктов; 2 — ИЗ дополнительно к 1 подключен в середине между автотрансформаторными пунктами; 3 — ИЗ дополнительно к 1 подключен в трех местах между автотрансформаторными пунктами

Fig. 4. Results of calculations of voltage in artificial grounding conductor — the earth system in a short-circuit point:

1 — the artificial grounding conductor is connected to a rail track at autotransformer points; 2 — AGC in addition to 1 is connected in the middle between autotransformer points; 3 — AGC in addition to 1 is connected in three places between autotransformer points

посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей на электрифицированных участках переменного тока.

**Выводы.** 1. Обоснована система заземления опор контактной сети СТЭ 2×25 кВ, в которой металлические конструкции опор объединяются тросом группового заземления протяженностью 400 м, соединенным в середине посредством заземляющих спусков с искусственным заземлителем.

2. Показано, что в месте короткого замыкания напряжение искусственный заземлитель — земля достигает максимального значения. По мере удаления 1-го участка от подстанции его величина снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10–15%. В месте подключения ИЗ к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются на 30–40%.

Установлена эффективность использования предлагаемой системы заземления для участков с отсоединенными от рельсов опорами и для заземления металлических ограждений посадочных платформ и металлических ограждений железнодорожных путей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. М.: Транспорт, 1997. 68 с.
2. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.

3. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. М.: Интекст, 2004. 272 с.

4. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость устройств электропитания систем железнодорожной автоматики с тяговыми сетями // Транспорт. Наука, техника, управление. 2004. № 7. С. 31–34.

5. Шимони К. Теоретические основы электротехники. М.: Мир, 1964. 685 с.

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

7. Косарев А. Б., Сербиненко Д. В. Грозозащита и заземление опор контактной сети в системе тягового электроснабжения с ВПП РП // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 4. С. 19–23.

8. Косарев А. Б., Логинов С. В. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 2. С. 9–12.

9. Косарев А. Б., Сербиненко Д. В. Расчет распределения грозовых перенапряжений на длине протяженного заземлителя высоковольтных линий автоблокировки и связи // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 6. С. 3–7.

10. Косарев Б. И., Косолапов Г. Н. Условия электробезопасности обслуживания рельсового пути в тяговой сети 2×2,5 кВ // Электричество. 1978. № 6. С. 32–36.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**КОСАРЕВ Александр Борисович**,  
д-р техн. наук, профессор, заместитель Генерального  
директора АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 19.01.2016 г., принята к публикации 10.02.2016 г.

## Electromagnetic processes in traction supply system of 2×25 kV with catenary supports disconnected from the railway track

A. B. KOSAREV

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

**Abstract.** The article explains the possibility of refusal of application of catenary supports of railway track for grounding and use an artificial grounding conductor for this purpose. The Artificial Grounding Conductor (AGC) consists of two metal strips located in the earth on which surface there are cable lines, metal covers of which are grounded on these strips through 1,2 – 1,5 km, but not closer than 200 m from places of connection of the grounding wires to them.

Metal strips on traction substations or at the autotransformer points (AP), and also in the middle between two next AP are connected to a railway track or to the center tap of specially installed track impedance bond between APs.

When connecting a cable of group grounding with fittings of catenary support it is possible to refuse AGC grounding to track impedance bond.

It is noted that when calculating short-circuit currents between adjacent autotransformers, as well as in determining the input resistance of the electric traction network of 2 × 25 kV with a small inaccuracy it is possible to take into account only these autotransformers and neglecting shunt action of other autotransformers.

It is shown that in the place of short-circuit the voltage of the artificial grounding conductor — earth system (railway track — the earth) has a maximum point on each autotransformer section. With distance from the first section from substation the value of this voltage decreases slightly and for the next section differs in 10–15%. In the place of connection of AGC to railway track this voltage decreases approximately up to 30–40%.

Efficiency of use of the offered grounding system for sections with the supports disconnected from railway tracks, as well as for grounding of metal barriers of station platforms and metal barriers of railway tracks is established.

**Keywords:** catenary supports; grounding conductor; traction power supply system; autotransformers; current; voltage

■ E-mail: Kosarev.Alexander@vniizht.ru (A. B. Kosarev)

## REFERENCES

1. *Instruktsiya po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh* [Instructions for grounding of power supply devices on electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1997, 68 p.
2. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* [Basics of electromagnetic safety of power supply of railway transport systems]. Moscow, Intext Publ., 2008, 480 p.
3. Kosarev A. B. *Osnovy teorii elektromagnitnoy sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* [Basic theory of electromagnetic compatibility of AC traction power systems]. Moscow, Intext Publ., 2004, 272 p.
4. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv elektropitanii sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki s tyagovymi setyami* [Electromagnetic compatibility of power supply devices of railway automation systems with traction networks]. Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie, 2004, no. 7, pp. 31 – 34.
5. Shimon K. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical bases of electrical engineering]. Moscow, Mir Publ., 1964, 685 p.
6. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Electromagnetic processes in power supply systems of AC railways]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 348 p.
7. Kosarev A. B., Serbinenko D. V. *Grozozashchita i zazemlenie opor kontaktnoy seti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya s VPP RP* [Lightning protection and earthing of supports of contact network in the system of traction power with WPP of RP]. Vest-

nik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2013, no. 4, pp. 19 – 23.

8. Kosarev A. B., Loginov S. V. *Povyshenie nadezhnosti raboty ustroystv avtoblokirovki za schet otkaza ot ispol'zovaniya rel'sovykh putey dlya zazemleniya opor kontaktnoy seti peremennogo toka* [Improving the reliability of automatic block devices by eliminating the use of railway tracks for grounding supports of AC contact network]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2009, no. 2, pp. 9 – 12.

9. Kosarev A. B., Serbinenko D. V. *Raschet raspredeleniya grozovykh perenapryazheniy na dline protyazhennogo zazemlitelya vysokovol'tnykh liniy avtoblokirovki i svyazi* [Calculation of the distribution of storm overvoltages on the length of the extended grounding of high voltage lines of automatic lock and communication]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway research Institute], 2012, no. 6, pp. 3 – 7.

10. Kosarev B. I., Kosolapov G. N. *Usloviya elektrobezopasnosti obsluzhivaniya rel'sovogo puti v tyagovoy seti* [Conditions of electrical safety of track maintenance in the traction network]. Elektrichestvo, 1978, no. 6, pp. 32 – 36.

## ABOUT THE AUTHOR

**KOSAREV Aleksander Borisovich**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, deputy General Director of JSC "VNIIZhT"

Received 19.01.2016

Accepted 10.02.2016

## ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

**Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В.** Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.

Изложены методы анализа электромагнитных процессов в современных системах тягового электроснабжения и их влияние на электроустановки и электрические сети магистральных железных дорог. Обоснованы методы расчета нестационарных, в том числе и грозовых, режимов в сложных и неоднородных нелинейных цепях с переменной структурой, при представлении элементов цепи в виде линий с распределенными параметрами, носящими вероятностный характер. С привлечением методов линейной алгебры

и теории многополюсников рассмотрены матричные методы анализа энергетических соотношений в современных системах тягового электроснабжения при учете несинусоидального характера токов электропоездов. Основные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения защищены авторскими свидетельствами и патентами на полезную модель.

Предназначена для научных работников, аспирантов. Может быть полезна инженерам-электрикам, а также студентам электротехнических специальностей высших транспортных учебных заведений.

**Тюрнин П. Г., Тибилов А. Т., МIRONOS Н. В.** Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования. М.: ВМГ-Принт, 2015. 166 с.

В книге рассмотрены наиболее важные вопросы токосъема с учетом требований и методов проверки отдельных элементов контактной сети и токоприемников, эксплуатируемых при высокоскоростном движении. Подробно изложены отдельные решения экономичности и надежности устройств.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: железнодорожников, уже имеющих общую подготовку и практический опыт работы на контактной сети и в локомотивном хозяйстве, работников предприятий — изготовителей электроподвижного состава, а также преподавателей и студентов транспортных вузов, техникумов и колледжей.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книг обращайтесь в редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.