

Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока

А. Б. КОСАРЕВ¹, Б. И. КОСАРЕВ²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), 129626, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГБОУ ВО РУТ МИИТ), Москва, 127994, Россия

Аннотация. В статье предложена методика расчета приведенного к напряжению 27,5 кВ эквивалентного сопротивления системы внешнего электроснабжения и силового тягового трансформатора.

Обоснована эквивалентная схема замещения системы тягового электроснабжения, позволяющая учесть падение напряжения на общем сопротивлении системы внешнего электроснабжения от тяговых токов рассматриваемой и соседних фидерных зон, транзитных токов в линии электропередачи продольного электроснабжения.

Ключевые слова: силовой тяговый трансформатор; система внешнего электроснабжения; тяговая сеть; короткое замыкание; ток; напряжение

Введение. Разработке системы тягового электроснабжения переменного тока посвящено в последнее время несколько публикаций [1, 2]. В них ставится задача о целесообразности учета сопротивлений системы внешнего электроснабжения и силовых тяговых трансформаторов при расчете токораспределения в тяговых сетях.

При всех достоинствах существующих методов расчета этих сопротивлений в опубликованных источниках имеются расхождения при определении параметров схемы замещения системы тягового электроснабжения [3, 4, 5, 6].

Ниже сделана попытка ответить на основные вопросы, касающиеся результатов расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока.

Методика расчета входного сопротивления системы внешнего электроснабжения и силового тягового трансформатора. Расчет напряжения ($\dot{U}_3$) на токоприемнике электровазона переменного тока целесообразно определять согласно выражению, вытекающему из теоремы об эквивалентном генераторе

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{xx} - \dot{I}_3 Z_{вх3},$$

где $\dot{U}_{xx}$ — напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции.

Входное сопротивление ($Z_{вх3}$) относительно контактной сети и рельсового пути в месте нахождения электровазона с током $\dot{I}_3$ определяется из соотношения

$$Z_{вх3} = Z_{тс} + Z_{вх} + Z_{п},$$

где $Z_{тс}$ — сопротивление тяговой сети от тяговой подстанции до места нахождения электровазона (тока короткого замыкания); $Z_{вх}$ — входное сопротивление активного двухполюсника (ЭДС системы внешнего электроснабжения — силовой тяговый трансформатор — линия электропередачи продольного электроснабжения) относительно шин тяговой подстанции и рельсового пути в месте подключения трехэлементной отсасывающей цепи; $Z_{п}$ — переходное сопротивление, возникающее в месте короткого замыкания и моделирующее напряжение дуги.

Из теоремы об эквивалентном генераторе следует

$$Z_{вх} = \frac{\dot{U}_{кк}}{\dot{I}_к},$$

где $\dot{I}_к$ — ток короткого замыкания на шинах тяговой подстанции напряжением 27,5 кВ.

Отметим, что в ряде публикаций относительно $Z_{вх}$ имеются расхождения в его определении. Так, в руководящих указаниях по релейной защите систем тягового электроснабжения входное сопротивление $Z_{вх}$ рекомендуется рассчитывать согласно выражению [6]

$$Z_{вх} = 2U_n^2 \left[\frac{1}{S_c} + \frac{u_k\%}{100S_n n} \right] = 2(Z_c + Z_t), \quad (1)$$

где $u_k\%$ — паспортное значение напряжения короткого замыкания; S_n — номинальная мощность силового тягового трансформатора; S_c — мощность короткого замыкания на вводе тяговой подстанции; U_n — номинальное напряжение на шинах вторичной (тяговой) обмотки силового тягового трансформатора; n — количество включенных на тяговой подстанции силовых тяговых трансформаторов; Z_c — сопротивление системы внешнего электроснабжения; Z_t — сопротивление силовых тяговых трансформаторов подстанции.

Отметим, что использование второго выражения формулы (1) для определения $Z_{вх}$ приводит к серьезным погрешностям, поскольку, как будет показано ниже, вместо коэффициента, равного 2, необходимо в формулу подставлять коэффициент, равный 2/3.

Справедливость формулы (1), по мнению авторов публикаций [1, 2], можно проверить, если вторичную обмотку трансформатора преобразовать в «звезду». Однако при таком преобразовании ток короткого замыкания протекает по двум фазам, хотя в реальной схеме, т. е. при соединении вторичной обмотки тягового трансформатора в «треугольник» сопротивлений, он распределяется по трем линейным проводам линии электропередачи продольного электроснабжения (ЛЭП).

В источниках [7, 8, 9] исследование работы ЛЭП и силовых трансформаторов при возникновении неполнофазных режимов рекомендуется проводить при помощи метода симметричных составляющих. Применительно к ЛЭП и силовым трансформаторам этот метод можно упростить, так как для токов прямой и обратной последовательностей активные и индуктивные сопротивления ЛЭП и обмоток трансформатора одинаковы [7].

Отметим, что при неучете токов намагничивания и при отсутствии составляющей тока нулевой последовательности, что имеет место при соединении вторичной (тяговой) обмотки силового трансформатора в «треугольник» сопротивлений, каждую фазу трансформатора можно рассматривать независимо — как однофазный трансформатор [7].

Прежде чем перейти к токораспределению $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ в ЛЭП и обмотках трансформатора учтем, что фазные напряжения (ЭДС) внешнего электроснабжения в ряде случаев при незначительной мощности системы внешнего электроснабжения несимметричны и могут быть представлены ЭДС прямой ($\dot{E}_{A0_{np}}$, $\dot{E}_{B0_{np}}$, $\dot{E}_{C0_{np}}$), обратной ($\dot{E}_{A0_{обр}}$, $\dot{E}_{B0_{обр}}$, $\dot{E}_{C0_{обр}}$) и нулевой ($\dot{E}_{A0_n} = \dot{E}_{B0_n} = \dot{E}_{C0_n} = \dot{E}_{0_n}$) последовательностей. Укажем, что значение этих напряжений, их фазы не известны. Однако, как будет показано ниже, их определение для решения поставленной задачи (нахождения $Z_{вх}$) не понадобится. При соединении обмоток источника питания в «звезду» сопротивление $\dot{E}_{0_n} = 0$.

Еще раз обратим внимание на то, что тяговая нагрузка переменного тока (ток короткого замыкания) создает несимметричную нагрузку для питающей ее трехфазной ЛЭП. Поэтому расчет системы тягового электроснабжения целесообразно выполнять методом симметричных составляющих. Представление системы тягового электроснабжения в виде однолинейной схемы замещения при расчете электромагнитных процессов в тяговых сетях, как это сделано в [1, 2], приводит к неконтролируемым погрешностям.

Определение входного сопротивления системы внешнего электроснабжения и тяговой подстанции выполним применительно к схеме, представленной на рис. 1 [9].

Переходя от источника тока к ЭДС при учете реального распределения тока по фазам вторичной обмотки силового тягового трансформатора, расчетная схема рис. 1 преобразуется в схему, приведенную на рис. 2.

На рис. 2 расчетные значения ЭДС, приведенные к фазному напряжению первичной обмотки силового тягового трансформатора, равны

$$\begin{aligned}\dot{E}_{ab} &= -\frac{1}{3}iZ_{2r}n; \quad \dot{E}_{bc} = \frac{2}{3}iZ_{2r}n; \\ \dot{E}_{ca} &= -\frac{1}{3}iZ_{2r}n, \sum_{i=1}^n X_i^2\end{aligned}\quad (2)$$

где Z_{2r} — сопротивление одной фазы вторичной обмотки тягового трансформатора; n — коэффициент трансформации тягового трансформатора.

При линейном напряжении линии электропередачи продольного электроснабжения (ЛЭП) равны 110 кВ $n = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 27,5} = 2,31$.

Разложим $\dot{E}_{ab}$, $\dot{E}_{bc}$ и $\dot{E}_{ca}$ на симметричные составляющие источников ЭДС. Получим:

— напряжение нулевой последовательности

$$\dot{U}_{ab0} = \dot{U}_{bc0} = \dot{U}_{ca0} = 0;$$

— напряжение прямой последовательности фазы ab

$$\dot{E}_{ab_{np}} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{ab} + a\dot{E}_{bc} + a^2\dot{E}_{ca}) = \frac{1}{3}iZ_{2r}ne^{+j120^\circ}$$

при $a = e^{+j120^\circ}$.

Напряжение обратной последовательности фазного напряжения вторичной обмотки

$$\dot{E}_{ab_{обр}} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{ab} + a^2\dot{E}_{bc} + a\dot{E}_{ca}) = \frac{1}{3}iZ_{2r}ne^{-j120^\circ}.$$

Используя известное положение о распределении напряжений прямой и обратной последовательностей других фаз, а именно фаз bc и ca , запишем

$$\dot{E}_{bc_{np}} = \dot{E}_{ab_{np}}e^{-j120^\circ} = \frac{1}{3}iZ_{2r}n;$$

$$\dot{E}_{ca_{np}} = \dot{E}_{ab_{np}}e^{+j120^\circ} = \frac{1}{3}iZ_{2r}n;$$

$$\dot{E}_{bc_{обр}} = \dot{E}_{ab_{обр}}e^{+j120^\circ} = \frac{1}{3}iZ_{2r}n;$$

$$\dot{E}_{ca_{обр}} = \dot{E}_{ab_{обр}}e^{-j120^\circ} = \frac{1}{3}iZ_{2r}n.$$

Для нахождения линейного тока прямой последовательности в фазе A ($\dot{I}_{A_{np}}$) учтем следующее [8]. Влияние трансформации «звезда» — «треугольник» на фазовое положение векторов напряжения относительно нейтрали должно быть таким же, как и их влияние на положение векторов линейных токов. В противном случае не будут равны значения активной

и реактивной (обменной) мощностей с обеих сторон трансформатора. Поэтому для каждой трансформации с «треугольника» в «звезду» следует составляющую прямой последовательности сдвинуть на 90° против часовой стрелки. Подобным же образом составляющая обратной последовательности фазового положения, проходя трансформацию «треугольник» — «звезда», сдвигается по часовой стрелке на угол 90° . Тогда

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A_{np}} &= \frac{\dot{E}_{A0_{np}}}{Z_3} - \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{j120^\circ} e^{j90^\circ} = \\ &= \frac{\dot{E}_{A0_{np}}}{Z_3} + \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{j30^\circ} \end{aligned} \quad (3)$$

при $Z_3 = Z_L + Z_{1T} + Z_{2T} n^2 = Z_L + Z_T$, где Z_L — сопротивление одной фазы ЛЭП от источника питания (районной подстанции) до тяговой подстанции; Z_{1T} — сопротивление первичной обмотки силового тягового трансформатора; Z_T — сопротивление одной фазы силового тягового трансформатора.

Известно, что $Z_T = 2Z_{1T} = 2Z_{2T} n^2$.

Аналогично токи прямой последовательности в фазах *B* и *C* равны

$$\begin{aligned} \dot{I}_{B_{np}} &= \dot{I}_{A_{np}} n e^{-j120^\circ} = \frac{\dot{E}_{B0_{np}}}{Z_3} + \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{-j90^\circ}; \\ \dot{I}_{C_{np}} &= \dot{I}_{A_{np}} n e^{+j120^\circ} = \frac{\dot{E}_{C0_{np}}}{Z_3} - \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{-j30^\circ}. \end{aligned}$$

Расчет токов обратной последовательности в фазе осуществляется по формуле:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A_{обр}} &= \frac{\dot{E}_{A0_{обр}}}{Z_3} - \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{-j210^\circ} = \frac{\dot{E}_{A0_{обр}}}{Z_3} + \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{-j30^\circ}; \\ \dot{I}_{B_{обр}} &= \dot{I}_{A_{обр}} n e^{+j120^\circ} = \frac{\dot{E}_{B0_{обр}}}{Z_3} + \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{+j90^\circ}; \\ \dot{I}_{C_{обр}} &= \dot{I}_{A_{обр}} n e^{-j120^\circ} = \frac{\dot{E}_{C0_{обр}}}{Z_3} - \frac{1}{3} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n e^{+j30^\circ}. \end{aligned}$$

Окончательно можно записать выражения по определению токораспределения в линейных проводах

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A_{np}} + \dot{I}_{A_{обр}} = \frac{\dot{E}_{A0}}{Z_3} + \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B_{np}} + \dot{I}_{B_{обр}} = \frac{\dot{E}_{B0}}{Z_3}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C_{np}} + \dot{I}_{C_{обр}} = \frac{\dot{E}_{C0}}{Z_3} - \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I} \frac{Z_{2T}}{Z_3} n \end{aligned} \quad (4)$$

при $\dot{E}_{A0} = \dot{E}_{A0_{np}} + \dot{E}_{A0_{обр}}$; $\dot{E}_{B0} = \dot{E}_{B0_{np}} + \dot{E}_{B0_{обр}}$;

$$\dot{E}_{C0} = \dot{E}_{C0_{np}} + \dot{E}_{C0_{обр}}.$$

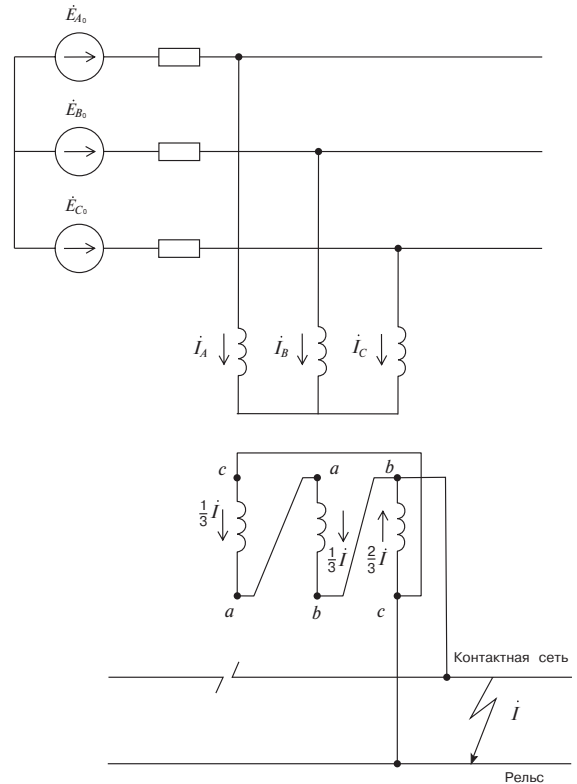


Рис. 1. Расчетная схема замещения системы внешнего электроснабжения и силового тягового трансформатора
Fig. 1. The calculated equivalent circuit of the external power supply system and a traction transformer

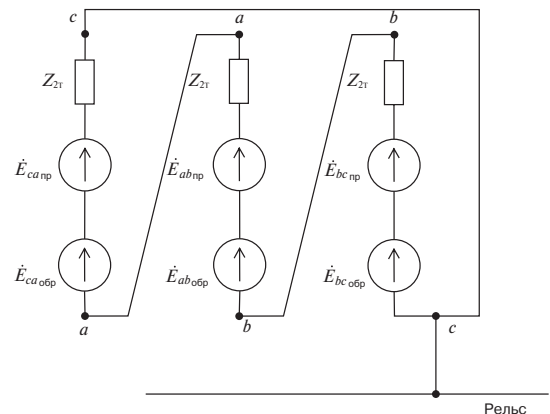


Рис. 2. Расчетная схема определения напряжений во вторичной обмотке силового тягового трансформатора
Fig. 2. The calculation scheme for determining stresses in the secondary winding of a power traction transformer

Для последующего нахождения $Z_{вх} = Z_{вх_{ис}}$ (входное сопротивление относительно зажима фазы *bc*) учтем следующее. Известно, что $\dot{I}_B = 2/3 \cdot \dot{I} / n$.

Тогда $\frac{\dot{E}_{B0}}{Z_3} = \frac{2}{3} \frac{\dot{I}}{n}$. Откуда

$$Z_{вх_{ис}} = Z_{вх} = \frac{\dot{E}_{B0} n}{\dot{I}} = \frac{2}{3} Z_3 = \frac{2}{3} (Z_L + Z_T). \quad (5)$$

Остановимся на определении токов $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_C$. Из теории работы силового трансформатора [7] следует, что $\dot{I}_A = \dot{I}_C$. Кроме того, $\dot{I}_A + \dot{I}_C = -\dot{I}_B$.

Из выражений (4) найдем, что

$$\dot{I}_A + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{A0}}{Z_3} + \frac{\dot{U}_{C0}}{Z_3} = -\frac{\dot{U}_{B0}}{Z_3} \text{ и } \dot{I}_A = \dot{I}_C = -\frac{\dot{U}_{B0}}{2Z_3}.$$

При расчетах токов короткого замыкания в тяговой сети выражение для определения $Z_{\text{вхвс}}$ имеет вид:

$$Z_{\text{вхвс}} = \frac{2}{3}(Z_{\text{л}} + Z_{\text{т}}) = \frac{2}{3}\left(\frac{3U_{\text{н}}^2}{S_{\text{с}}} + \frac{3u_{\text{кз}}\%U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}}\right) = 2\left(\frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{с}}} + \frac{u_{\text{кз}}\%U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}}\right). \quad (6)$$

Предлагаемая схема замещения и расчет системы тягового электроснабжения. В публикации [2] приведена, по мнению авторов, «...новая схема замещения для расчета токов короткого замыкания». Однако в [1, 2] не указан путь протекания тока короткого замыкания, возникающего при нарушении изоляции контактной сети. Поэтому ниже приведена схема из публикации [1] с указанием пути протекания тока ко-

роткого замыкания по элементам схемы замещения системы тягового электроснабжения (рис. 3).

В [2] отмечается, что расчет известной схемы замещения системы тягового электроснабжения имеет недостаток: отсутствует электрическая связь по ЛЭП между тяговыми подстанциями.

Справедливости ради следует указать, что учет электрической связи по ЛЭП между тяговыми подстанциями осуществлялся и ранее. Так, в [9] учет электрической связи между тяговыми трансформаторами выполнен с использованием метода симметричных составляющих как для определения уравнильных токов, так и для расчета энергетических соотношений в системе тягового и внешнего электроснабжения.

Отметим, что при разработке новой схемы замещения тяговой сети переменного тока необходимо, чтобы она отражала особенности работы тягового и внешнего электроснабжения. Так известно, что даже при отсутствии нагрузки на рассматриваемой фидерной зоне в тяговой сети протекают уравнильные токи. В предлагаемой расчетной схеме публикации [1] эти токи не могут протекать. Кроме того, непонятно, каким образом происходит в предлагаемой схеме питание электроподвижного состава.

Полученное выражение для определения суммарного сопротивления системы внешнего электроснабжения позволяет выполнить расчеты по определению токораспределения, в том числе и при коротких замыканиях в тяговых сетях двухпутных участков при их двухстороннем питании.

Отметим, что в [1] для расчета тока короткого замыкания рекомендуется использовать схему замещения, представленную там же. Схема замещения тяговой сети (рис. 3) принципиально отличается от схемы, приведенной в [3, 4, 5]. Обратим внимание, что в [1] рельсовый путь на тяговой подстанции не подключен посредством отсасывающей линии к фазе силового тягового трансформатора (рис. 3), а это не допустимо. При отсутствии такого соединения в системе внешнего электроснабжения протекает ток нулевой последовательности, что при наличии силового трехфазного трансформатора быть не должно.

Укажем, на наш взгляд, причину нецелесообразности использования предложенной в [1, 2] расчетной схемы для определения тока короткого замыкания и исследования электромагнитных процессов в тяговых сетях.

Так, сведение неполнофазных режимов работы несимметричных систем электроснабжения к расчету однолинейной схемы электроснабжения обуславливает появление неконтролируемой погрешности. Это, в свою очередь, приводит к отказу в новой схеме замещения тяговой сети [1] соединения одной из фаз силового тягового трансформатора (чаще фазы С) с

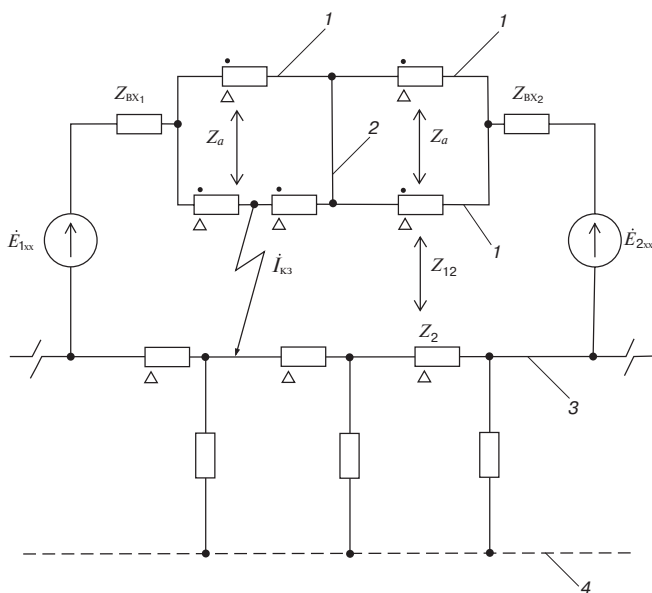


Рис. 3. Предлагаемая в публикации [1] схема замещения системы тягового электроснабжения: 1 — контактная сеть; 2 — пост секционирования; 3 — рельсовый путь; 4 — удаленная земля; Z_0, Z_{T1}, Z_{T2} — параметры Т-образной схемы замещения ЛЭП; r_n — переходное сопротивление «рельсы — земля»; $Z_{кк}$ — сопротивление контура «контактная сеть — земля»; Z_{12} — взаимноиндуктивное сопротивление между контактной сетью и рельсами; Z_2 — сопротивление контура «рельсы — земля»

Fig. 3. Offered in the publication [1] equivalent circuit of a traction power supply system: 1 — catenary network; 2 — sectioning point; 3 — railway track; 4 — remote earth; Z_0, Z_{T1}, Z_{T2} — parameters of the T-shaped equivalent circuit transmission line; r_n — transition resistance “rails — earth”; $Z_{кк}$ — resistance of the contour “contact network — earth”; Z_{12} — mutual inductive resistance between the contact network and rails; Z_2 — resistance of the “rails — earth” contour

рельсовым путем посредством трехэлементной цепи отсоса.

Представляется, что возможной схемой для нахождения токораспределения в тяговой сети, лишенной недостатков схемы, приведенной в [1, 2], является схема на рис. 4. Расчет этой схемы известен [5, 10], в том числе и при учете неоднородных по длине первичных параметров рельсового пути. Важно отметить, что наиболее сложно в этой схеме рассчитать напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции.

Пусть $\dot{E}_{1x} = \dot{U}_{1x}$ — напряжение холостого хода на вторичной стороне силового тягового трансформатора; $\dot{I}_{u1}, \dot{I}_{u2}$ — комплексные значения тяговых токов соседних фидерных зон, оказывающих влияние на энергетические процессы в системе внешнего и тягового электроснабжения; их фазы приведены в [9].

При отсутствии транзитных токов и нагрузки между тяговыми подстанциями

$$\dot{E}_{1x} = \dot{E}_{bc} - \frac{2}{3} \dot{I}_{u1} Z_{\tau 1} - \frac{1}{3} \dot{I}_{u2} Z_{\text{общ}};$$

$$\dot{E}_{2x} = \dot{E}_{bc} - \frac{2}{3} \dot{I}_{u2} Z_{\tau 2} - \frac{1}{3} \dot{I}_{u1} Z_{\text{общ}}.$$

Токи нагрузок тяговой подстанции 1 ($\dot{I}_{n1}$) и 2 ($\dot{I}_{n2}$) рассматриваемой фидерной зоны могут быть определены по известным формулам [3]. Так, i -й ток подстанций 1 и 2 тока i -го электровоза соответственно равен

$$\dot{I}_{i1} = \dot{I}_i \frac{l - l_i}{l}; \quad \dot{I}_{i2} = \dot{I}_i \frac{l_i}{l},$$

где l_i — расстояние от тяговой подстанции до места расположения i -го электровоза; l — расстояние между тяговыми подстанциями.

Токораспределение в контактной сети тока i -го электровоза определяется обратно пропорционально сопротивлениям $Z_{\tau c(i)}$. Формулы для их нахождения определены ниже.

Тогда

$$\dot{E}_{1x} = \dot{E}_{bc} - \frac{2}{3} \dot{I}_{u1} Z_{\tau 1} - \dot{I}_{n1} Z_{\text{вхвс}1} - \frac{1}{3} \dot{I}_{u2} Z_{\text{общ}} - \dot{I}_{n2} Z_{\text{общ}};$$

$$\dot{E}_{2x} = \dot{E}_{bc} - \frac{2}{3} \dot{I}_{u2} Z_{\tau 2} - \dot{I}_{n2} Z_{\text{вхвс}2} - \frac{1}{3} \dot{I}_{u1} Z_{\text{общ}} - \dot{I}_{n1} Z_{\text{общ}},$$

где $Z_{\text{общ}}$ — общее сопротивление, по которому протекают токи $\dot{I}_{n1}$ и $\dot{I}_{n2}$. Приблизительно это сопротивление равно приведенному к напряжению тяговой обмотки сопротивлению ЛЭП ($Z_{л1}$) от районной подстанции до ближайшей к ней тяговой подстанции рассматриваемой фидерной зоны.

Транзитные токи ($\dot{I}_{\tau A}, \dot{I}_{\tau B}, \dot{I}_{\tau C}$), протекающие в системе внешнего электроснабжения, учитываются путем расчета падений напряжения на соответствующи-

щих участках ЛЭП от районной подстанции до тяговых подстанций рассматриваемой фидерной зоны. Тогда

$$\dot{E}_{1x} = \dot{E}_{bc} - \frac{2}{3} \dot{I}_{u1} Z_{\tau 1} - \dot{I}_{n1} Z_{\text{вхвс}1} - \frac{1}{3} \dot{I}_{u2} Z_{\text{общ}} - \dot{I}_{n2} Z_{\text{общ}} - \dot{I}_{\tau B} Z_{л1} n; \quad (7)$$

$$\dot{E}_{2x} = \dot{E}_{bc} - \frac{2}{3} \dot{I}_{u2} Z_{\tau 2} - \dot{I}_{n2} Z_{\text{вхвс}2} - \frac{1}{3} \dot{I}_{u1} Z_{\text{общ}} - \dot{I}_{n1} Z_{\text{общ}} - \dot{I}_{\tau B} Z_{л2} n, \quad (8)$$

где $Z_{л2}$ — приведенное к напряжению тяговой обмотки сопротивление ЛЭП от районной подстанции до второй тяговой подстанции рассматриваемой фидерной зоны.

С учетом сказанного расчет токораспределения в тяговой сети может быть определен из схемы, представленной на рис. 4. Метод расчета аналогичной схемы известен [5, 10].

Так, токораспределение в схеме (рис. 4) определяется по формулам:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_{1x} Z_{\tau c1} - \dot{E}_{2x} Z_{1,II}}{Z_{\tau c1} Z_{\tau c1} - Z_{1,II}^2}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2x} Z_{\tau c1} - \dot{E}_{1x} Z_{1,II}}{Z_{\tau c1} Z_{\tau c1} - Z_{1,II}^2} \quad (9)$$

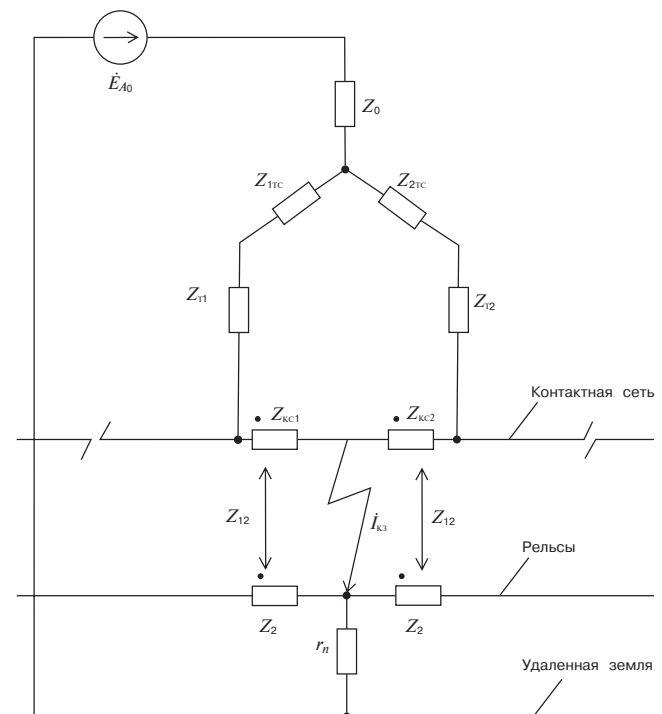


Рис. 4. Схема замещения тягового электроснабжения двухпутных участков при двухстороннем питании: 1 — контактная сеть; 2 — пост секционирования; 3 — рельсовый путь; 4 — удаленная земля; r_n — переходное сопротивление «рельсы — земля»

Fig. 4. Equivalent circuit of the traction power supply of double-track sections in bilateral power: 1 — catenary network; 2 — post of sectioning; 3 — railway track; 4 — remote land; r_n — transition resistance “rails — earth”

С незначительной погрешностью при расчете токов $\dot{I}_{1,2}$ можно принять

$$Z_{\text{тс(III)}} = Z_{\text{э(III)}} - \frac{Z_{12}^2}{Z_2} I_{1(2)}; \quad Z_{1,II} = Z_{\text{э(II)}}$$

где Z_2 — сопротивление 1 км рельсового пути; Z_{12} — взаимное сопротивление между рельсовым путем и контактной сетью.

Входящие в формулы параметры $Z_{\text{э(III)}}$, $Z_{\text{э(II)}}$ известны [10] и зависят от состояния выключателей тяговых подстанций и поста секционирования. Так, при включенных выключателях тяговых подстанций и поста секционирования эти параметры определяются из соотношений

$$Z_{\text{эI}} = 0,5(Z_1 + Z_a)l_1 + Z_{\text{вхвсI}} + Z_{\text{э(II)}};$$

$$Z_{\text{эII}} = 0,5(Z_1 + Z_a)l_2 + Z_{\text{вхвсII}} + Z_{\text{э(II)}};$$

$$Z_{\text{э(II)}} = (Z_1 - Z_a) \frac{l_n - l_1}{2l_n} l_1 + Z_{\text{II}},$$

где $Z_{\text{вхвсI}}$, $Z_{\text{вхвсII}}$ — приведенные к напряжению тяговой обмотки сопротивления системы внешнего электроснабжения соответственно подстанций 1 и 2, тяговых трансформаторов (их определение дано выше); Z_1 — сопротивление 1 км контактной подвески одного пути; Z_a — взаимное индуктивное сопротивление 1 км между контактными подвесками двухпутного участка; l_n — расстояние от первой тяговой подстанции до поста секционирования; l_1 , l_2 — расстояния от тяговых подстанций 1 и 2 до места короткого замыкания.

Укажем, что входящие в формулы (9) первичные электрические параметры тяговой сети известны и их числовые значения приведены в соответствующих справочных изданиях.

Заключение. 1. Используя метод симметричных составляющих, приходим к выводу, что при расчетах внутреннего сопротивления тяговой подстанции, состоящего из сопротивлений ЛЭП и силового тягового трансформатора, необходимо использовать расчетные формулы, полученные при учете реального токораспределения во вторичной (тяговой) обмотке силового тягового трансформатора.

Предложена методика расчета приведенного к напряжению 27,5 кВ эквивалентного сопротивления системы внешнего электроснабжения и силового тягового трансформатора.

2. Показано, что расчеты входного сопротивления по известной методике отличаются от предложенной методики в три раза при условии определения сопротивления исходя из реальных параметров системы внешнего электроснабжения и тягового трансформатора.

3. Предложенная рядом специалистов схема замыкания тяговой сети для расчета токов короткого замыкания не отражает реальных соотношений по токораспределению в тяговых сетях.

Основная причина несоответствия предлагаемой схемы с существующей системой тягового электроснабжения определяется необоснованным переходом от несимметричной системы «трехфазная ЛЭП—трансформатор—система электроснабжения—однофазная тяговая сеть» к однолинейной схеме расчета. При расчете токораспределения по данной схеме отсутствует металлическая связь рельсового пути с одной из фаз (чаще фазы С) силового тягового трансформатора.

Отсутствие этой связи приводит к протеканию между районной и тяговой подстанциями тяговых токов, тока короткого замыкания по земле, что не допустимо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока при учете внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 3. С. 17–23.
2. Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11 / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, В.Л. Осокин, К.С. Субханвердиев // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 5. С. 19–25.
3. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
4. Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: Желдориздат, 2002. 720 с.
5. Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 348 с.
6. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: Трансиздат, 2005. 216 с.
7. Петров Г.Н. Электрические машины. Часть 1. М.: Энергия, 1974. 240 с.
8. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих. Л.: ОНТИ НКПТ СССР, 1936. 410 с.
9. Караев Р.И., Волобровский С.Д., Ковалёв И.А. Электрические сети и системы. М.: Транспорт, 1988. 326 с.
10. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

КОСАРЕВ Борис Иванович,
заслуженный деятель науки России, д-р техн. наук,
профессор, ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 02.10.2017 г., принята к публикации 19.11.2017 г.

Calculation methodology of current distribution in traction networks of AC current

A. B. KOSAREV¹, B. I. KOSAREV²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Railway Engineering" (MIIT), Moscow, 127994, Russia

Abstract. Several publications have been devoted to the development of traction power supply for alternating current [1, 2]. They set the task of considering the resistance of the external power supply system and power traction transformers when calculating the current distribution in traction networks.

With all the merits of the existing methods for calculating these resistances, there are discrepancies in the published sources in determining the parameters of the equivalent circuit for the traction power supply system [3, 4, 5, 6].

In the present work, the authors propose a technique for calculating reduced to a voltage of 27.5 kV equivalent resistances of an external power supply system and a power traction transformer.

An equivalent circuit for replacing the traction power supply system is substantiated, allowing to take into account the voltage drop on the overall resistance of the external power supply system from the traction currents of the considered and adjacent feeder zones, as well as transit currents flowing through the power lines.

Using the method of symmetrical components it was obtained that when calculating the internal resistance of a traction substation consisting of the resistances of the longitudinal power supply line and the power traction transformer, it is necessary to use the calculated formulas obtained when taking into account the actual current distribution in the secondary (traction) winding of the power traction transformer.

It is shown that the traction network equivalent circuit for the calculation of short-circuit currents, given in [1, 2], does not reflect the real current distribution relationships in traction networks. The main reason for the inconsistency of the scheme proposed by a number of experts with the existing traction power supply system is determined by an unjustified transition from an asymmetric system "three-phase transmission line — transformer — power supply system — single-phase traction network" to a single-line calculation scheme. When calculating the current distribution according to this scheme, there is no metallic connection of the track with one of the phases (more often phase C) of the power traction transformer.

The absence of this connection leads to the flow of traction currents between the district and traction substations, short-circuit current on the ground, which is not permissible.

Keywords: power traction transformer; external power supply system; traction network; short circuit; current; voltage

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335>

REFERENCES

1. German L.A., Subkhanverdiev K.S. *Raschety tokov korotkogo замыкания в тяговой сети переменного тока при учете*

vneshnego elektrosnabzheniya [Calculations of short-circuit currents in a traction AC network when taken into account external power supply]. Electronics and electric equipment of transport, 2017, no. 3, pp. 17–23.

2. Serebryakov A.S., German L.A., Osokin V.L., Subkhanverdiev K.S. *Analiz metodov rascheta tokov korotkogo замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11* [Analysis of methods for calculating the short-circuit currents of a transformer when connecting windings according to the Y/Δ-11 scheme]. Electronics and electric equipment of transport, 2017, no. 5, pp. 19–25.

3. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p.

4. Figurnov E.P. *Releynaya zashchita* [Protective relaying]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2002, 720 p.

5. Kosarev A.B., Kosarev B.I., Serbinenko D.V. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka* [Electromagnetic processes in AC railway power supply systems]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 348 p.

6. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [Guidelines for the relay protection of traction power supply systems]. Moscow, Transizdat Publ., 2005, 216 p.

7. Petrov G.N. *Elektricheskie mashiny. Chast' 1* [Electric machines. Part 1]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 240 p.

8. Vagner K.F., Evans R.D. *Metod simmetrichnykh sostavlyayushchikh* [Method of symmetric components]. Leningrad, ONTI NKPT SSSR Publ., 1936, 410 p.

9. Karaev R.I., Volobriniski S.D., Kovalev I.A. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electric networks and systems]. Moscow, Transport Publ., 1988, 326 p.

10. Kosarev A.B., Kosarev B.I. *Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* [Fundamentals of electromagnetic safety of railroad power supply systems]. Moscow, Intext Publ., 2008, 480 p.

ABOUT THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV,

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

Boris I. KOSAREV,

Honored Scientist of Russia, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MIIT

Received 02.10.2017

Accepted 19.11.2017

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

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.

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

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.