

Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27,5 кВ

ФИГУРНОВ Е.П., ЖАРКОВ Ю.И., ПОПОВА Н.А.

Расчет токов короткого замыкания в тяговых сетях электрифицированного транспорта требует учета сопротивления трёхфазной системы внешнего электроснабжения. Его учитывают с помощью так называемого входного сопротивления тяговых подстанций. Для вычисления входного сопротивления используется схема замещения трёхфазной системы электроснабжения совместно с силовым трансформатором тяговой подстанции, выполненная традиционно в виде звезды или нетрадиционно – в виде треугольника. Сопротивление фазы одних и тех же элементов системы электроснабжения и трансформатора в схеме замещения в виде треугольника в три раза больше, чем их значение в схеме замещения в виде звезды, причём это соотношение, а также выбор вида схемы замещения (звезда или треугольник) не зависит от схемы соединения обмоток силового трансформатора. Значения входного сопротивления тяговой подстанции для схем замещения в виде звезды и в виде треугольника тождественно одинаковы. При этом схема замещения в виде звезды является предпочтительной. Принятый метод учёта системы внешнего электроснабжения отдельно и независимо для каждой из тяговых подстанций является упрощённым. Его использование для некоторых схем питания тяговых подстанций, например при кольцевом питании от высоковольтной линии продольного электроснабжения, приводит к заметным ошибкам при вычислении распределения токов короткого замыкания тяговой сети между смежными тяговыми подстанциями. Предлагается во входном сопротивлении тяговой подстанции определять сопротивление удалённой части энергосистемы по параметрам короткого замыкания на шинах опорных тяговых подстанций. При этом дополнительно учитываются эквивалентные сопротивления линий продольного электроснабжения, соединяющие опорные подстанции с промежуточными. Приведены соответствующие формулы для различных схем питания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тяговые подстанции, внешнее электроснабжение, тяговые сети, короткие замыкания, схемы замещения, входное сопротивление тяговых подстанций

Сопротивление системы внешнего электроснабжения (СВЭ) определяют из схем замещения. Традиционно схема замещения трёхфазной электроустановки (системы электроснабжения) при коротком замыкании изображается в виде звезды [1]. Необходимые формулы, таблицы, графики для расчёта симметричных и несимметричных коротких замыканий приведены в [2] и проверены многолетним опытом применения. Схема замещения трёхфазной электроустановки при коротком замыкании (КЗ) может иметь и нетрадиционный вид треугольника. Такой вид недавно в качестве рекомендуемого стандартизирован для тяговых подстанций [3]. Наличие двух возможностей формирования вида схемы замещения породило в ряде публикаций, как отмечено в [4], определённые расхождения при оценке её параметров и даже некоторые необоснованные толкования.

Более полувека сопротивление системы внешнего электроснабжения учитывается по параметрам КЗ на вводах каждой из тяговых подстанций, которые сообщаются энергоснабжающей организацией

[5–7, 9, 10]. Для опорных тяговых подстанций или при двухстороннем питании тяговых подстанций от линий продольного электроснабжения и достаточно мощной энергосистемы такие расчёты являются вполне допустимыми. С образованием территориальных сетевых и иных энергоснабжающих организаций могут образовываться такие конфигурации схем питания, при которых, как показано в [8–10], подобный метод учёта сопротивления СВЭ приводит к заметным ошибкам при вычислении токов КЗ в тяговой сети и его распределения между смежными тяговыми подстанциями, что сказывается на выборе уставок релейной защиты.

Статья посвящена сравнению видов схем замещения системы внешнего электроснабжения и описанию методов вычисления параметров схем замещения системы при различной её конфигурации. При вычислении токов КЗ учитываются общепринятые допущения и особенности для СВЭ и системы тягового электроснабжения переменного тока:

СВЭ является по фазам полностью симметричной;

КЗ в тяговой сети для СВЭ является удалённым, т.е. периодическая составляющая тока КЗ принимается неизменной по амплитуде;

КЗ в тяговой сети является для трёхфазных силовых трансформаторов тяговой подстанции и СВЭ двухфазным и не содержит составляющей нулевой последовательности;

в межподстанционной зоне с КЗ тяговая нагрузка не учитывается.

Вид схем замещения СВЭ. Схеме питания на рис. 1,а, соответствует традиционная трёхфазная схема замещения в виде звезды [1], показанная на рис. 1,б. При КЗ на выводах тяговой подстанции, например между фазами *b* и *c*, для схемы на рис. 1,б, очевидно:

$$\begin{aligned} \dot{I}_K^{(2)} &= \frac{\dot{E}_b - \dot{E}_c}{2(Z_{s(Y)} + Z_{л(Y)} + Z_{т(Y)})} = \\ &= \frac{\dot{E}_{bc}}{2(Z_{s(Y)} + Z_{л(Y)} + Z_{т(Y)})}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее все сопротивления, обозначенные буквой *Z*, являются комплексными величинами.

Для той же схемы питания трёхфазная схема замещения может быть представлена, как показано на рис. 1,в, в виде треугольника [3]. Для неё имеем:

$$\begin{aligned} \dot{I}_K^{(2)} &= \frac{\dot{E}_{ac} - \dot{E}_{ba}}{2(Z_{s(\Delta)} + Z_{л(\Delta)} + Z_{т(\Delta)})} - \\ &- \frac{\dot{E}_{cb}}{Z_{s(\Delta)} + Z_{л(\Delta)} + Z_{т(\Delta)}} = \frac{3\dot{E}_{bc}}{2(Z_{s(\Delta)} + Z_{л(\Delta)} + Z_{т(\Delta)})}. \end{aligned} \quad (2)$$

Схемы, приведённые на рис. 1,б и в, являются взаимозаменяемыми, если при одинаковых линейных ЭДС будут равны и линейные токи. Приравняв выражения (1) и (2), получаем:

$$Z_{s(\Delta)} + Z_{л(\Delta)} + Z_{т(\Delta)} = 3(Z_{s(Y)} + Z_{л(Y)} + Z_{т(Y)}). \quad (3)$$

Иными словами, если схему замещения СВЭ в виде звезды заменить эквивалентной схемой в виде треугольника, то сопротивление каждого элемента

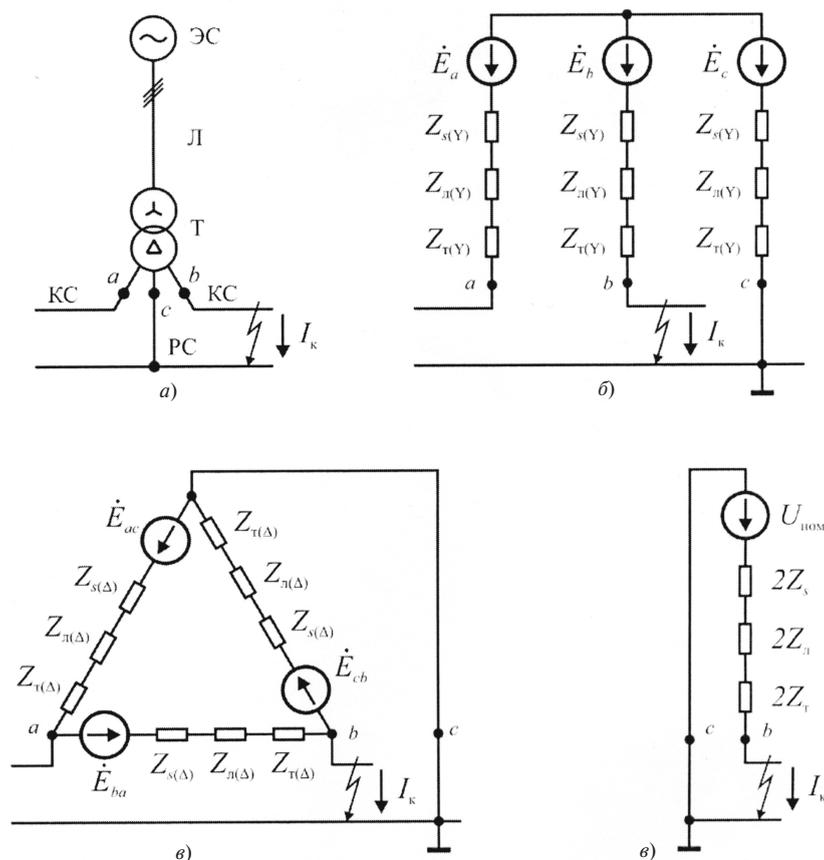


Рис. 1. Схемы питания одной тяговой подстанции и её схема замещения при КЗ тяговой сети: а – схема питания; б – схема замещения в виде звезды; в – схема замещения в виде треугольника; г – результирующая схема замещения при двухфазном КЗ; ЭС – электроэнергетическая система; Л – линии электропередачи, связывающие эту систему с выводами в тяговую подстанцию; Т – силовой трансформатор тяговой подстанции; КС – контактная сеть левого и правого плеч питания; РС – рельсовая сеть; $I_{л}^{(2)}$ – ток двухфазного КЗ тяговой сети, состоящей из контактной и рельсовой сетей; E_a, E_b, E_c и E_{ac}, E_{bc}, E_{cb} – соответственно фазные и линейные ЭДС источника питания; $Z_{s(Y)}, Z_{л(Y)}, Z_{т(Y)}$ – фазные сопротивления источника питания S, линий электропередачи Л и трансформатора Т в схеме замещения в виде звезды; $Z_{s(\Delta)}, Z_{л(\Delta)}, Z_{т(\Delta)}$ – то же в схеме замещения в виде треугольника

в треугольнике должно быть в три раза больше, чем сопротивление того же элемента в звезде. При этом условии, как следует из (1) и (2), входное сопротивление $Z_{вх}$ тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании ($Z_{вх} = \dot{E}_{bc} / \dot{I}_K^{(2)}$) и для схем в виде звезды или треугольника будет одинаковым и равным:

$$Z_{вх} = 2(Z_{s(Y)} + Z_{л(Y)} + Z_{т(Y)}) = \frac{2}{3}(Z_{s(\Delta)} + Z_{л(\Delta)} + Z_{т(\Delta)}). \quad (4)$$

Из (1)–(3) следует также, что для двухфазного КЗ схемы на рис. 1,б и в могут быть представлены в виде, показанном на рис. 1,г с линейным напряжением холостого хода источника питания $U_{рас}$. Особо отметим, что приведенные соотношения не зависят от схемы соединения первичной и вторичной обмоток силового трансформатора T , поэтому при расчёте КЗ в тяговой сети никаких ограничений на использование того или иного вида рассмотренных схем замещения нет и можно использовать любую из них.

Вместе с тем следует иметь в виду, что методы расчёта и преобразования схем замещения трёхфазных электроустановок (систем электроснабжения) при КЗ, имеющих вид звезды [1], давно и подробно проработаны, в том числе при использовании метода симметричных составляющих, а формулы стандартизированы [2]. Для разветвлённых же СВЭ преобразование и упрощение схем замещения, имеющих вид треугольника, а также использование метода симметричных составляющих может вызвать дополнительные трудности. При вычислении сопротивлений $Z_{(\Delta)}$ для схемы на рис. 1,в используются формулы [3], по которым находят значения $Z_{(Y)}$ и умножают результат на три. Затем при вычислении входного сопротивления $Z_{вх}$ или тока КЗ полученные значения $Z_{(\Delta)}$ вновь делят на 3. Даже по формальным соображениям смысла в таких операциях нет. Таким образом, при расчётах КЗ в тяговой сети схема замещения на рис. 1,в какими-либо преимуществами не обладает, а предпочтительной является схема на рис. 1,б.

В дальнейшем всё изложенное относится только к схеме замещения по рис. 1,б, поэтому индексы (Y) и (Δ) не применяются.

Схема замещения тяговой сети. Схема питания тяговой сети при её двухстороннем питании показана в общем виде на рис. 2,а. Ей соответствует схема замещения, приведенная на рис. 2,б, отличие которой от [6, 7] заключается в наличии дополнительного сопротивления Z_{sAB} , учитывающего взаимную связь между смежными подстанциями по

связывающим их линиям электропередачи продольного электроснабжения СВЭ [3]. В результате расчётов режима КЗ необходимо найти значения токов I_A и I_B , для вычисления которых можно использовать формулы, имеющие по аналогии с [6, 7] вид:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{Арас} \left(1 + \frac{Z_{sAB} + Z_{AB}}{Z_{sB} + Z_B} \right) - \dot{U}_{Врас} \left(\frac{Z_{sAB} + Z_{AB}}{Z_{sB} + Z_B} \right)}{Z_{sA} + Z_A + (Z_{sAB} + Z_{AB}) + \left(1 + \frac{Z_{sA} + Z_A}{Z_{sB} + Z_B} \right)}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{Врас} \left(1 + \frac{Z_{sAB} + Z_{AB}}{Z_{sA} + Z_A} \right) - \dot{U}_{Арас} \left(\frac{Z_{sAB} + Z_{AB}}{Z_{sA} + Z_A} \right)}{Z_{sB} + Z_B + (Z_{sAB} + Z_{AB}) + \left(1 + \frac{Z_{sB} + Z_B}{Z_{sA} + Z_A} \right)}; \quad (6)$$

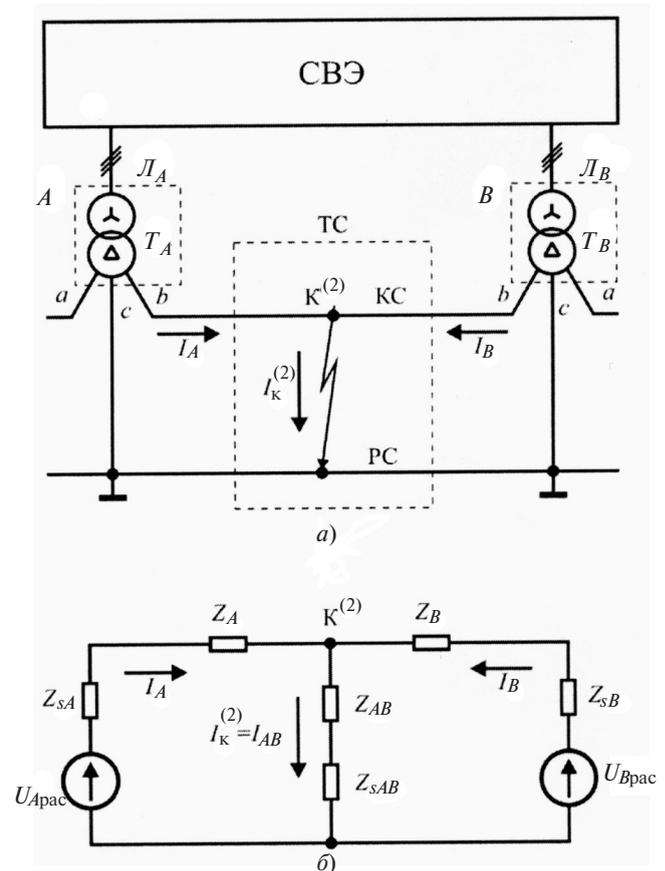


Рис. 2. Схемы питания и замещения тяговой сети при КЗ: а – схема питания; б – схема замещения; А, В – тяговые подстанции; T_A, T_B – силовые трансформаторы тяговых подстанций А и В; J_A, J_B – линии электропередачи, соединяющие СВЭ с тяговыми подстанциями А и В; ТС – тяговая сеть, состоящая из КС и РС; $U_{Арас}, U_{Врас}$ – расчётные напряжения холостого хода тяговых подстанций А и В, кВ; $Z_{пА}, Z_{пВ}$ – сопротивления тяговых подстанций А и В, Ом; $Z_{тсА}, Z_{тсВ}, Z_{AB}$ – сопротивления Т-образной схемы замещения тяговой сети, Ом; Z_{sAB} – сопротивление, учитывающее взаимную связь между тяговыми подстанциями А и В по высоковольтным линиям СВЭ [8], Ом; I_A, I_B, I_{AB} – токи тяговых подстанций А и В, а также в месте КЗ, кА

$$Z_A = 2Z_{TA} + Z_{TCA}; Z_B = 2Z_{TB} + Z_{TCB}, \quad (7)$$

где Z_{sA} и Z_{sB} – эквивалентные сопротивления частей СВЭ, питающих непосредственно тяговые подстанции A и B ; Z_{TA} и Z_{TB} – сопротивления силовых трансформаторов этих подстанций; Z_{sAB} – эквивалентное сопротивление СВЭ питающей обе тяговые подстанции совместно; Z_{TCA} и Z_{TCB} – сопротивления тяговой сети от точки короткого замыкания до тяговых подстанций A и B .

Вычисление сопротивлений тяговой сети Z_{TCA} , Z_{TCB} , Z_{AB} подробно описаны в [6, 7]. Значение сопротивления трансформаторов Z_{TA} и Z_{TB} находят по [2].

Сопротивления Z_{sA} , Z_{sB} , Z_{sAB} зависят от конфигурации СВЭ, их определение рассмотрено ниже.

Элементы схемы замещения. Полная схема СВЭ, принадлежащих территориальным сетевым или иным энергоснабжающим организациям, как правило, неизвестна. Однако для требуемой цели достаточно знать параметры трёхфазного КЗ на вводах опорных тяговых подстанций, а также конфигурацию и параметры высоковольтных линий электропередачи продольного электроснабжения, связывающих опорные тяговые подстанции с промежуточными. В этом случае схема замещения СВЭ будет содержать сопротивление удалённой части энергосистемы, определяемое по параметрам КЗ на вводах опорных тяговых подстанций, и эквивалентные сопротивления линий электропередачи. Сопротивление всех элементов вычисляют в соответствии с [2]. Все сопротивления должны быть приведены к единым базовым условиям.

При расчёте параметров схемы замещения в именованных единицах все ЭДС E принимают равными значению среднего линейного номинального напряжения основной ступени $U_{\text{лин}}$ ($E = U_{\text{лин}} = U_{\text{рас}} = 27,5$ кВ), а сопротивления всех элементов на других ступенях напряжения приводят к этому напряжению. Для вычисления эквивалентного приведенного сопротивления Z_s (Ом) фазы удалённой части СВЭ используют формулу:

$$Z_s = \frac{U_{\text{cp}N} \left(\frac{U_{\text{рас}}}{U_{\text{cp}N}} \right)^2}{\sqrt{3} I_K^{(3)}} = \frac{U_{\text{рас}}^2}{S_K^{(3)}}, \quad (8)$$

где $I_K^{(3)}$ – известное (заданное) значение тока трёхфазного КЗ на вводах опорной тяговой подстанции, кА; $S_K^{(3)}$ – известное (заданное) значение мощности трёхфазного короткого замыкания в той же точке, МВА; $U_{\text{cp}N}$ – среднее значение номинального напряжения вводов, кВ.

Приведенное значение сопротивления фазы линии электропередачи $Z_{\text{л}}$ (Ом) вычисляют по формуле:

$$Z_{\text{л}} = \frac{z_{\text{л}} l U_{\text{рас}}^2}{n_{\text{л}} U_{\text{cp}N}^2}, \quad (9)$$

где $z_{\text{л}}$ – удельное (погонное) сопротивление фазы линии электропередачи, Ом/км; l – длина линии, км; $U_{\text{cp}N}$ – среднее значение номинального напряжения линии электропередачи, кВ; $n_{\text{л}}$ – число параллельно включённых цепей.

Сопротивление Z_T (Ом) фазы трёхфазного силового трансформатора вычисляют по формуле:

$$Z_T = \frac{u_K U_{\text{НОМ}}^2}{100 n_T S_{\text{НОМ}}}, \quad (10)$$

где u_K – напряжение КЗ трансформатора, %; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВА; n_T – число трансформаторов, включённых в работу.

Детализация СВЭ. Учёт конфигурации СВЭ позволяет более обоснованно подойти к определению параметров СВЭ.

Раздельное питание от СВЭ. В этом случае тяговые подстанции получают питание от разных территориальных сетевых подстанций по самостоятельным двухцепным или многоцепным линиям электропередачи. Этот вариант характерен для опорных тяговых подстанций и соответствует рис. 1,а. Сопротивление Z_s (Z_{sA} и Z_{sB}) в этом случае вычисляют по (8) при известных $I_K^{(3)}$ или $S_K^{(3)}$ для вводов тяговой подстанции. Если известны их значения и параметры линии электропередачи, то сопротивление (Ом)

$$Z_s = Z'_s + Z'_T + Z'_L, \quad (11)$$

где Z'_s – сопротивление фазы удалённой части СВЭ, определяемое по (8) для известных $I_K^{(3)}$ или $S_K^{(3)}$ на вводах территориальной сетевой подстанции; Z'_T – сопротивление фазы трансформаторов этой подстанции, вычисляемое по (10); Z'_L – сопротивление двух- или многоцепной линии электропередачи, соединяющей тяговую подстанцию с территориальной сетевой подстанцией, вычисляемое по (9). Для этого случая $Z_{sAB} = 0$.

Двухстороннее питание от одноцепной линии электропередачи. Схема питания показана на рис. 3,а. С учётом рис. 1,г ей соответствует схема замещения на рис. 3,б, в которой точки одинакового потенциала m и n , а также p и q можно соединить. Треугольник $p(q)fg$ можно заменить эквивалентной звездой, как показано на рис. 3,в. Такая

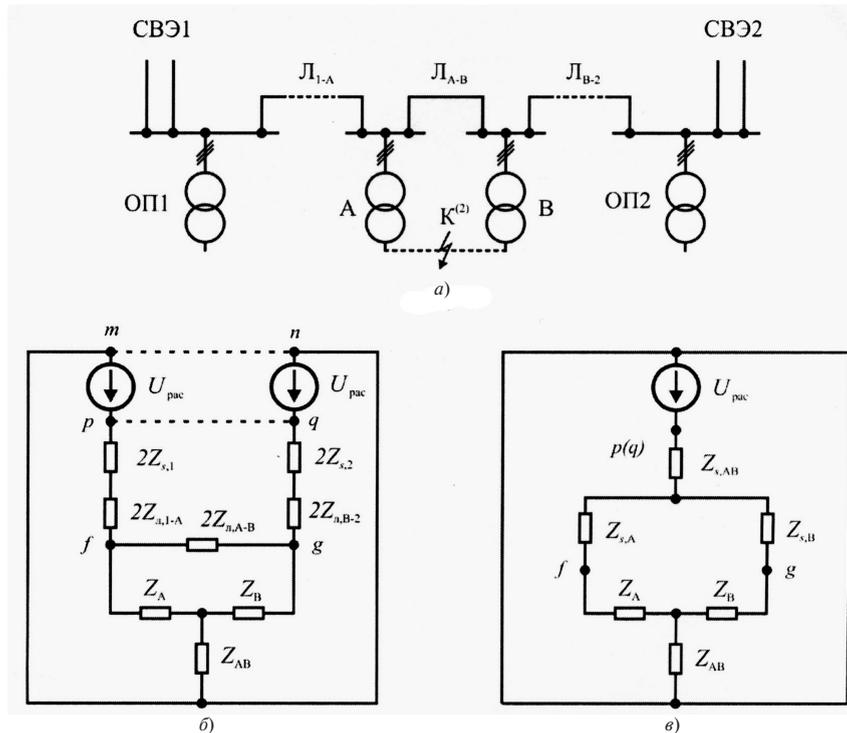


Рис. 3. Двухстороннее питание по одноцепной линии электропередачи: а – схема питания при КЗ ($K^{(2)}$) в тяговой сети; б и в – схемы замещения; $L_{1-A}, L_{A-B}, L_{B-2}$ – участки линии электропередачи между подстанциями; ОП1, ОП2 – опорные тяговые подстанции; А, В – промежуточные тяговые подстанции; Z_{s1}, Z_{s2} – сопротивления удалённых СВЭ; $Z_{л1A}, Z_{лAB}, Z_{лB2}$ – сопротивления участков линий L_{1A}, L_{AB}, L_{B2}

схема легко преобразуется в схему замещения на рис. 2,б, для этого случая:

$$\begin{aligned}
 Z_{sAB} &= \frac{2(Z_{s1} + Z_{л1A})(Z_{s2} + Z_{лB2})}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{л1A} + Z_{лB2} + Z_{лAB}}; \\
 Z_{sA} &= \frac{2(Z_{s1} + Z_{л1A})Z_{лAB}}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{л1A} + Z_{лB2} + Z_{лAB}}; \quad (12) \\
 Z_{sB} &= \frac{2(Z_{s2} + Z_{лB2})Z_{лAB}}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{л1A} + Z_{лB2} + Z_{лAB}}.
 \end{aligned}$$

Если при КЗ $\hat{E}^{(2)}$ рассматривается на участке между тяговыми подстанциями ОП1 и А, то в схеме на рис. 3,а следует подстанцию А совместить с ОП1 и оставить обозначение А, тем самым на рис. 3,б и в формулах (12) принимается $Z_{л1A} = 0$.

Кольцевая схема питания. Схема питания и её схема замещения при двухфазном КЗ приведена на рис. 4. Схема на рис. 4,б, может быть преобразована к виду рис. 3,в и далее в схему рис. 2,б. Для этого случая

$$\begin{aligned}
 Z_{sAB} &= 2 \left[Z_{s1} + \frac{Z_{л1A}Z_{лB1}}{Z_{л1A} + Z_{лB1} + Z_{лAB}} \right]; \\
 Z_{sA} &= \frac{2Z_{л1A}Z_{лAB}}{Z_{л1A} + Z_{лAB} + Z_{лB1}}; \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$Z_{sB} = \frac{2Z_{лB1}Z_{лAB}}{Z_{л1A} + Z_{лB1} + Z_{лAB}}.$$

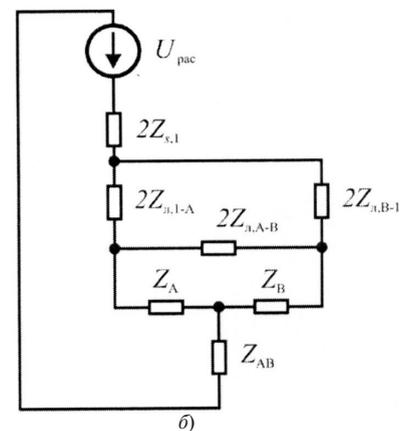
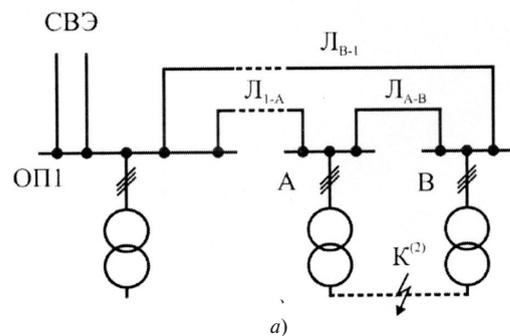


Рис. 4. Кольцевая схема питания: а – схема питания; б – схема замещения

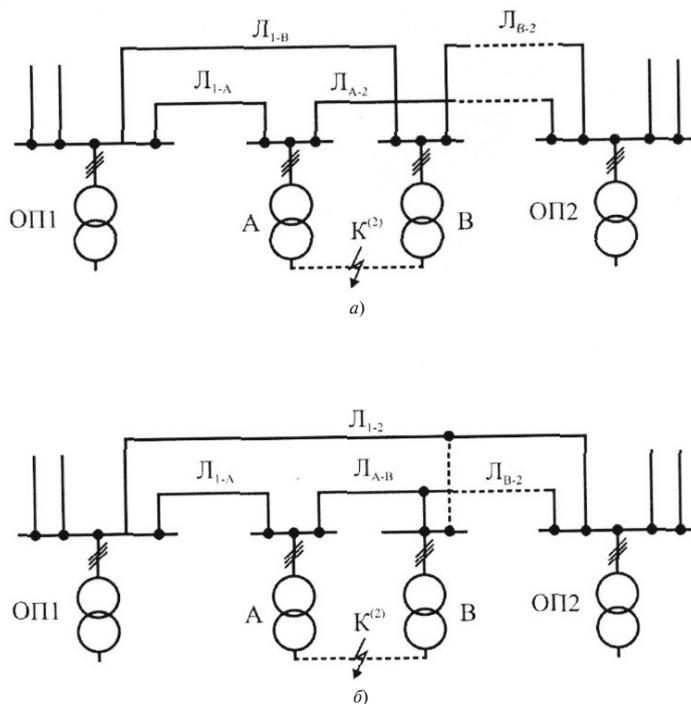


Рис. 5. Двухстороннее питание по двухцепной линии электропередачи: *a* – промежуточные тяговые подстанции – проходные; *б* – тяговая подстанция *A* – проходная, подстанция *B* – на отпайках (включена одна отпайка)

Двухстороннее питание от двухцепной линии электропередачи. Схемы питания показаны на рис. 5. Схемы замещения выполняются и преобразуются к виду на рис. 2,б аналогично предыдущим. Схема замещения для рис. 5,а, требует преобразования двух звёзд в два треугольника, соединённых параллельно, замену двух треугольников одним результирующим и преобразование последнего в звезду. Вместе с тем для этой схемы с весьма небольшой погрешностью можно принять условие, при котором каждая из тяговых подстанций питается от СВЭ раздельно. При этом сопротивления Z_{sA} и Z_{sB} вычисляются по параметрам КЗ на вводах в каждую из подстанций по (8), а $Z_{sAB} = 0$.

Схема замещения для рис. 5,б требует двух преобразований треугольника в звезду и вычислений по формулам:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= \frac{2Z_{s1}Z_{s2}}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{л1-2}}; \\
 Z_2 &= \frac{2Z_{s1}Z_{л1-2}}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{л1-2}}; \\
 Z_3 &= \frac{2Z_{s2}Z_{л1-2}}{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{л1-2}}; \\
 Z_4 &= \frac{2(Z_2 + Z_{л1-2})(Z_3 + Z_{лB2})}{Z_2 + Z_{л1A} + Z_3 + Z_{лB2} + Z_{лAB}}; \\
 Z_{sA} &= \frac{2(Z_2 + Z_{л1A})Z_{лAB}}{Z_2 + Z_{л1A} + Z_3 + Z_{лB2} + Z_{лAB}};
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$Z_{sB} = \frac{2(Z_3 + Z_{лB2})Z_{лAB}}{Z_2 + Z_{л1A} + Z_3 + Z_{лB2} + Z_{лAB}}.$$

Выводы. 1. Трёхфазная система замещения системы внешнего электроснабжения совместно с трансформатором тяговой подстанции вне зависимости от схемы соединения его первичной и вторичной обмоток может быть представлена в виде звезды и в виде треугольника. В схеме замещения в виде треугольника сопротивления в три раза больше, чем их значения для тех же самых элементов системы в схеме в виде звезды. Входные сопротивления при этом для обоих видов схем одинаковы. Для расчётов схема замещения в виде звезды предпочтительнее.

2. Для схем питания тяговых подстанций от СВЭ самостоятельными линиями, а также для опорных и промежуточных проходных тяговых подстанций при двухстороннем питании от двухцепных линий продольного электроснабжения сопротивление СВЭ допустимо определять по значениям тока или мощности трёхфазного КЗ на их вводах. В остальных случаях сопротивление СВЭ следует определять по таким же параметрам на вводах опорных тяговых подстанций с учётом эквивалентных сопротивлений линий продольного электроснабжения.

3. Приведены формула и методика определения сопротивлений СВЭ для наиболее характерных схем питания тяговых подстанций. Схема замещения тяговой подстанции в виде треугольника мо-

жет быть полезной в расчётах, не связанных с КЗ в тяговой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26522-85. Межгосударственный стандарт. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1987, 19 с.
2. ГОСТ Р 52719-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Стандартинформ, 2007, 36 с.
3. ГОСТ Р 57670-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. М.: Стандартинформ, 2017, 90 с.
4. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока. — Вестник ВНИИЖТ, 2017, т. 76, № 6, с. 329–334.
5. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог: Учебник для вузов, 2-е изд. М.: Трансжелдориздат, 1958, 288 с.
6. Фигурнов Е.П. Релейная защита: Учебник для вузов, ч. 2, 3-е изд. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009, 604 с.
7. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: Трансиздат, 2005, 216 с.
8. Герман Л.А., Серебряков А.С., Лоскутов А.Б., Осокин В.Л., Субханвердиев К.С. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети с двухсторонним питанием. — Электричество, 2019, № 5, с. 19–23.
9. Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчёта токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. — Электроснабжение и электрооборудование, 2017, № 1, с. 5–10.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Анализ применимости эквивалентов внешней сети для определения токов короткого замыкания в автотрансформаторных системах тягового электроснабжения 2×25 кВ. — Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2017, т. 56, № 4, с. 160–167.

[19.02.2020]

А в т о р ы: **Фигурнов Евгений Петрович** — доктор техн. наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), диссертацию защитил в 1969 г.

Жарков Юрий Иванович — доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой РГУПС, диссертацию защитил в 1992 г.

Попова Наталия Андреевна — кандидат техн. наук, доцент РГУПС, диссертацию защитила в 1998 г.

Electrichestvo, 2020, No. 8, pp. 29–36

DOI:10.24160/0013-5380-2020-8-29-36

Equivalent Circuits of the 27.5 kV Electric Railway External Power Supply System

FIGURNOV Yeugene P. (*Rostov State University of Railway RSUR, Rostov-na-Donu, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng).

ZHARKOV Yury I. (*RSUR, Rostov-na-Donu, Russia*) — Head of Dept., Professor, Dr. Sci. (Eng.)

POPOVA Nataliya A. (*Rostov-na-Donu, Russia*) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

In analyzing the short-circuit fault currents in electric railway traction networks, it is necessary to take into account the impedance of the external three-phase power supply system. This impedance is taken into account in the form of a so-called input impedance of traction substations. This input impedance is calculated using the equivalent circuit of the three-phase power supply system jointly with the traction substation power transformer; this equivalent circuit may be drawn in the star configuration (traditionally) or in the delta configuration (non-traditionally). The phase impedances of the same elements of the power supply system and transformer in the delta-shaped equivalent circuit are a factor of three larger than their values in the star-shaped equivalent circuit, and it should be noted that this ratio, and also the choice of the equivalent circuit kind (star or delta) do not depend on the power transformer winding connection diagram. The traction substation input impedance values for the star and delta equivalent circuits are identically equal to each other; however, the star-shaped equivalent circuit is a preferred one. The commonly adopted method, according to which the external power supply system is taken into account separately and independently for each of traction substations, is simplified in nature. When being used for certain traction substation power supply arrangements, e.g., in the case of a ring-shaped power supply from the high-voltage longitudinal power supply line, this method yields noticeable errors in calculating the distribution of short-circuit fault currents in the traction network between adjacent traction substations. It is proposed to determine the power system's remote part impedance in the traction substation input impedance from the parameters of a short-circuit fault on the buses of master traction substations. In so doing, the equivalent impedances of the longitudinal power supply lines connecting the master substations with the intermediate ones are additionally taken into account. Relevant formulas for different power supply arrangements are given.

Key words: *traction substations, external power supply, traction networks, short circuit faults, traction substation input impedance*

REFERENCES

1. **GOST 26522-85.** *Mezhdgosudarstvennyy standart. Korotkiye zamykaniya v elektroustanovkakh. Terminy i opredeleniya* (GOST 26522-85. Interstate standard. Short circuits in electrical installations. Terms and Definitions). M.: Izd. standartov, 1987, 19 p.
2. **GOST R 52719-2007.** *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Korotkiye zamykaniya v elektroustanovkakh. Metody rascheta v elektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniyem svyshe 1 kV* (GOST R 52719-2007. National standard of the Russian Federation. Short circuits in electrical installations. Calculation methods in electrical installations of alternating current with voltage over 1 kV). M.: Standartinform, 2007, 36 p.
3. **GOST R 57670-2017.** *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi. Metodika vybora osnovnykh parametrov* (GOST R 52719-2007. National standard of the Russian Federation. Short circuits in electrical installations. Calculation methods in electrical installations of alternating current with voltage over 1 kV). M.: Standartinform, 2017, 90 p.
4. **Kosarev A.B., Kosarev B.I.** *Vestnik VNIIZhT – in Russ. (Bulletin of All-Russian Scientific and Research Institute of Railway Transport)*, 2017, vol. 76, No. 6, pp. 329–334.
5. **Markvardt K.G.** *Elektrosnabzheniye elektricheskikh zheleznykh dorog: Uchebnik dlya vuzov, 2-ye izd.* (Power supply of electric railways: Textbook for universities, 2nd ed.). M.: Transzheldorizdat, 1958, 288 p.
6. **Figurnov Ye.P.** *Releynaya zashchita: Uchebnik dlya vuzov, ch. 2, 3-ye izd.* (Power supply of electric railways: Textbook for universities, part 2, 3 ed.). M.: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2009, 604 p.
7. **Rukovodyashchiye ukazaniya po releynoy zashchite sistem tyagovogo elektrosnabzheniya** (Guidelines for relay protection of traction power supply systems). M.: Transizdat, 2005, 216 p.
8. **German L.A., Serebryakov A.S., Loskutov A.B., Osokin V.L., Subkhanverdiyev K.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 5, pp. 19–23.
9. **German L.A., Subkhanverdiyev K.S.** *Elektrosnabzheniye i elektrooborudovaniye – in Russ. (Power Supply and Electrical Equipment)*, 2017, No. 1, pp. 5–10.
10. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Alekseyenko Ye.A.** *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye – in Russ. (Modern Technologies. Systematic Analysis. Designing)*, 2017, vol. 56, No. 4, pp. 160–167.

[19.02.2020]