

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНЕЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В.П. Закарюкин¹, А.В. Крюков^{1,2}, Е.А. Алексеенко³

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению Трансэнерго,
г. Иркутск, Россия

Резюме: В применяемых на практике методах определения аварийных режимов систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока используется эквивалентирование внешней сети реактантами короткого замыкания (КЗ) на вводах тяговых подстанций. Такое эквивалентирование может приводить к появлению погрешностей определения тока КЗ. Причина возникновения погрешностей связана с тем, что предложенные расчетные формулы базируются на методе симметричных составляющих при наличии однократной несимметрии в трехфазной цепи. Короткое замыкание в тяговой сети при двустороннем питании межподстанционной зоны создает двойную несимметрию, поскольку сказывается сразу на двух смежных тяговых подстанциях, и при сильной связи между ними по внешней сети возникает взаимовлияние несимметрий друг на друга.

Для определения границ применимости упрощенного эквивалентирования авторами предприняты сопоставительные расчеты аварийных режимов с помощью моделей, построенных в фазных координатах, и с применением эквивалентных реактансов внешнего электроснабжения.

Определение токов КЗ в системе тягового электроснабжения 27,5 кВ сравнительно простой конфигурации проведено в трех вариантах: по формулам «Руководящих указаний по релейной защите систем тягового электроснабжения», по полнофункциональной расчетной схеме комплекса Fazonord, учитывающей емкостные и индуктивные взаимовлияния проводов, а также по уточненной аналитической формуле. Полученные результаты показывают сравнительно небольшие погрешности при мощности КЗ, превышающей 1000 МВ·А. При небольших значениях мощности КЗ погрешность может достигать нескольких десятков процентов и становится недопустимой.

Ключевые слова: железная дорога, система тягового электроснабжения, короткое замыкание, моделирование, расчет токов.

ANALYSIS OF APPLICABILITY OF EXTERNAL NETWORK SIMPLIFIED MODELS FOR DEFINITION OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN SYSTEMS OF RAILROAD TRACTION POWER SUPPLY

V.P. Zakaryukin¹, A.V. Kryukov^{1,2}, E.A. Alekseenko³

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³Irkutsk distance of Power Supply, structural division of Trans Power, Russian Railway,
Russia

Abstract: In practical methods of emergency operation in systems of tractive electric power supply systems the equivalent models of external network constructed on the basis of tractive substations short circuit (SC) reactances are used. Such modeling can give errors of definitions of SC mode parameters. The origin of errors consists of the fact that the offered estimated formulas are based on method of symmetric components with one asymmetry in three-phase circuit. Tractive network short circuit in case of double-sided supply of inter substation zone creates double asymmetry as it affects directly on two adjacent tractive substations, and in case of external network close coupling there is an interference of asymmetries at each other.

For delimitation of simplified equivalent models applicability authors made comparative calculations of emergency operation by means of models constructed in phase coordinates and using external electric power supply equivalent reactances.

Determination of SC currents in system of 27,5 kV tractive electric power supply of rather simple configuration is carried out in three options: on formulas of "Guide-line on relay protection of tractive electric supply ", on full-function estimated scheme of Fazonord complex considering wires capacity and inductive interferences and on specified analytical formula. The received results show rather small errors at SC power exceeding 1000 MV·A. At small values of SC power error can reach several tens percent and becomes inadmissible.

Keywords: railroad, tractive electric power supply system, short-circuit, modeling, current calculation.

Введение

Настройка систем релейной защиты требует расчетного определения токов и сопротивлений короткого замыкания (КЗ). Для решения задач определения аварийных режимов в системах тягового электроснабжения (СТЭ) [1–3] предложен ряд эффективных методов и алгоритмов [4–10]. В работах [4–6] используется лучевая схема замещения тягового трансформатора и эквивалент внешней сети, в книге [7] и в «Руководящих указаниях...»¹ внешняя сеть представлена реактансом, в работах [8–10] рассматриваются параметры многопроводной тяговой сети для определения сопротивлений петли короткого замыкания. Значительная часть работ по определению токов КЗ в СТЭ основана на применении метода симметричных составляющих или его модификаций, использующих другие диагонализующие преобразования матриц сопротивлений и проводимостей. В применяемых на практике методах выполняется эквивалентирование внешней сети реактансами короткого замыкания на вводах тяговых подстанций. Такое эквивалентирование может приводить к появлению погрешностей расчета параметров режима КЗ. Для определения границ применимости подобного эквивалентирования авторами предприняты сопоставительные расчеты аварийных режимов с помощью моделей, построенных в фазных координатах, и с применением эквивалентных реактансов внешнего электроснабжения.

Постановка задачи

Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения предписывают при расчетах токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети электрифицированной железной дороги переменного тока 27,5 кВ пользоваться эквивалентным реактансом внешнего электроснабжения, заданным в форме мощности короткого замыкания на вводах в подстанцию. Формула для определения тока КЗ, используемая в «Руководящих указаниях...», при приведении параметров к стороне тягового напряжения без учета допусков по напряжению КЗ трансформатора может быть представлена так:

¹ Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: Трансиздат, 2005. 216 с.

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_{nom}}{2(\underline{Z}_L + \underline{Z}_T) + \underline{Z}_0 l_k}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_L = \frac{jU_{nom}^2}{S_k}$ – эквивалентный реактанс системы внешнего электроснабжения; $U_{nom} =$

27500 В; S_k – мощность трехфазного КЗ на вводах подстанции; $\underline{Z}_T = \frac{j u_k U_{nom}^2}{100 S_n}$ –

эквивалентный реактанс трансформатора; u_k – напряжение КЗ трансформатора в процентах, S_n – номинальная мощность трансформатора; $\underline{Z}_0 = (R_0 + jX_0)$ – сопротивление 1 км тяговой сети; l_k – расстояние от тяговой подстанции (ТП) до места КЗ.

Этот подход в некоторых случаях может приводить к погрешностям определения токов фидеров контактной сети, поскольку формула (1) базируется на методе симметричных составляющих при наличии однократной несимметрии в трехфазной цепи. Короткое замыкание в тяговой сети при двустороннем питании межподстанционной зоны создает двойную несимметрию, поскольку сказывается сразу на двух смежных ТП, и при сильной связи между подстанциями по внешней сети возникает взаимовлияние несимметрий друг на друга. Погрешности расчетов токов в значительной степени зависят от мощности КЗ на вводах в подстанцию. При больших величинах S_k эквивалентный реактанс внешней сети мал и ток короткого замыкания определяется в основном сопротивлениями трансформатора и тяговой сети. Поэтому становится актуальной задача определения мощности КЗ, при которой формула (1) обеспечивает приемлемую погрешность расчета, к примеру, порядка 10%.

Кроме значения S_k погрешности расчетов тока по формуле (1) зависят от жесткости связи смежных тяговых подстанций по внешнему электроснабжению и, следовательно, от схемы их питания [1]. Напряжение питания тяговых подстанций также играет немаловажную роль. Сети напряжением 220 кВ, как правило, характеризуются более высокими мощностями коротких замыканий по сравнению с сетями 110 кВ, и погрешности расчетов токов КЗ для сети 220 кВ должны быть меньше.

Оценить погрешности расчетных формул для тока короткого замыкания в тяговой сети можно путем определения режимов КЗ с помощью программного комплекса *Fazonord* [11–13]. Этот комплекс позволяет проводить расчеты режимов с учетом емкостных и взаимоиндуктивных связей проводов в многопроводных системах, а также корректно моделировать схемы соединений обмоток и конфигурацию магнитной системы силовых трансформаторов. С его помощью можно рассчитать токи трехфазных коротких замыканий на вводах подстанций и эквивалентировать внешнее электроснабжение реактансами КЗ, тем самым реализовав подход, заложенный в формулах (1).

Методика моделирования

Формула (1) предполагает симметричную систему питающих напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, приложенную за эквивалентным симметричным реактансом (рис. 1). При коротком замыкании в тяговой сети вблизи подстанции ТП1 возникает следующая ситуация:

- по фидеру контактной сети (КС) подстанции ТП1 протекает большой ток, порядка 4...6 кА; ток фидера КС ТП2 в 4 ... 5 раз меньше;
- основной вклад в несимметрию питающих напряжений подстанций ТП1 и ТП2 вносит большой ток фидера КС подстанции ТП1;
- подстанция ТП2 получает питание от существенно несимметричной системы напряжений узлов 4, 5, 6, поэтому формула (1) для расчета тока КЗ фидера контактной сети (ФКС) ТП2 не применима;
- ввиду сравнительно небольшого токопотребления трансформатором ТП2 можно полагать его малый вклад в несимметрию напряжений.

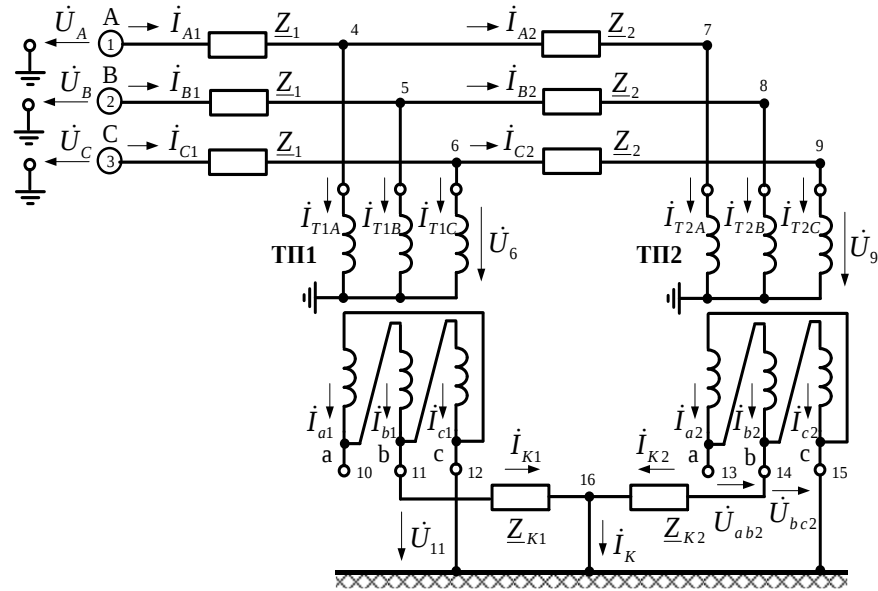


Рис. 1. Схема замещения системы электроснабжения тупиковой подстанции

Использование симметричных составляющих для трансформатора ТП2 затруднено, поскольку для него имеют место две несимметрии: двухфазное короткое замыкание на вторичной обмотке и несимметричное питающее напряжение. Выходом может быть применение фазных координат с упрощающими положениями, заключающимися в использовании модели трансформатора со взаимноиндуктивными связями фаз обмоток по рис. 2 и малым влиянием трансформатора ТП2 на несимметрию напряжений питающей сети.

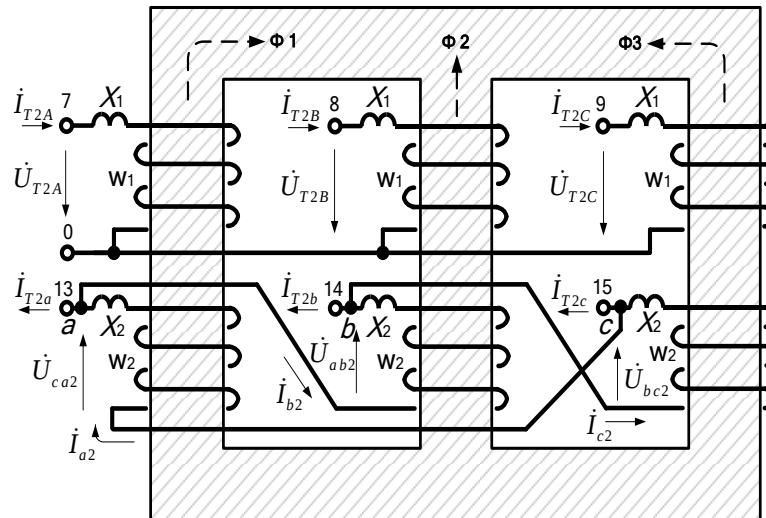


Рис. 2. Схема токов и магнитных потоков трансформатора Y/D

В предположении симметрии сердечника взаимные индуктивности M между фазами первичной обмотки равны друг другу, $M_{AB} = M_{BC} = M_{CA} = M$, равны и собственные индуктивности фаз $L_A = L_B = L_C = L_1$, причем $L_1 = 2M$, поскольку магнитный поток,

созданный катушкой фазы, замыкается через два одинаковых соседних стержня магнитопровода (рис. 2). Величину M можно определить через параметры холостого хода трансформатора, который предполагает симметричный режим и номинальные напряжения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1n} &= U_{1n} = 2jX_M \dot{I}_A - jX_M \dot{I}_B - jX_M \dot{I}_C; \\ U_{1n} \underline{a}^2 &= -jX_M \dot{I}_A + 2jX_M \dot{I}_B - jX_M \dot{I}_C; \\ U_{1n} \underline{a} &= -jX_M \dot{I}_A - jX_M \dot{I}_B + 2jX_M \dot{I}_C,\end{aligned}$$

где U_{1n} – номинальное фазное напряжение первичной обмотки; $\underline{a} = e^{j120^\circ}$ – фазный множитель; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – токи фаз первичной обмотки; $X_M = \omega M$; $X_\mu = 2X_M$ – индуктивное сопротивление намагничивания. Реактансами короткого замыкания трансформатора в этом случае можно пренебречь.

Поскольку $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, то $\dot{I}_A = \frac{U_{1n}}{3jX_M}$. Ток холостого хода равен $I_A = \frac{S_n}{3U_{1n}} \frac{i_x}{100}$, где i_x – ток холостого хода в процентах; U_{1n} – номинальное фазное напряжение первичной обмотки; $X_M = \frac{100U_{1n}^2}{i_x S_n}$. Для трансформатора ТДТНЖ-40000/115/27.5 $X_M = 12200$ Ом.

Потокосцепления катушек пропорциональны числам их витков, поэтому взаимоиндуктивные сопротивления первичной и вторичной катушек разных фаз равны $X_{12} = X_M / k_T$; $k_T = U_{1n} / U_{2n}$ – фазный коэффициент трансформации. Для катушек одной фазы взаимоиндуктивные сопротивления равны $X_{11} = 2X_M / k_T = 2X_{12}$. Взаимные индуктивности между фазами вторичной обмотки определяются соотношением $X_m = X_M / k_T^2$. Индуктивное сопротивление намагничивания фазы вторичной обмотки равно $X_{\mu 2} = \frac{2X_M}{k_T^2} = 2X_m$.

Система уравнений, описывающая состояние трансформатора ТП2, может быть записана так:

$$\begin{aligned}-j\dot{U}_{T2A} &= (X_\mu + X_1)\dot{I}_{T2A} - X_M \dot{I}_{T2B} - X_M \dot{I}_{T2C} - X_{11}\dot{I}_{a2} + X_{12}\dot{I}_{b2} + X_{12}\dot{I}_{c2}; \\ -j\dot{U}_{T2B} &= -X_M \dot{I}_{T2A} + (X_\mu + X_1)\dot{I}_{T2B} - X_M \dot{I}_{T2C} + X_{12}\dot{I}_{a2} - X_{11}\dot{I}_{b2} + X_{12}\dot{I}_{c2}; \\ -j\dot{U}_{T2C} &= -X_M \dot{I}_{T2A} - X_M \dot{I}_{T2B} + (X_\mu + X_1)\dot{I}_{T2C} + X_{12}\dot{I}_{a2} + X_{12}\dot{I}_{b2} - X_{11}\dot{I}_{c2}; \\ -j\dot{U}_{ca2} &= (X_{\mu 2} + X_2)\dot{I}_{a2} - X_m \dot{I}_{b2} - X_m \dot{I}_{c2} - X_{11}\dot{I}_{T2A} + X_{12}\dot{I}_{T2B} + X_{12}\dot{I}_{T2C}; \\ -j\dot{U}_{ab2} &= -X_m \dot{I}_{a2} + (X_{\mu 2} + X_2)\dot{I}_{b2} - X_m \dot{I}_{c2} + X_{12}\dot{I}_{T2A} - X_{11}\dot{I}_{T2B} + X_{12}\dot{I}_{T2C}; \\ -j\dot{U}_{bc2} &= -X_m \dot{I}_{a2} - X_m \dot{I}_{b2} + (X_{\mu 2} + X_2)\dot{I}_{c2} + X_{12}\dot{I}_{T2A} + X_{12}\dot{I}_{T2B} - X_{11}\dot{I}_{T2C}.\end{aligned}$$

Решение системы уравнений при условиях, отвечающих рис. 1:

$$\begin{aligned}I_{b2} &= \dot{I}_{a2}; \dot{I}_{K2} = \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2}; \dot{I}_{c2} = \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{K2}; \\ \dot{U}_{bc2} &= \underline{Z}_{K2} \dot{I}_{K2}; \dot{U}_{ab2} + \dot{U}_{bc2} + \dot{U}_{ca2} = 0; \dot{U}_{ca2} = -\dot{U}_{ab2} - \underline{Z}_{K2} \dot{I}_{K2}; \\ \dot{U}_{T2A} &= \dot{U}_{T1A} - \underline{Z}_2 \dot{I}_{T2A}; \dot{U}_{T2B} = \dot{U}_{T1B} - \underline{Z}_2 \dot{I}_{T2B}; \dot{U}_{T2C} = \dot{U}_{T1C} - \underline{Z}_2 \dot{I}_{T2C},\end{aligned}$$

приводит к следующему выражению для тока КЗ:

$$\dot{I}_{K2} = \frac{3j\dot{U}_{T1C}X_{12}}{\left(2X_m + \frac{2X_2}{3} - j\underline{Z}_{K2}\right)(3X_M + X_1 - j\underline{Z}_2) - 6X_{12}^2}. \quad (2)$$

Приведенные выражения позволяют получить приближенные оценки погрешностей вычисления тока КЗ фидера КС подстанции ТП2 при коротком замыкании в тяговой сети вблизи подстанции ТП1 по следующему алгоритму.

1. Определяются сопротивления $\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ при номинальном первичном фазном напряжении U_{1n} :

$$\underline{Z}_1 = \frac{3jU_{1n}^2}{S_{k1}}; \underline{Z}_2 = \frac{3jU_{1n}^2}{S_{k2}} - \underline{Z}_1.$$

2. Вычисляются параметры трансформатора:

$$X_M = \frac{100U_{1n}^2}{i_x S_n}; k_T = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}; X_{12} = \frac{X_M}{k_T}; X_m = \frac{X_M}{k_T^2}; X_1 = \frac{u_k U_{1n}^2}{200 S_n}; X_2 = \frac{u_k U_{2n}^2}{200 S_n}.$$

3. По формуле (1) определяется ток КЗ в тяговой сети $\dot{I}_{K1}$ вблизи трансформатора ТП1 при напряжении $\dot{U}_{nom} = 27500e^{-j60^\circ}$ В.

4. В соответствии с методикой [1] рассчитываются токи фаз тяговой обмотки ТП1:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{K1} / 3; \dot{I}_{b1} = \dot{I}_{a1}; \dot{I}_{c1} = -2\dot{I}_{K1} / 3.$$

5. При отсутствии токов нулевой последовательности первичные токи трансформатора ТП1 равны:

$$\dot{I}_{T1A} = \dot{I}_{a1} / k_T; \dot{I}_{T1B} = \dot{I}_{b1} / k_T; \dot{I}_{T1C} = \dot{I}_{c1} / k_T.$$

6. Без учета токов трансформатора ТП2 приближенно вычисляются фазные напряжения первичной стороны:

$$\dot{U}_{T1A} = \dot{U}_A - \underline{Z}_1 \dot{I}_{T1A}; \dot{U}_{T1B} = \dot{U}_B - \underline{Z}_1 \dot{I}_{T1B}; \dot{U}_{T1C} = \dot{U}_C - \underline{Z}_1 \dot{I}_{T1C};$$

$$\dot{U}_A = U_n; \dot{U}_B = U_n \underline{a}^2; \dot{U}_C = U_n \underline{a}; \underline{a} = e^{j120^\circ}.$$

1. По формуле «Руководящих указаний...» вычисляется ток КЗ и погрешность:

$$I_{K2}' = \frac{U_{nom}}{\sqrt{\left[2U_{nom}^2 \left(\frac{1}{S_{k2}} + \frac{u_{k2}}{100 S_n} \right) + X_0 I_{k2} \right]^2 + (R_0 I_{k2})^2}}; \quad (3)$$

$$\delta_I = \frac{I_{K2}' - I_{K2}}{I_{K2}} \cdot 100\%.$$

Результаты моделирования

Расчеты и моделирование проведены для схемы СТЭ (рис. 1) с использованием следующих параметров: оба трансформатора ТДТНЖ-40000/115/27,5, $u_k = 11\%$, $i_x = 0,9\%$; мощности короткого замыкания на вводах подстанций $S_{k1} = 578$ МВ·А, $S_{k2} = 289$ МВ·А, с варьированием величин; $U_n = 66,4$ кВ; сопротивления тяговой сети однопутного участка $\underline{Z}_{K1} = 0$; $\underline{Z}_{K2} = 10 + j23$ Ом/км. Для сопоставления сформирована схема расчетной модели программного комплекса *Fazonord* (рис. 3) с тяговой сетью однопутного участка с проводами ПБСМ-95+МФ-100 и рельсами Р65.

Результаты расчетов и моделирования сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 4 и 5.

Приведенные зависимости показывают, что расчеты по формуле (2) и с помощью комплекса *Fazonord* близки друг к другу, в то время как формула «Руководящих указаний...» приводит к большим погрешностям при мощности КЗ подстанции ТП1 менее 1000 МВ·А.

Таблица 1

Токи короткого замыкания ФКС ТП-2 при КЗ в тяговой сети вблизи ТП-1

S_{k1} , МВ·А	S_{k2} , МВ·А	Ток КЗ, А, Fazonord	Ток КЗ, А, по формуле (2)	Ток КЗ, А, по формуле (3)	Различие между столбцами 3 и 4, %
1	2	3	4	5	6
385	193	450	471	756	68,0
578	289	563	586	811	44,0
867	433	670	692	853	27,3
1156	578	737	758	876	18,9

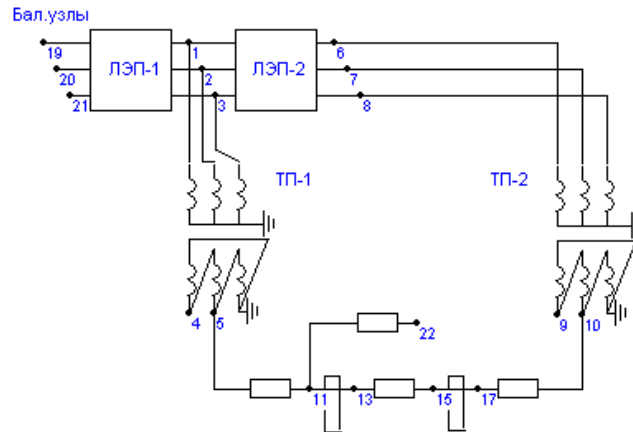
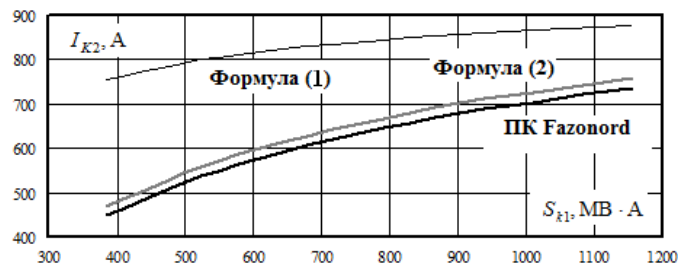
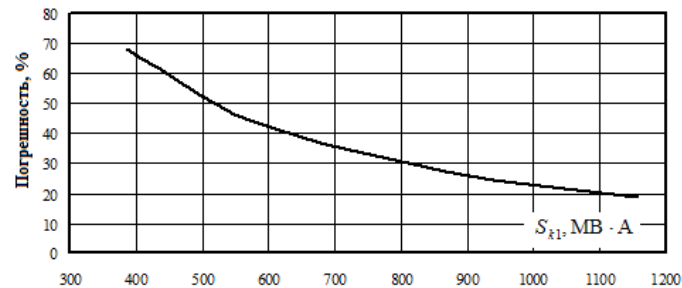


Рис. 3. Схема расчетной модели

Рис. 4. Зависимость результатов расчета тока КЗ от S_{k1} Рис. 5. Зависимость погрешности определения тока КЗ от S_{k1}

Заключение

1. Определение токов КЗ в системе тягового электроснабжения 27,5 кВ сравнительно простой конфигурации по упрощенной формуле «Руководящих указаний по релейной защите

систем тягового электроснабжения» и по полнофункциональной расчетной схеме комплекса *Fazonord*, учитывающей емкостные и индуктивные взаимовлияния проводов, а также по уточненной аналитической формуле показывают сравнительно небольшие различия при мощности КЗ, превышающей 1000 МВ·А.

2. При значениях мощности короткого замыкания головной подстанции менее 500 МВ·А величины тока, полученные по упрощенной формуле, могут превышать истинное значение почти двукратно.

Литература

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industieverlag, 2008. 334 p.
3. Energieversorgung elektrischer bannen / Н. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
4. Герман Л.А., Шаров А.В. Расчет токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока железных дорог // Электричество. 2003. № 3. С. 27–34.
5. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: Московский государственный университет путей сообщения, 2014. 173 с.
6. Герман Л.А., Кишкурно К.В., Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 5–10.
7. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М.: Маршрут, 2006. 272 с.
8. Быкадоров А.Л., Муратова-Милехина А.С. Метод определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий // Транспорт-2013. Ростов-на-Дону, 2013. С. 138–139.
9. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчета параметров петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, И.В. Гаврилов и др. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. № 4. С. 7–12.
10. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Муратова-Милехина А.С. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление петли короткого замыкания // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 5(41). С. 5–11.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Мультифункциональный подход к моделированию электроэнергетических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4(40). С. 100–107.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. P. 44–48.

Авторы публикации

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения. E-mail: zakar49@mail.ru.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заслуженный энергетик РБ, академик Российской академии транспорта, чл.-кор. Российской инженерной академии, член-кор. Академии наук высшей школы РФ. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Алексеенко Евгения Алексеевна – магистр техники и технологии, энергодиспетчер Иркутской дистанции электроснабжения Восточно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго ОАО РЖД. E-mail: alev_ia@mail.ru.

References

1. Markvardt K.G. Electric energy supplying of railroad. Moscow: Transport, 1982. 528 p.
2. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
3. Energieversorgung elektrischer bannen / H. Biesenack, E. Braun, G. George, etc. / Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
4. German L.A., Sharov A.V. Calculation of current distribution at short circuits in traction networks // Electricity. 1979. No. 3. P. 30–34.
5. German L.A., German V.L. Automatization of alternating current traction energy supply. M.: Moscow State Transport University, 2014. 173 p.
6. German L.A., Kishkurno K.V., Subkhanverdiyev K.S. Assessment of calculation error of short-circuit currents in tractive alternating current net // Electronics and transport electric equipment. 2017. No. 1. P. 5–10.
7. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E. Relay protection of tractive electric power supply networks of alternating current. M.: Route, 2006. 272 p.
8. Bykadorov A.L., Muratova-Milekhina A.S. Determination method of short circuit place in tractive alternating current nets on information technologies basis // Transport-2013. Rostov-on-Don, 2013. P. 138–139.
9. Detailing of tractive alternating current net structure in tasks of simulation and calculation of short circuit loop parameters / A.L. Bykadorov, T.A. Zarutskaya, I.V. Gavrilov, etc // Electronics and electric equipment of transport. 2015. No. 4. P. 7–12.
10. Bykadorov A.L., Zarutskaya T.A., Muratova-Milekhina A.S. The analysis of mutual influence of tractive alternating current net parameters on total short circuit loop resistance // The Messenger of Volga region transport. 2013. No. 5(41). P. 5–11.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional approach to electrical power systems simulation // Modern technologies. Systems analysis. Simulation. 2013. No. 4(40). P. 100–107.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. P. 44–48.

Authors of publication

Zakaryukin Vasily Panteleymonovich – Dr. Sci. (Engineering), professor of transport power industry department of Irkutsk state transport university, E-mail: zakar49@mail.ru.

Kryukov Andrey Vasilyevich – Dr. Sci. (Engineering), professor of transport power industry department of Irkutsk state transport university, professor of department of power supply and electrical equipment of the Irkutsk national research technical university, the honored power engineering specialist of Republics of Buryatia, academician of Russian transport academy, member correspondent of Russian engineering academy, member correspondent of Russian academy of Sciences of higher school. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Alekseenko Evgenia Alekseevna – master of equipment and technology, power supply dispatcher of Irkutsk distance of power supply of East Siberian directorate – structural division of Transpower JSC Russian Railway. E-mail: alev_ia@mail.ru.