



В. П. Закарюкин<sup>1</sup>, А. В. Крюков<sup>1</sup>, Е. А. Алексеенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение «Трансэнерго» ОАО «РЖД»

Дата поступления: 25 сентября 2017 г.

## АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ЭКВИВАЛЕНТОВ ВНЕШНЕЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫХ СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 2×25 кВ

**Аннотация.** Для определения аварийных режимов в системах тягового электроснабжения (СТЭ), вызванных короткими замыканиями (КЗ), предложен ряд эффективных алгоритмов, большинство из которых основано на применении метода симметричных составляющих или его модификаций, использующих другие диагонализующие преобразования матриц сопротивлений и проводимостей. В широко применяемых на практике методах применяется эквивалентирование внешней сети на основе реактансов, определяемых мощностями КЗ. Такое эквивалентирование может приводить к появлению погрешности определения токов коротких замыканий. В статье представлены результаты исследований, направленных на анализ этих погрешностей при расчетах токов КЗ в системах тягового электроснабжения 2×25 кВ. Цель исследований состояла в анализе погрешностей расчета токов КЗ, возникающих при упрощенном эквивалентировании внешней сети реактансами короткого замыкания. Для достижения сформулированной цели выполнены сопоставительные расчеты токов КЗ типовых схем СТЭ 2×25 кВ при использовании полных моделей в фазных координатах и упрощенных, сформированных по реактансам электроэнергетической системы (ЭЭС).

Расчеты токов КЗ в тяговой сети 2×25 кВ по реактансам ЭЭС и полнофункциональной расчетной схеме комплекса Fazonord показывают сравнительно небольшие различия: отклонения по токам не превышает 10 %, по напряжениям 5 % и 15 % по сопротивлениям.

Полученные результаты могут использоваться при совершенствовании существующих и создании новых методик определения токов КЗ в тяговых сетях 2×25 кВ.

**Ключевые слова:** железная дорога, система электроснабжения, короткое замыкание, эквиваленты внешнего электроснабжения.

V. P. Zakaryukin<sup>1</sup>, A. V. Kryukov<sup>1</sup>, E. A. Alekseenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> East Siberian Directorate for Energy Supply, the structural unit of Transenergo of JSC Russian Railways

Received: September 25, 2017

## ANALYSIS OF APPLICABILITY OF EXTERNAL NETWORK EQUIVALENTS FOR DEFINITION OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN 2×25 KV AUTOTRANSFORMER TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

**Abstract.** For determination of emergency mode in traction power supply systems (TPSS) caused by short circuits (SC,) a number of effective algorithms are offered, the majority of which is based on symmetric components method or its modifications with other transformations of resistance and conductance matrix. In some methods which are widely put into practice, the external network modeling is used on the basis of the reactances determined by the SC power. In some cases, such an approach can lead to errors of the SC current determination. In the article, the research results are provided that are directed to these errors' analysis in relation to 2×25 kV traction power supply systems. The purpose of researches consisted in errors of the SC currents evolving from simplified equivalence of external network by the SC reactances. To achieve this purpose, comparative calculations of SC currents are executed for standard schemes of the 2×25 kV tractive system when using complete models in phase coordinates and when using SC reactances of the electric power system.

Calculations of SC currents in 2×25 kV traction network by SC reactances and by the full-function equivalent scheme of Fazonord complex show rather small distinctions: the deviation on currents isn't exceeded by 10%, on voltage 5% and on resistance 15%.

The results obtained can be used in case of enhancement of the existing and creation of new techniques of the SC currents determination in 2×25 kV traction networks.

**Keywords:** a railway, a power supply system, a short circuit, an external power supply equivalent.

### Введение

Настройка систем релейной защиты требует расчетного определения токов и сопротивлений короткого замыкания (КЗ). Для решения задач определения аварийных режимов в СТЭ предло-

жен ряд эффективных методов и алгоритмов [1-6], большинство из которых основано 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 определения 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 [7, раздел 7.2] предписывают при расчетах токов короткого замыкания в тяговой сети электрифицированной железной дороги переменного тока 2×25 кВ пользоваться эквивалентным реактансом внешнего электроснабжения, заданным в форме мощности короткого замыкания на вводах в подстанцию. Без учета допусков по напряжению короткого замыкания трансформатора эквивалентные реактансы внешней сети и тягового трансформатора, приведенные к номинальному напряжению тяговой обмотки, определяются следующими формулами [7]:

$$Z_k = X_k = \frac{2U_{nom}^2}{S_k}, Z_T = X_T = \frac{2u_k U_{nom}^2}{100 S_{nom}}, \quad (1)$$

где  $S_k$  – мощность трехфазного КЗ на вводах подстанции;  $u_k$  – напряжение КЗ трансформатора в процентах;  $S_{nom}$  – номинальная мощность трансформатора;  $U_{nom} = 27500$  В.

Этот подход в некоторых случаях может приводить к погрешностям определения токов КЗ на фидерах КЗ, поскольку формулы (1) 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 ТП, и при сильной связи между подстанциями по внешней сети возникает взаимовлияние несимметрий друг на друга.

Погрешности расчетов токов по сопротивлениям (1) в значительной степени зависят от мощности КЗ на вводах в подстанцию. При больших величинах  $S_k$  эквивалентный реактанс ЭЭС мал и ток короткого замыкания определяется в основном сопротивлениями трансформатора и тяговой сети. Поэтому становится актуальной задача определения мощности КЗ, при которой формулы

(1) обеспечивают 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 [8]. 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 [9, 10]. 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 [11–15]. 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), без использования довольно громоздких выражений раздела 7.4.3 «Руководящих указаний...» [7].

#### Короткие замыкания на посту секционирования

Питание тяговых подстанций СТЭ 2×25 кВ [1] с однофазными трансформаторами производится от линейного напряжения, поэтому влияние линий электропередачи, соединяющих тяговые подстанции, здесь существенно меньше, чем для тяговых сетей 1×25 кВ. Для сопоставления методики [7] с расчетами токов комплексом Fazonord принята схема примера № 1 раздела 7.4 [7] (рис. 1). В этом примере длина межподстанционной зоны взята равной 80 км. Обычно протяженности зон СТЭ 2×25 кВ значительно меньше; так, по трассе западного участка БАМ длиной 736 км только две межподстанционные зоны имеют протяженность, близкую к 80 км. Тем не менее рассмотрение такого примера может дать оценку величины погрешности расчетов токов КЗ по реактансам внешнего электроснабжения, если к тому же иметь в виду, что внешнее электроснабжение группы подстанций обычно производится от двух воздушных линий.

В описываемом примере расчета предполагаются одинаковые мощности короткого замыкания на вводах двух смежных подстанций по



400 МВ·А. Однопутный участок имеет контактную подвеску ПБСМ95+МФ100, питающий провод А185, понижающие трансформаторы на подстанциях ОРДНЖ-16000/115/27.5, автотрансформаторы АОМНЖ-10000/55, расстояния по рис. 1:  $l_1 = l_2 = l_4 = l_5 = 15$  км,  $l_3 = 20$  км. Короткое замыкание питающего провода на рельсы происходит на шинах поста секционирования, расположенного

посередине между автотрансформаторами АТ2 и АТ3. Напряжение короткого замыкания тяговых трансформаторов 10,5 % предполагается увеличенным до 11,03 % для соответствия примеру [7], напряжение короткого замыкания автотрансформаторов равно 1,5 %. Сопротивление дуги  $R_{д} = 1$ . Схемы расчетных моделей показаны на рис. 2.

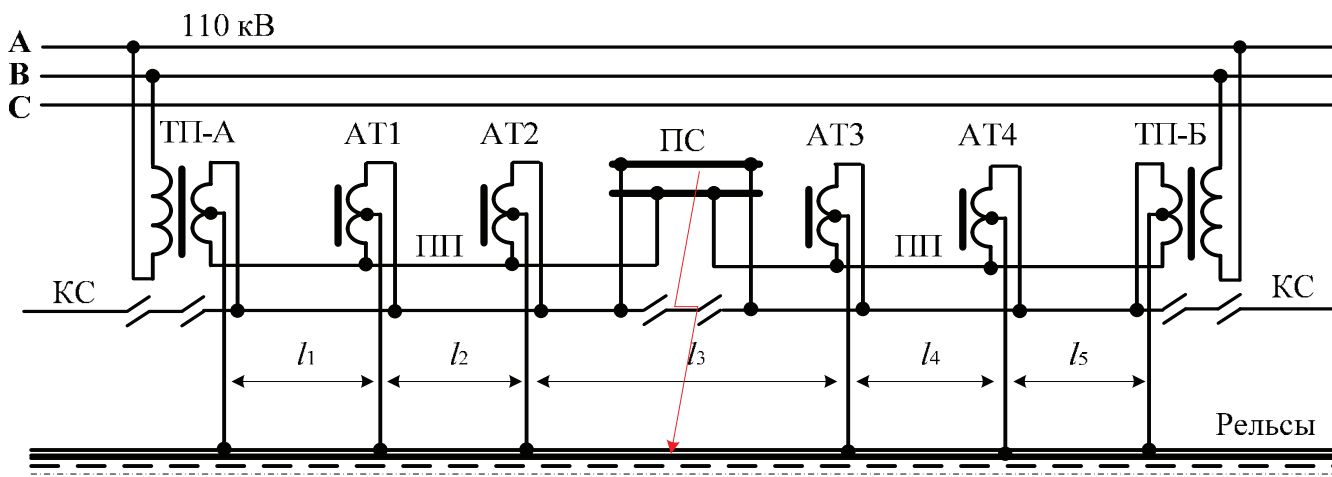


Рис. 1. Схема питания участка 2×25 кВ

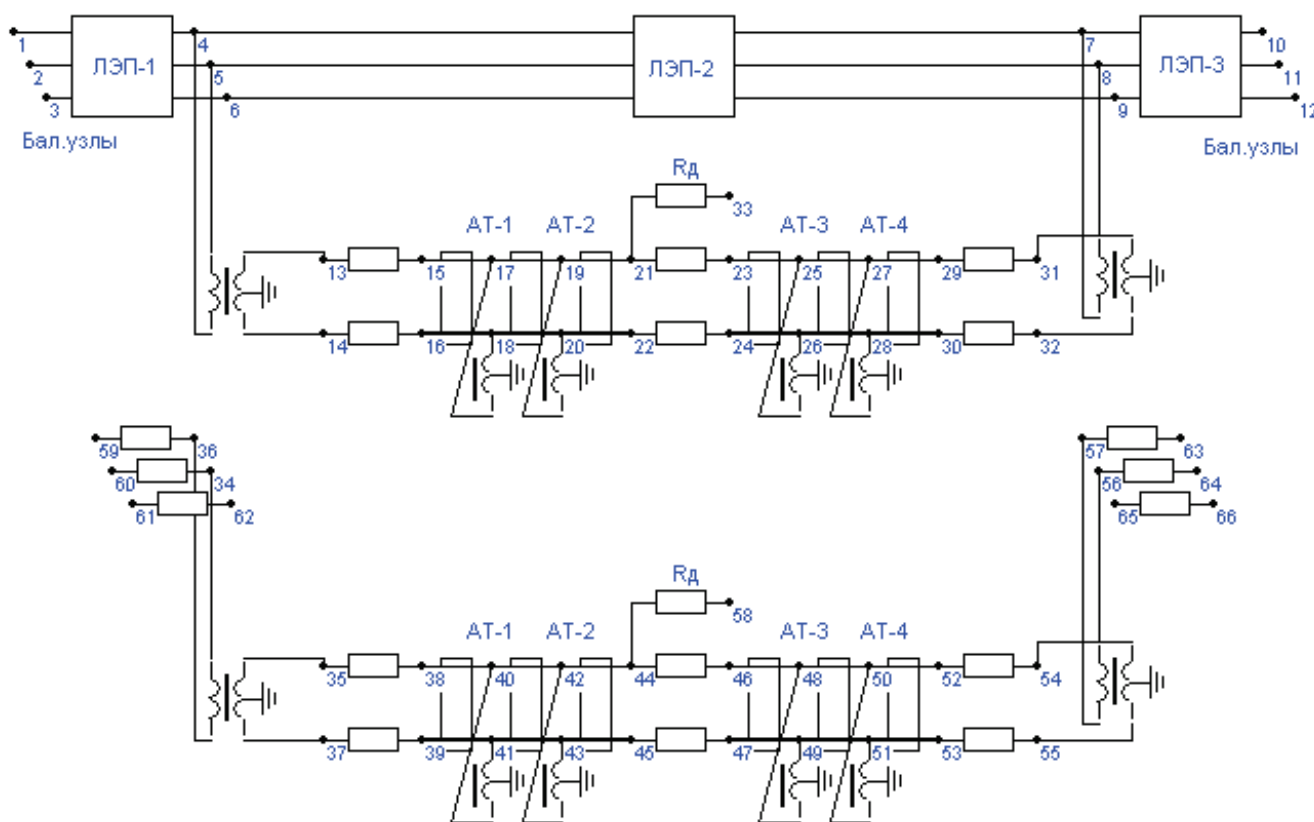


Рис. 2. Расчетная схема ПК Fazonord для учета взаимосвязи по ЛЭП и схема с эквивалентными реактансами



Верхняя схема рис. 2 соответствует двустороннему питанию тяговых подстанций от одной линии электропередачи. Длины участков ЛЭП-1, ЛЭП-2 и ЛЭП-3 равны 120,2 км, 80 км и 120,2 км для токов КЗ на вводах подстанций 2008 А (мощности КЗ 400 МВ·А). Эквивалентные реактансы на нижней схеме равны  $j33,1$  Ом. Напряжения балан-

сирующих узлов 1, 2, 3, 10, 11, 12, 59, 60, 61, 63, 64, 65 понижены до 63,26 кВ для соответствия напряжению холостого хода на тяговых шинах 26,2 кВ по примеру [7].

Результаты сопоставительных расчетов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

## Сопоставление результатов расчетов режима КЗ разными методами

Показатель	Пример [7]	Схема с ЛЭП	Различие с [7]	Схема с $X_{КЗ}$	Различие с [7]
Ток ПП у ПС, А	1086	1079	-0,6	1190	9,6
Ток КС у ТП-А, А	577	564	-2,3	622	7,8
Ток ПП у ТП-А, А	509	513	0,8	565	11,0
Напряжение КС у ТП-А, кВ	16,3	14,1	-13,5	15,5	-4,9
Напряжение ПП у ТП-А, кВ	17,0	14,5	-14,7	16	-5,9
Сопротивление $Z_{к1}$ , Ом	28,2	25,0	-11,3	24,9	-11,7
Сопротивление $Z_{п1}$ , Ом	33,4	28,3	-15,3	28,3	-15,3

Примечание. ПП – питающий провод; КС – контактная сеть;  $Z_{к1}$  и  $Z_{п1}$  – сопротивления контактной подвески и питающего провода со стороны ТП-А.

Результаты расчетов показывают сравнительно небольшие различия разных методов: отклонения по токам не превышают 10 %, по напряжениям и сопротивлениям – 15 %. Вместе с тем расчетная схема с полнофункциональными моделями ЛЭП дает более близкие результаты с расчетами по формулам [7] по токам, в то время как схема с эквивалентными реактансами показывает малые отличия с [7] по напряжениям. Таким образом, можно констатировать приемлемую точность приближенных расчетов коротких замыканий на посту секционирования тяговой сети 2×25 кВ.

#### Расчеты токов КЗ программным комплексом «Кортэс»

Расчеты токов и сопротивлений короткого замыкания тяговой сети при проектировании и в эксплуатации производятся программным комплексом «Кортэс», в котором заложено то же эквивалентирование внешней сети реактансом короткого замыкания. Для сопоставления расчетов токов КЗ комплексом «Кортэс» и ПК Fazonord выбрана схема электроснабжения участка железной дороги 2×25 кВ, часть которой показана на рис. 3.

Межподстанционная зона длиной 85 км входит в состав протяженного участка, получающего питание от линии электропередачи напряжением 220 кВ. Силовой трансформатор тяговой подстанции ТП-А – типа ОРДТНЖ-25000/220, ТП-Б –

ОРДТНЖ-25000/110, автотрансформаторы – АОМНЖ-16000/55. Питание подстанции ТП-Б производится напряжением 110 кВ от двух автотрансформаторов АТ-63000/220/110. Автотрансформатор АТ1 расположен вблизи подстанции ТП-А. Тяговая сеть – ПБСМ95+МФ-100+А185+2Р65, длины участков показаны на рис. 3. Мощности КЗ на вводах подстанции равны 423 МВ·А для ТП-А и 389 МВ·А для ТП-Б.

При моделировании рассмотрены два вида коротких замыкания: контактная сеть – рельсы (КЗ-1) вблизи ТП-А при отключенной подстанции ТП-А и питающий провод – рельсы (КЗ-2) вблизи ТП-Б при включенных подстанциях. Замыкание КЗ-1 происходит правее АТ-1, и в этом варианте токи КС и ПП левее места замыкания равны токам АТ-1.

Расчетная схема комплекса «Кортэс» показана на рис. 4. Схемы моделей комплекса Fazonord показаны на рис. 5 и 6. Расчеты токов КЗ по модели комплекса Fazonord на вводах подстанций ТП-А и ТП-Б по рис. 5 показали соответствие значениям мощностей КЗ 423 МВ·А и 389 МВ·А. Реактансы внешнего электроснабжения схемы рис. 6 для ТП-А и ТП-Б при напряжениях 230 и 115 кВ равны соответственно 125 Ом и 34 Ом. Результаты сопоставительных расчетов токов КЗ сведены в табл. 2 и 3.

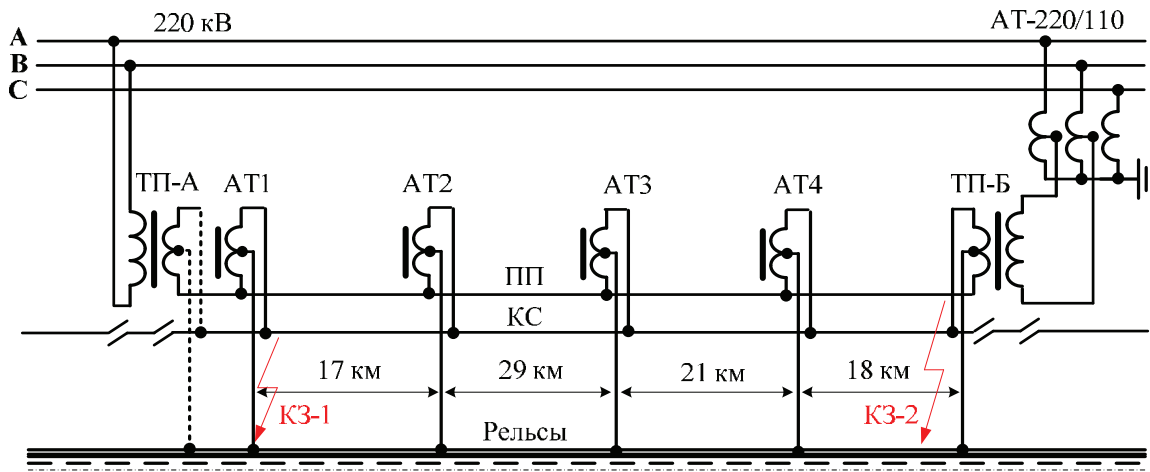


Рис. 3. Схема питания участка 2×25 кВ

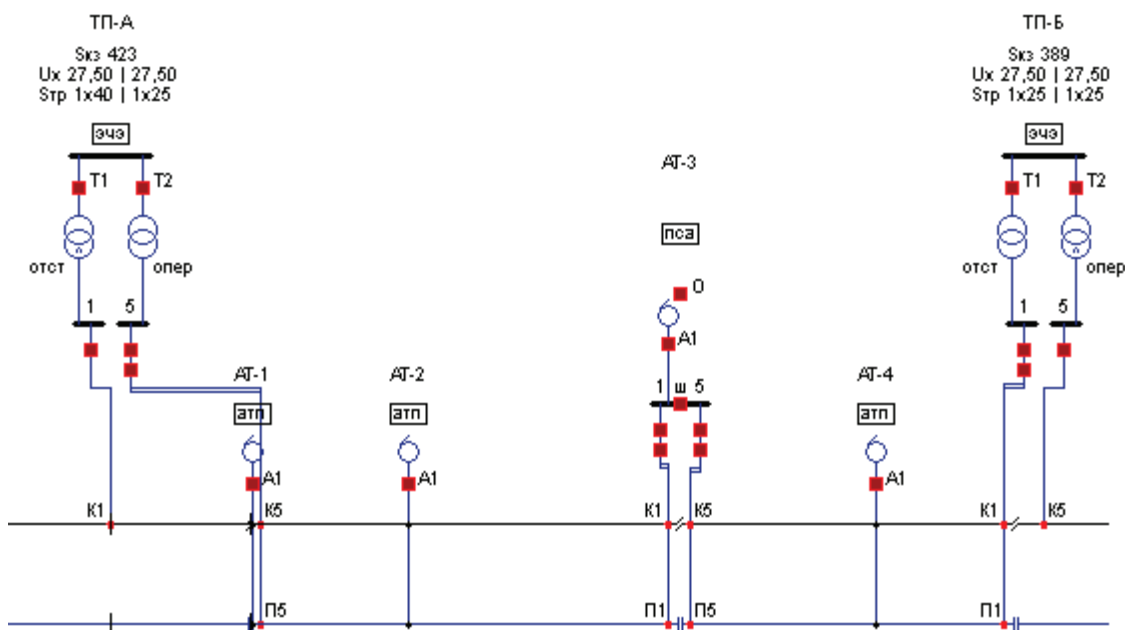


Рис. 4. Расчетная схема комплекса «Кортэс»

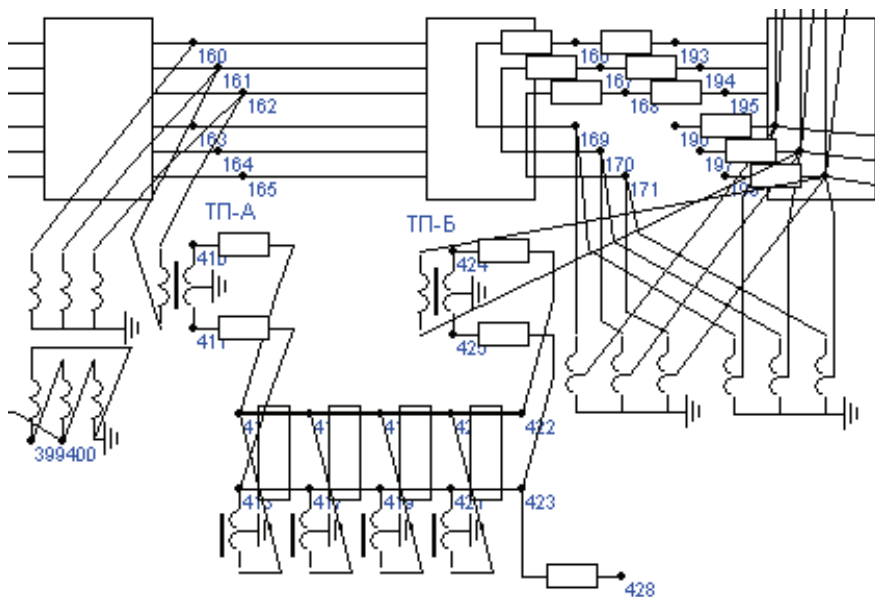


Рис. 5. Фрагмент полной расчетной схемы комплекса Fazonord

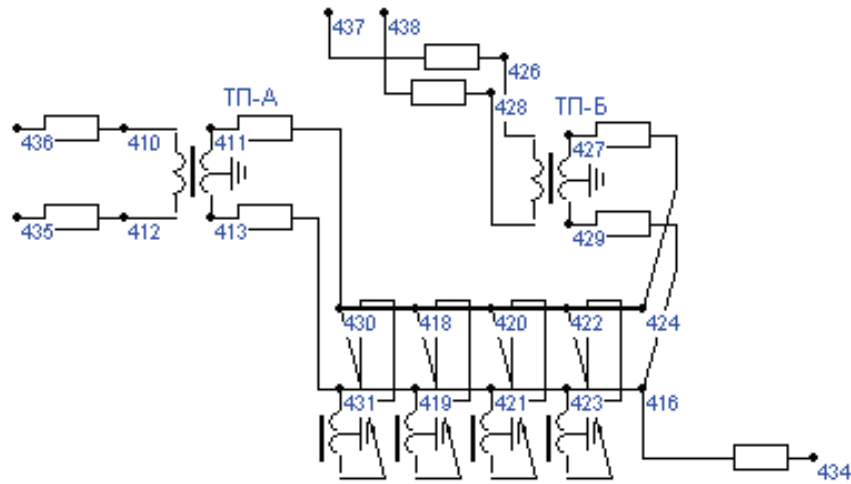


Рис. 6. Расчетная схема комплекса Fazonord при эквивалентировании внешнего электроснабжения

Как видно из табл. 2, при одной включенной подстанции расхождение по токам КЗ и сопротивлениям между расчетами комплексами «Кортэс» и Fazonord не превышают 15 %. Расхождение между значениями напряжений питающего провода у ТП-А ввиду малости этих напряжений значения не имеют.

Т а б л и ц а 2

Сопоставление результатов расчетов КЗ-1 при отключенной ТП-А

Показатель	«Корт-эс»	Схема с $X_{КЗ}$	Схема с ЛЭП	Различие «Кортэс» и ЛЭП, %	Различие $X_{КЗ}$ и ЛЭП, %
Ток КЗ, А	1132	1251	1245	-9,1	0,5
Ток КС у ТП-А, А	455	532	529	-14,0	0,6
Ток ПП у ТП-А, А	455	532	529	-14,0	0,6
Ток КС у ТП-Б, А	599	665	662	-9,5	0,5
Ток ПП у ТП-Б, А	531	581	578	-8,1	0,5
Напряжение ПП у ТП-А, кВ	1,8	1,0	1,0	80,0	0,0
Напряжение КС у ТП-Б, кВ	19,8	19,3	19,2	3,1	0,5
Напряжение ПП у ТП-Б, кВ	20,2	19,7	19,6	3,1	0,5
Сопрогивление $Z_{кс1}$ , Ом	33,1	29,0	29,0	14,1	0,0
Сопрогивление $Z_{пп1}$ , Ом	38,0	33,9	33,9	12,1	0,0

Примечание. ПП – питающий провод; КС – контактная сеть;  $Z_{кс1}$  и  $Z_{пп1}$  – сопротивления контактной подвески и питающего провода со стороны ТП-Б.

Т а б л и ц а 3

Сопоставление результатов расчетов КЗ-2

Показатель	«Корт эс»	Схема с $X_{КЗ}$	Схема с ЛЭП	Различие «Кортэс» и ЛЭП, %	Различие $X_{КЗ}$ и ЛЭП, %
Ток КЗ, А	3319	3720	3348	-0,9	11,1
Ток ФКС у ТП-А, А	350	429	285	22,8	50,5
Ток ФПП у ТП-А, А	343	421	240	42,9	75,4
Ток обмоток правой АТП, А	564	516	461	22,3	11,9
Ток ФКС у ТП-Б, А	249	76	197	26,4	-61,4
Ток ФПП у ТП-Б, А	2387	2808	2634	-9,4	6,6
Напряжение КС у ТП-А, кВ	22,3	21,6	15,7	42,0	37,6
Напряжение ПП у ТП-А, кВ	22,3	21,6	15,7	42,0	37,6
Напряжение КС у ТП-Б, кВ	16,2	15,9	14,2	14,1	12,0
Сопрогивление $Z_{кс1}$ , Ом	63,9	50,3	55,1	16,0	-8,6
Сопрогивление $Z_{пп1}$ , Ом	65,2	51,3	65,4	-0,3	-21,6

Примечание. ФПП – фидер питающего провода; ФКС – фидер контактной сети;  $Z_{кс1}$  и  $Z_{пп1}$  – сопротивления контактной подвески и питающего провода со стороны ТП-А.

При двух включенных подстанциях, по данным табл. 3, различия результатов разных методик существенно больше. Максимальные различия



между ПК «Кортэс» и полной схемой Fazonord – до 43 % – наблюдаются для токов подстанции, удаленной от места КЗ. В остальных случаях расхождения не превышают 26 %. По уровням напряжений у подстанции, расположенной вблизи места КЗ, различия достигают 42 %. В то же время необходимо отметить, что расчеты ПК «Кортэс» дают заметно меньшие расхождения с полной схемой ПК Fazonord по сравнению с прямым эквивалентированием внешней сети реактансами КЗ в комплексе Fazonord.

#### Заключение

Расчеты токов КЗ в тяговой сети 2×25 кВ сравнительно простой конфигурации в трех вариантах, а именно: 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 упрощенной модели с эквивалентными реактансами внешнего электроснабжения – показывают сравнительно небольшие погрешности: отклонения по токам не превышают 10 %, напряжениям 5 % и сопротивлениям 15 %.

При сопоставлении расчетов комплексами Fazonord и «Кортэс» для участка реальной системы 2×25 кВ имеют место существенные различия – до 43 % – для токов подстанции, удаленной от места КЗ в тяговой сети.

При сопоставлении расчетов комплексами Fazonord и «Кортэс» для участка реальной системы 2×25 кВ имеют место существенные различия – до 43 % – для токов подстанции, удаленной от места КЗ в тяговой сети.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока. М. : Маршрут, 2006. 272 с.
3. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2009. 604 с.
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. Расчет токораспределения при коротких замыканиях в тяговых сетях / К.Г. Марквардт и др. // Электричество. 1979. № 3. С. 30–34.
6. Система тягового электроснабжения 2×25 кВ / Б.М. Бородулин и др. М. : Транспорт, 1989. 247 с.
7. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М. : Трансиздат, 2005. 216 с.
8. СП 224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги : утв. приказом Минтранса от 02 дек. 2014. № 330. 85 с.
9. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та. 2005. 273 с.
10. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск : Изд-во ИРГУПС, 2011. 170 с.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многообмоточных трансформаторов в фазных координатах // Электротехника. 2008. № 5. С. 56–61.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения 2×25 кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами Вудбриджа // Изв. Транссиба. 2016. № 2 (26). С. 70–78.
13. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Мультифункциональный подход к моделированию электроэнергетических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4(40). С. 100–107.
14. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения в фазных координатах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 284–288
15. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Асташин С.М. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока // Проблемы энергетики. 2008. № 34. С. 134–140.

### REFERENCES

1. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electrosupply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ., 1982, 528 p.
2. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E. Releynaya zashchita setei tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Relay protection of traction power supply networks of alternating current]. Moscow: Marshrut Publ., 2006, 272 p.
3. Figurnov E.P. Releynaya zashchita. Ch. 2 [Relay protection. Part 2]. Moscow: Educational-methodological center for education in the rail transport, 2009, 604 p.
4. German L.A., Sharov A.V. Raschet tokov korotkogo zamykaniya v tyagovykh setyakh peremennogo toka zheleznykh dorog [Calculation of short-circuit currents in traction networks of alternating current of railways]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2003, No. 3, pp. 27–34.
5. Markvardt K.G. et al. Raschet tokoraspredeleniya pri korotkikh zamykaniyakh v tyagovykh setyakh [Calculation of current distribution in case of short circuits in traction networks]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1979, No. 3, pp. 30–34.
6. Borodulin B.M. et al. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya 2×25 kV [Traction power supply system 2×25 kV]. Moscow: Transport Publ., 1989, 247 p.
7. Rukovodyashchie ukazaniya po releinoi zashchite sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Guidelines for the relay protection of traction power supply systems]. Moscow: Transizdat Publ., 2005, 216 p.
8. SP 224.1326000.2014. Tyagovoe elektrosnabzhenie zheleznoi dorogi : utv. prikazom Mintransa ot 02 dek. 2014 [SP 224.1326000.2014. Traction power supply of the railway: approved by the Order of the Ministry of Transport dated December 02, 2014]. No. 330, 85 p.



9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh system [Complexly asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. state un-ty Publ., 2005, 273 p.
10. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: ISTU Publ., 2011, 170 p.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovanie mnogoobmotochnykh transformatorov v faznykh koordinatakh [Modeling of multi-winding transformers in phase coordinates]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2008, No. 5, pp. 56–61.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya 2x25 kV s koaksial'nymi kabelyami i transformatorami Vudbridzha [Modeling of traction power systems 2x25 kV with coaxial cables and Woodbridge transformers]. *Izv. Transsib* [Journal of Transsib Railway Studies], 2016, No. 2 (26), pp. 70–78.
13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Mul'tifunktional'nyi podkhod k modelirovaniyu elektroenergeticheskikh system [Multifunctional approach to modeling of electric power systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2013, No. 4(40), pp. 100–107.
14. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Modelirovanie sistem tyagovogo elektrosnabzheniya v faznykh koordinatakh [Modeling of traction power supply systems in phase coordinates]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2009, No. 1, pp. 284–288
15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Astashin S.M. Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Modeling of systems of power supply of railways of an alternating current]. *Problemy energetiki* [Issues of power engineering], 2008, No. 34, pp. 134–140.

### Информация об авторах

### Authors

*Закарюкин Василий Пантелеймонович* - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru

*Крюков Андрей Васильевич* - д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

*Алексеенко Евгения Алексеевна* - магистр техники и технологии, энергодиспетчер Иркутской дистанции электроснабжения, Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение «Трансэнерго» ОАО «РЖД», г. Иркутск, e-mail: alev\_ia@mail.ru

*Vasily Panteleimonovich Zakaryukin* – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: zakar49@mail.ru

*Andrei Vasilievich Kryukov* – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

*Yevgenia Alekseevna Alekseenko* – Master's Degree of Engineering and Technology, a power dispatcher of the Irkutsk power supply station, East Siberian Directorate for Energy Supply, the structural unit of Transenergo of JSC Russian Railways, Irkutsk, e-mail: alev\_ia@mail.ru

### Для цитирования

### For citation

Закарюкин В. П. Анализ применимости эквивалентов внешней сети определения токов короткого замыкания в автотрансформаторных системах тягового электроснабжения 2×25 кВ / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. А. Алексеенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — Т. 56, № 4. — С. 160–167. — DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).160-167.

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Alekseenko E. A. Analiz primenimosti ekvivalentov vneshnei seti dlya opredeleniya tokov korotkogo zamykaniya v avtotransformatornykh sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya 2×25 kV [Analysis of applicability of external network equivalents for definition of short circuit currents in 2×25 kv autotransformer traction power supply systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 56, No. 4, pp. 160–167. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).160-167.

УДК 629.4; 621.534; 62.752

DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).167-175

**А. И. Орленко<sup>1</sup>, А. В. Елисеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ИрГУПС, г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 18 ноября 2017 г.

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАРУШЕНИЯ КОНТАКТА

**Аннотация.** Целью предлагаемого исследования является разработка теоретических основ динамических взаимодействий между элементами контактной группы коллекторно-щеточного узла в условиях интенсивного динамического нагружения тягового двигателя электровоза. Разработаны принципы построения математической модели взаимодействия поверхности коллектора и щетки, находящихся в состояниях неустойчивающих связей. Аналитический подход развивается на основе математического аппарата теории колебаний механических систем, элементы которых участвуют в сложных формах взаи-