

УДК 621.313

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_15

УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Л.А. Герман

филиал Самарского государственного университета путей сообщения
в Нижнем Новгороде
Нижний Новгород, Россия
lagerman@mail.ru

И.П. Карпов

филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению
Нижний Новгород, Россия
ORCID:0000-0001-9520-7546 ech2_karpovip@grw.ru

Рассматриваются вопросы расчета токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети переменного тока. Приведен анализ погрешности расчета по нормативному методу в зависимости от схемы подключения тяговой подстанции к системе внешнего электроснабжения. Предложен уточненный метод расчета токов КЗ по данным сопротивлений короткого замыкания от энергосистемы. Расчет автоматизирован с использованием интегрированной системы Mathcad и программы ПАСТ-05К.

Ключевые слова: токи короткого замыкания, система тягового и внешнего электроснабжения, высоковольтная линия, тяговая подстанция.

Для цитирования: Герман Л.А., Карпов И.П. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15

REFINED METHOD FOR CALCULATING SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN AC TRACTION NETWORK

L.A. German

Branch of the Samara State University of Railway Transport in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia
lagerman@mail.ru

I.P. Karpov

Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply
Nizhny Novgorod, Russia

ORCID:0000-0001-9520-7546 ech2_karpovip@grw.ru

Abstract. The article deals with the calculation of short-circuit currents in the AC traction network. The analysis of the calculation error according to the standard method, depending on the connection scheme of the traction substation to the external power supply system, is given. A refined method for calculating short-circuit currents based on the data of short-circuit resistances from the power system is proposed. The calculation is automated using the integrated Mathcad system and the RAST-05K program.

Keywords: short-circuit currents, traction and external power supply system, high-voltage line, traction substation.

For citation: L.A. German and I.P. Karpov, “Refined method for calculating short-circuit currents in AC traction network”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 15-25, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15.

I. Введение

Уже много десятков лет достаточно успешно ведутся расчеты токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети железных дорог по нормативным документам [1]. Однако в [2, 3] было показано, что в ряде случаев возможна погрешность в расчетах тока КЗ при неполной схеме системы внешнего электроснабжения (СВЭ). Опасность большой погрешности расчета токов КЗ проявляется, прежде всего, последующим неправильным расчетом релейной защиты.

Действительно, на момент проектных расчетов в большинстве случаев по разным причинам нет полной схемы внешнего электроснабжения тяговых подстанций, поэтому результаты расчетов в проекте в ряде случаев являются приближенными. Однако перед первым включением тяговых подстанций после монтажа и наладки такая схема СВЭ (пусть даже временная) уже есть, и поэтому в дальнейшем уточненный расчет токов КЗ производят специалисты эксплуатационных организаций.

Попытки уточненных методов расчета предпринимались в [3, 4]. Однако они были связаны с дополнительными условиями организации опытов КЗ [3] или с необходимостью дополнительных расчетов сопротивлений линий к тяговым подстанциям [4]. Поэтому в представленной работе поставлена задача разработать уточненный метод расчета токов КЗ при условии использования только полученных данные от энергосистемы по мощности КЗ (или по сопротивлениям КЗ) смежных тяговых подстанций.

II. Схемы питания тяговых подстанций

Для формирования схемы замещения рассмотрим схемы питания тяговых подстанций (рис. 1) по нормативным документам [5].

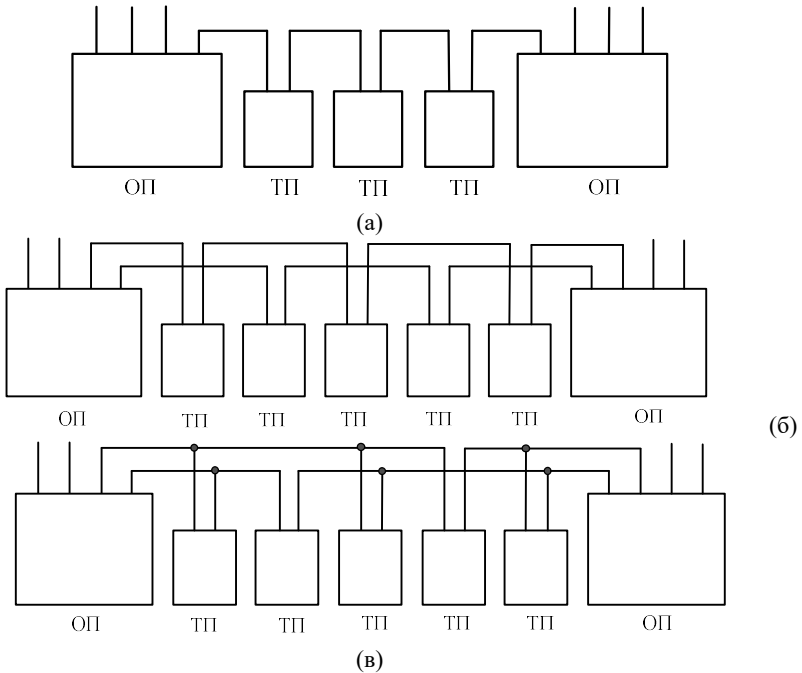


Рис. 1. Схемы подключения тяговых подстанций ТП

к электрическим сетям между двумя опорными подстанциями ОП территориальных сетевых и(или) иных энергоснабжающих организаций: в рассечку одноцепной линии электропередачи (а); в рассечку или на ответвлениях от двухцепной линии электропередачи (б); в рассечку или на ответвлениях от двух одноцепных линий электропередачи (в)

Fig. 1. Schemes for connecting traction substations ТП to electrical networks between two support substations ОП of territorial grid and (or) power supply organizations:

into the cut of a single-circuit power transmission line (a); in a cut or on branches from a double-circuit line (b); in a cut or on branches from two single circuit lines (c)

Как видно на рис. 1, если длина линии ВЛ-110(220) кВ между смежными подстанциями ограничена расстоянием между подстанциями (по системе 25 кВ это примерно 50-60 км), указанное расстояние по схеме элек-

троснабжения на рис. 2 увеличивается до двойного расстояния между смежными подстанциями, а на рис. 3 это расстояние по системе 25 кВ может быть более 100-150 км. В системе 2х25 кВ эти расстояния еще больше. Таким образом, в системе 25 кВ расстояния между двумя смежными подстанциями могут быть от 50 до 150 км, а в системе 2х25 кВ в 1,5 раза больше.

III. Оценка погрешности расчета токов КЗ

Выполним расчеты токов КЗ для различных схем питания тяговых подстанций с целью определения максимальной погрешности, что в дальнейшем даст возможность обосновать методы расчета, исключающих погрешность в определении токов КЗ. Оценку погрешности определим путем расчета токов КЗ по нормативному методу, т.е. по документу [1]. В этом случае используют данные энергосистемы по мощности КЗ (или сопротивления КЗ) на шинах тяговых подстанций. При этом эквивалентруется вся схема электроснабжения СВЭ при питании рассматриваемых тяговых подстанций.

Далее сравним полученные расчеты с аналогичными в полной схеме электроснабжения СВЭ при питании места КЗ. Совершенно ясно, что для сравнительных расчетов должны быть одинаковые мощности КЗ на вводах тяговых подстанциях в сравниваемых вариантах. В этом случае возможны два пути расчета:

- 1) принимается мощность КЗ на подстанции по данным энергосистемы, и по реальной схеме СВЭ определяются ее параметры так, чтобы в результате получилась мощность КЗ на подстанции равной исходной;
- 2) определяется реальная схема СВЭ, рассчитываются ее параметры, и в результате определяется, какая должна быть мощность КЗ от энергосистемы.

В дальнейшем будем вести расчеты по второму пути.

Выполним расчет токов КЗ с двухцепной ВЛ-110кВ по схеме питания на рис. 1в с транзитными и отпаечными подстанциями, в которой укажем все расстояния линий ВЛ-110кВ до подстанций ТП-2, ТП-3, ТП-4 и представим на рис. 2.

Для расчета принимаем все расстояния между подстанциями и от пункта питания до ТП-1 – 50 км, провод АС-185, погонное сопротивление $Z = 0,17 + j0,377$ [6]. Тип контактной подвески принимаем ПБСМ-70+МФ-100, погонное сопротивление контактной подвески двухпутного участка $Z = 0,111 + j0,286$ [1].

Рассмотрим четыре варианта расчетов:

1 вариант – Подстанция ТП-2 подключена к ВЛ-1 и связь между ТП-2 и ТП-3 по линии ВЛ-110 кВ составляет 150 км;

2 вариант – ТП-2 подключена к ВЛ2, «перемычка» 50 км;

3 и 4 варианты повторяют варианты 1 и 2, но источник питания подключается непосредственно к ТП-1 и приближается к ТП-2 на расстояние 50 км.

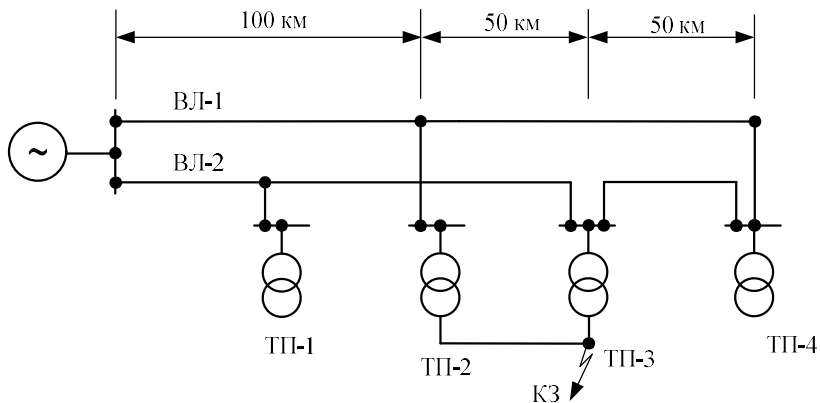


Рис. 2. Схема подключения тяговых подстанций к линии ВЛ-110 кВ
Fig. 2. Connection diagram of traction substations to the 110 kV overhead line

Как показали последующие расчеты мощности, КЗ на ТП-2 и ТП-3 в вариантах 1 и 2 (и, соответственно, в 3 и 4) не изменяются.

Результаты расчета по программе РАСТ-05К [7] приведены в табл. 1. Из приведенных данных следует: если расстояние по ВЛ-110кВ между смежными подстанциями 150 км (вариант 1), погрешность расчета токов КЗ составляет 26 %, но она резко возрастает до 51 %, когда ТП-2 переключается к ВЛ-2, и расстояние между смежными подстанциями ТП-2 и ТП-3 по ВЛ-110 кВ становится равным 50 км. Также следует, что токи КЗ по нормативному методу больше реальных токов КЗ. Если же расстояние до источника питания уменьшить на 50 км (варианты 3 и 4, считаем, что при этом мощность КЗ на шинах источника питания не изменилась), то уменьшатся погрешности расчетов тока КЗ при обеих «перемычках». Однако, все равно с уменьшением сопротивления «перемычки» погрешность расчета в варианте 50 км значительно больше, чем в варианте в 150 км (сравните 28 % и 13 %). Таким образом, можно утверждать, что погрешность расчета токов КЗ в тяговой сети зависит и от расстояния до источника питания (т.е. от мощности КЗ на шинах тяговых подстанциях) и, кроме того, от сопротивления «перемычки» между смежными подстанциями. При этом наибольшее значение погрешности будет при непосредственном соединении двух смежных подстанций (т.е. при 50-60 км).

Таблица 1.
Токи КЗ при разных расстояниях ВЛ-110 кВ,
соединяющих смежные подстанции

Table 1.
Short-circuit currents at different distances of 110 kV
overhead lines connecting adjacent substations

Условия расчета по рис. 2	Токи в полной схеме, А		Токи по нормативному методу [1], А		Отношение расчетных сравниваемых токов		Мощ- ность КЗ
	В тяго- вой сети	Сум- марный ток КЗ	В тяго- вой сети	Сум- марный ток КЗ	В тяго- вой сети	Сум- марно- го	
Вариант 1 («перемычка» 150 км)	979	3938	1238	4423	1,26	1,12	405/ 324
Вариант 2 («перемычка» 50 км)	820	3688	1238	4423	1,51	1,20	
Вариант 3 («перемычка» 150 км)	1190	4847	1344	5147	1,13	1,06	729/ 456
Вариант 4 «перемычка» 50 км)	1045	4591	1344	5147	1,28	1,12	

Совершенно ясно, что при ВЛ-220 кВ, а также в системе 2х25 кВ погрешности расчета токов КЗ снижаются, так как сопротивления «перемычек» увеличиваются.

IV. Преобразование схемы внешнего электроснабжения

Для всех способов подключения можно представить единую схему замещения: два луча линии 110 (220) кВ от шин 110 (220) кВ тяговых подстанций до источника питания и одна линия 110 (220) кВ, соединяющая тяговые подстанции, т.е. схему замещения в виде «треугольника». Отметим, что для системы 2х25 кВ расстояния между подстанциями увеличивается, и поэтому увеличивается линия 110 (220) кВ между ними. Схема замещения для двух узлов шин 110 (220) кВ смежных подстанций представлена на рис. 3а. Обозначения на рисунке: Z_{01} и Z_{02} – сопротивления от источника питания до узлов двух смежных тяговых подстанций, у которых сопротивления КЗ, переданных от энергосистемы, соответственно равны Z_{c1} и Z_{c2} ; Z_{12} – сопротивление, соединяющее шины 110 (220) кВ двух подстанций.

Преобразованная схема «треугольника» в «звезду» показана на рис. 3(б). Полученное в схеме «звезда» сопротивление Z_1 представляет взаимное сопротивление двух рассматриваемых узлов.

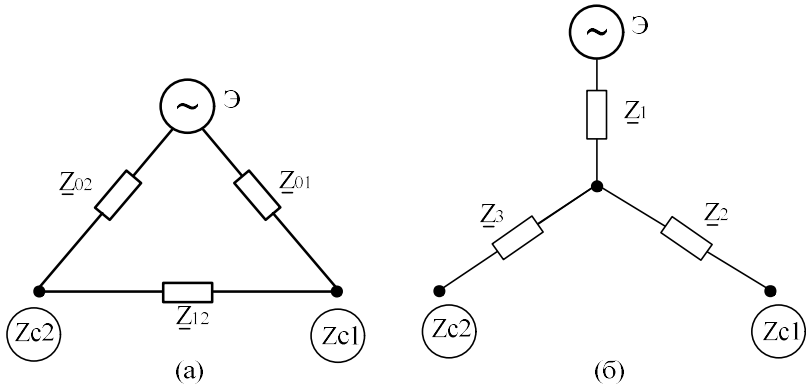


Рис. 3. Преобразование схемы внешнего электроснабжения из «треугольника» (а) в «звезду» (б)

Fig. 3. Conversion of the external power supply circuit from a «triangle» (a) to a «star» (b)

По схеме на рис. 3(а) сопротивления Z_{c1} и Z_{c2} определяются следующим образом:

$$Z_{c1} = \frac{Z_{01} \cdot (Z_{02} + Z_{12})}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}; \quad (1)$$

$$Z_{c1} = \frac{Z_{02} \cdot (Z_{01} + Z_{12})}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}. \quad (2)$$

В этих уравнениях известные значения Z_{c1} и Z_{c2} , а неизвестные – Z_{01} и Z_{02} . Из системы уравнений (1) и (2) определяем Z_{01} и Z_{02} и далее по формуле преобразования Δ в Y находим сопротивления лучей «звезды» по рис. 3(б) – Z_1 , Z_2 , Z_3 :

$$Z_1 = \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}; \quad (3)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{01} \cdot Z_{12}}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}; \quad (4)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}}. \quad (5)$$

Из выражений (3)-(5) ясно, что узловые сопротивления шин 110 (220) кВ тяговых подстанций равны:

$$Z_{C1} = Z_2 + Z_1; Z_{C2} = Z_3 + Z_1.$$

Взаимное сопротивление указанных узлов – Z_1 .

Путем преобразования (1) и (2) получим квадратные уравнения с известными Z_{01} и Z_{02} :

$$Z_{01}^2 \cdot (Z_{C1} - Z_{12} - Z_{C2}) + Z_{01} \cdot (2 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{12} - Z_{12}^2) + Z_{C1} \cdot Z_{12}^2 = 0; \quad (6)$$

$$Z_{02}^2 \cdot (Z_{C2} - Z_{12} - Z_{C1}) + Z_{02} \cdot (2 \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12} - Z_{12}^2) + Z_{C2} \cdot Z_{12}^2 = 0. \quad (7)$$

Решения (6) и (7), при которых получаются положительные значения сопротивлений, имеют вид:

$$Z_{01} = \frac{Z_{12}^2 - 2 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{12} - \sqrt{Z_{12}^4 + 4 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}^2}}{2 \cdot (Z_{C1} - Z_{12} - Z_{C2})} - \frac{\sqrt{Z_{12}^4 + 4 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}^2}}{2 \cdot (Z_{C1} - Z_{12} - Z_{C2})}; \quad (8)$$

$$Z_{02} = \frac{Z_{12}^2 - 2 \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12} - \sqrt{Z_{12}^4 + 4 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}^2}}{2 \cdot (Z_{C2} - Z_{12} - Z_{C1})} - \frac{\sqrt{Z_{12}^4 + 4 \cdot Z_{C1} \cdot Z_{C2} \cdot Z_{12}^2}}{2 \cdot (Z_{C2} - Z_{12} - Z_{C1})}. \quad (9)$$

Таким образом, окончательные выражения (8) и (9) получены из (1) и (2). Совершенно ясно, что при отсутствии Z_{12} $Z_{01} = Z_{C1}$ и $Z_{02} = Z_{C2}$, но это же получается, когда в (1) и (2) при $Z_{12} = \infty$ (бесконечность) $Z_{01} = Z_{C1}$ и $Z_{02} = Z_{C2}$. Указанное является доказательством справедливости исходных позиций (1) и (2) и, соответственно, получения (8) и (9).

В.Уточненный метод расчета токов КЗ

Известны реальные схемы раздельного питания энергосистем, когда возможен случай отсутствия линии ВЛ-110(220) кВ между подстанциями, т.е. отсутствует сопротивление Z_{12} (обычно эта линия отключается у подстанции). Тогда $Z_{01} = Z_{C1}$ и $Z_{02} = Z_{C2}$ и нет необходимости применения (7) и (8), а расчет токов КЗ следует производить по существующему нормативному методу [1].

Таким образом, для уточненного метода расчета токов КЗ в тяговой сети формируется следующий алгоритм.

1. Определяются два сопротивления Z_{01} , Z_{02} , по рис. 3(а) и добавляется Z_{12} к данным для расчета токов КЗ в тяговой сети.

2. Рассчитываются три сопротивления Z_1 , Z_2 , Z_3 в схеме «звезда» по рис. 3(б) по (3)-(5).

3. По данным п. 2, т.е. по данным схемы замещения электроснабжения СВЭ для двух смежных тяговых подстанций (рис. 4), рассчитываются

токи КЗ в тяговой сети.

Использованные обозначения: Z_{AB} – сопротивление в месте КЗ, $Z_{тсА}$ и $Z_{тсВ}$ – эквивалентные сопротивления тяговой сети на первом и втором участках межподстанционной зоны; $Z_{трА}$ и $Z_{трВ}$ – сопротивления тяговых трансформаторов (приведенные к напряжению 27,5 кВ); Z_1 – взаимное сопротивление линий 110 (220) кВ к тяговым подстанциям; Z_2 и Z_3 – сопротивления линий 110 (220) кВ к тяговым подстанциям ТП А и ТП В (приведенные к напряжению 27,5 кВ); $U_{AB,рас}$ – напряжение источника питания, приведенное к тяговой обмотке, принимается по соответствующим требованиям нормативных документов [1].

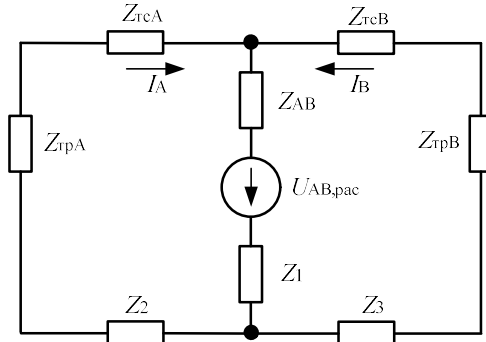


Рис. 4. Схема замещения системы тягового электроснабжения для расчета токов КЗ в тяговой сети

Fig. 4. The equivalent circuit of the traction power supply system for calculating the short-circuit currents in the traction network

Так решается задача уточненного расчета токов КЗ по данным энергосистемы (т.е. по данным мощности КЗ или по сопротивлению КЗ от энергосистемы) и параметрам сопротивления Z_{12} .

Для автоматизации расчетов токов КЗ разработана программа в интегрированной системе MATHCAD в следующей последовательности.

1. По (8) и (9) определяются Z_{01} и Z_{02} .
2. Определяются все значения «треугольника» в схеме замещения по рис. 3(а).
3. Выполняется преобразование схемы «треугольник» в схему «звезда», рис. 3(б).
4. По схеме замещения на рис. 4 рассчитываются токи КЗ в тяговой сети.

Целесообразно для расчетов применять программу РАСТ-05К [7], в которую вводятся параметры схемы «треугольник» и рассчитываются токи КЗ в тяговой сети.

Проверка (8) и (9) выполнена для реальных индуктивных значений сопротивлений СВЭ и показала правильность вывода указанных формул.

Пример. Пусть дано (по данным энергосистемы) $Z_{c1} = 2,38$ Ом $Z_{c2} = 2,62$ Ом и рассчитано $Z_{12} = 1,5$ Ом. Требуется определить параметры схемы замещения.

Решение. По (8) и (9) получим $Z_{01} = 3,65$ Ом и $Z_{02} = 5,33$ Ом, далее по (3)-(5) определяем Z_1, Z_2, Z_3 .

Итак, если раньше для расчета взаимного сопротивления Z_1 необходимо было провести расчеты и измерения на действующей подстанции [2], то теперь этого не требуется, на основании полученных (8) и (9) можно получить все параметры схемы замещения для уточненного расчета токов короткого замыкания в тяговой сети.

VI. Выводы

Разработан уточненный метод расчета токов КЗ по данным сопротивлений КЗ от энергосистемы в схеме замещения «треугольник», у которого два луча сопротивления соединяют шины 110 (220) кВ двух смежных тяговых подстанций с источником питания, а указанные шины соединяются линией 110 (220) кВ.

Сформирован алгоритм расчета токов КЗ вычислением параметров схемы замещения.

Расчет токов КЗ автоматизирован с использованием интегрированной системы MATCAD и программы РАСТ-05К.

© Герман Л.А., 2021

© Карлов И.П., 2021

Поступила в редакцию 09.06.2021

Received 09.06.2021

Библиографический список

- [1] СТО РЖД 07.021.4-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. Введ. 2016-05-01. М. – 136 с.
- [2] 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.
- [3] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Серебряков А.С. Стенд для расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Пат. 2705517 RU, заявл. 26.12.2018; опубл. 07.11.2019. – Бюл. № 31.
- [4] Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Попова Н.А. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27,5 кВ // Электричество. 2020. № 8. С. 30-35. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36.

- [5] СП 224.132600.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. М.: Техинформ, 2019. – 304 с.
- [6] Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
- [7] Герман Л.А., Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. М.: МИИТ, 2010. – 60 с.

References

- [1] Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi ot korotkih замыканий i peregruzki. СНаст' 4. Metodika vybora ustavok zashchit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 4. Methodology for selection of protection settings in the AC traction power supply system], СТО RZD 07.021.4-2015, May 2016 (in Russian).
- [2] L.A. German, K.V. Kishkurno and K.S. Subhanverdiev, “Estimation of an error of calculation of short-circuit currents in ac tractive circuit”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 1, pp. 5-10, 2017.
- [3] L.A. German, K.S. Subhanverdiev and A.S. Serebryakov, “Stend dlya rascheta tokov korotkogo замыкания v tyagovoj seti peremennogo toka [Stand for calculating short-circuit currents in AC traction network]”, Patent RU 2705517, Dec. 26, 2018 (in Russian).
- [4] E.P. Figurnov, Yu.I. Zharkov and N.A. Popova, “Equivalent circuits of the 27.5 kV electric railway external power supply system”, *Electricity*, no. 8, pp. 30-35, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-29-36.
- [5] Tyagovoe elektrosnabzhenie zheleznoj dorogi [Traction power supply of the railway], СП 224.132600.2014, Dec. 2014. Moscow: Techninform, 2019 (in Russian).
- [6] R.I. Karaev, S.D. Volobrinsky and I.N. Kovalev, *Elektricheskie seti i energosistemy [Electrical networks and power systems]*. Moscow: Transport, 1988 (in Russian).
- [7] German L.A. and Morozov D.A. *Raschet tipovykh zadach tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na EVM [Calculation of typical tasks of AC traction power supply on a computer]*. Moscow: МИИТ, 2010 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Н. Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Карпов Иван Петрович, старший электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории филиала ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State University of Railway Transport in N. Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Ivan P. Karpov, senior electrical engineer of the Railway electrotechnical laboratory of the Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply, Nizhny Novgorod, Russian Federation.