

## Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети с двухсторонним питанием

герман Л.А., серебряков А.С., лоскутов А.Б., осокин В.Л.,  
субханвердиев К.С.

*На примере питания тяговой сети от двух тяговых подстанций показана причина образования методической погрешности в расчетах токов короткого замыкания (КЗ). Отмечается, что в реальной схеме электроснабжения две смежные тяговые подстанции связаны по линиям 110(220) кВ взаимным сопротивлением, тогда как в схеме при проектировании такая связь отсутствует. На основании схемы, используемой при проектировании, сформирована новая схема замещения, в которой неизменной остается результирующая схема тягового электроснабжения. Преобразование исходной схемы позволило снять имеющуюся погрешность и сделать явным расчет напряжений при КЗ в тяговой сети. Показана справедливость замены симметричной трехфазной системы внешнего электроснабжения и тягового трансформатора однофазной схемой замещения при расчете токов двухфазного КЗ в тяговой сети. Доказана возможность замещения симметричной трехфазной сети однофазной как путем преобразования трехфазной схемы замещения, так и с помощью метода эквивалентного генератора. Установлено, что несмотря на различие фазных сопротивлений подстанций с трансформаторами со схемой соединения  $Y/\Delta$  и  $Y/Y$ , формулы для определения двухфазных токов КЗ будут одинаковыми.*

**Ключевые слова:** тяговая сеть, внешнее электроснабжение, короткое замыкание, схема замещения, расчет

**Методическая погрешность расчета токов короткого замыкания по нормативным документам.** Методы расчета токов короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети известны по работам [1–3]. В [1] представлена схема замещения, в которой при двухфазном КЗ рассматриваются фазные сопротивления системы внешнего электроснабжения и трансформатора в двух фазах, а тяговая сеть рассматривается единым сопротивлением, включающим контактную сеть, рельсы и сопротивление земли. Там же указано важное положение: «...Определение установившихся значений токов КЗ проводится при отсутствии на линии нагрузки. Для минимального тока КЗ этот случай является расчетным, наилучшим с точки зрения действия защиты. Для максимального тока этот случай соответствует замыканию на шинах подстанции, когда нагрузка спадает до нуля и может не учитываться». Указанная схема замещения в [1] практически являлась базовой для существующих руководящих указаний [4]. Схема [1] использована в учебнике [2] для расчета токов КЗ в тяговой сети, в котором подчеркивается, что сопротивление фазы трансформатора по схеме соединения  $Y/\Delta$  в 3 раза больше сопротивления фазы трансформатора при соединении  $Y/Y$ . В [3] предложена несколько другая схема замещения с рассмотрением в отдельности контактной сети, рельсового пути и токов в земле для расчета потенциала рельсов.

Итак, на основании [1, 2] реализована схема замещения [4], где для расчетов расширены типы контактных подвесок, уточнены параметры элементов тягового электроснабжения и исходя из

опыта эксплуатации уточнены расчетные режимы. В связи с отсутствием достоверных исходных данных на стадии проектирования входное сопротивление тяговых подстанций по системе внешнего электроснабжения (СВЭ) в [4] предложено определять их по мощности КЗ на шинах 110(220) кВ. В результате, к сожалению, формируется методическая погрешность в расчетах токов КЗ. О погрешности расчетов указано, в частности, в [5–8].

Покажем причину образования погрешности на примере схемы электроснабжения двух тяговых подстанций  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 1). В реальной схеме электроснабжения две смежные тяговые подстанции связаны по линиям 110 (220) кВ собственными сопротивлениями подстанций  $Z_2$  и  $Z_3$  и взаимным сопротивлением  $Z_1$ , как это показано на схеме (рис. 1,а). Однако при проектировании (рис. 1,б) такая связь игнорируется: включают только собственные узловые сопротивления  $Z_{кз1}$  и  $Z_{кз2}$ , определенные по расчетной мощности КЗ, а взаимное сопротивление  $Z_1$  отсутствует. Другими словами: питание двух смежных тяговых подстанций проводится от двух независимых линий. В результате, схемы электроснабжения (реальная и проектная) получаются различными, а это ведет к методической погрешности в расчетах, которая увеличивается при удалении тяговых подстанций от питающего центра (от районной подстанции).

При мощности КЗ 1000–2000 МВА погрешность расчета не превышает 10%, тогда как при мощности КЗ в 300–500 МВА токи КЗ в тяговой сети по [4] превышают реальные значения на 30–40% и более.

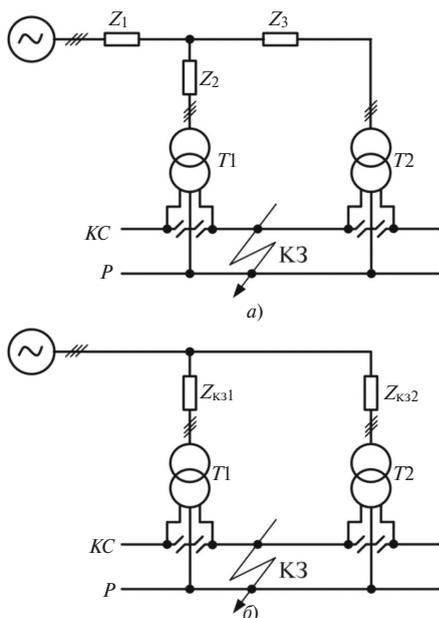


Рис. 1. Схема электроснабжения двух тяговых подстанций: *KC* – контактная сеть; *P* – рельсы

**Формирование новой схемы замещения.** Новая схема замещения формируется на основании известной схемы из [4]. Остается неизменной схема замещения тягового электроснабжения (рис. 2,а), выраженная трехлучевой схемой тяговой сети с эквивалентными индуктивно развязанными сопротивлениями  $Z_{T,cA}$ ,  $Z_{T,cB}$ ,  $Z_{AB}$  (методы расчетов параметров даны в [4]), которые включают сопротивления контактной сети и рельсов с учетом тока в земле и сопротивления трансформаторов  $Z_{TpA}$  и  $Z_{TpB}$  двух смежных тяговых подстанций *A* и *B*. Эти сопротивления определяются по ГОСТ [9]:

$$Z_{TpA(B)} = \frac{u_K U_{НОМ}^2}{100 S_{Tp}},$$

где  $u_K$  – напряжение короткого замыкания, %;  $S_{Tp}$  – номинальная мощность тягового трансформатора, МВА;  $U_{НОМ}$  – номинальное напряжение тяговой обмотки, кВ.

Сопротивления системы внешнего электроснабжения  $Z_{c(A)}$  ( $Z_{c(B)}$ ) определяются по мощности КЗ  $S_{KЗ}$  (МВА) на шинах 110(220) кВ подстанции [4, 9]:

$$Z_{cA(B)} = X_{cA(B)} = U_6^2 / S_{KЗ},$$

где  $U_6$  – базисное напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора ( $U_6 = U_{НОМ}$ ), кВ.

Сопротивление тяговой подстанции

$$Z_{пA} (Z_{пB}) = Z_{TpA(B)} + Z_{cA(B)}.$$

В [4] приведены данные для следующих видов тяговой сети:

ТП, включающая несущий трос, контактный провод, рельсовый путь;

ТПУ, где ТП дополнена усиливающим проводом;

ТПУЭ (ЭУП), включающая несущий трос, контактный провод, усиливающий провод и экранирующий (обратный) провод.

В схеме замещения учтены переходные сопротивления «контактная сеть–земля», сопротивление дуги, сопротивление троса группового заземления.

Преобразование исходной схемы замещения (рис. 2,а) начинается с переноса двух равных ЭДС тяговых подстанций  $U_{A,рас}$  и  $U_{B,рас}$  – в эквивалентную ЭДС  $U_{AB,рас}$  (рис. 2,б). Далее добавляется сопротивление  $Z_{cAB}$  в схему замещения системы внешнего электроснабжения (СВЭ) (рис. 2,в). Тем самым в схему замещения вводится узловое взаимное сопротивление, что снимает методическую погрешность в расчетах и делает определенным расчет напряжений при КЗ на вводах 27,5 кВ тяговых подстанций. Совершенно ясно, что при проектировании новой электрификации, как правило, отсутствуют данные по  $Z_{cAB}$ . Поэтому на первом этапе необходимо выполнять расчет по [4], а затем на втором этапе повторять расчет по новой схеме замещения, учитывающей параметры СВЭ работающего электрифицированного участка.

При необходимости в новую схему замещения можно ввести цепи подключения электроподвижного состава и цепь уравнивающего тока.

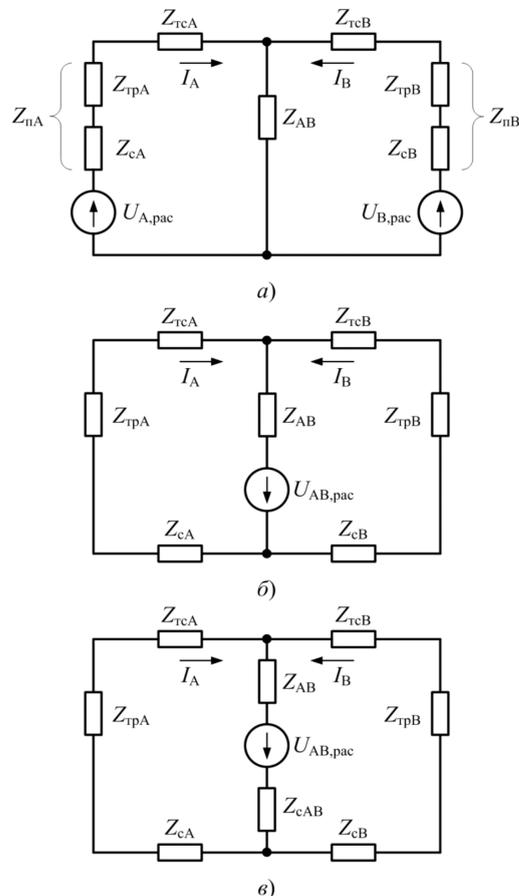


Рис. 2. Формирование новой схемы замещения

**Справедливость замены трехфазной линии системы СВЭ и трансформатора однофазной схемой замещения при расчете токов КЗ в тяговой сети.** Справедливость применения однофазных схем замещения для расчета переходных процессов при несимметричных режимах была обоснована в [10]. Покажем ещё варианты замены симметричной трехфазной СВЭ и трансформатора однофазной схемой замещения (рис. 3) при расчете токов двухфазного КЗ в тяговой сети, как это сделано в [4]. Причем, несмотря на то, что новая схема замещения (см. рис. 2,в) справедлива для схем трансформаторов Y/Δ и Y/Y, формирование однофазной схемы будет выполняться раздельно: для трансформатора по схеме Y/Δ, а затем – Y/Y.

Введем следующие обозначения для сопротивления фазы (рис. 3 и 4):  $Z_{тр.ф\Delta}$  – сопротивление фазы тягового трансформатора Y/Δ;  $Z_{тр.фY}$  – то же для Y/Y;  $Z_{с.ф\Delta}$  – сопротивление фазы СВЭ, приведенное к схеме Y/Δ трансформатора [11,12];  $Z_{с.фY}$  – сопротивление фазы СВЭ, приведенное к схеме Y/Y трансформатора;  $Z_{т.с.з}$  – сопротивление тяговой сети с учетом переходного сопротивления в месте КЗ.

Фазные ЭДС  $E_A, E_B, E_C$  обмотки «треугольник» равны линейным напряжениям на шинах 27,5 кВ в режиме холостого хода. Для симметричной системы  $E_A = E_B = E_C$ .

Выполнив последовательно преобразования по рис. 3 (от схемы а к схемам б и в), получим однофазную схему замещения (рис. 3,в), где  $E_A$  – ЭДС, равная линейному напряжению между выводами а и с. Принимая для упрощения  $Z_{т.с.з} = 0$ , определим сопротивление подстанции при КЗ на выводах 27,5 кВ трансформатора (рис. 3,б):

$$Z_{\Pi} = \frac{Z_{\Phi\Delta} 2Z_{\Phi\Delta}}{Z_{\Phi\Delta} + 2Z_{\Phi\Delta}} = \frac{2}{3} Z_{\Phi\Delta}.$$

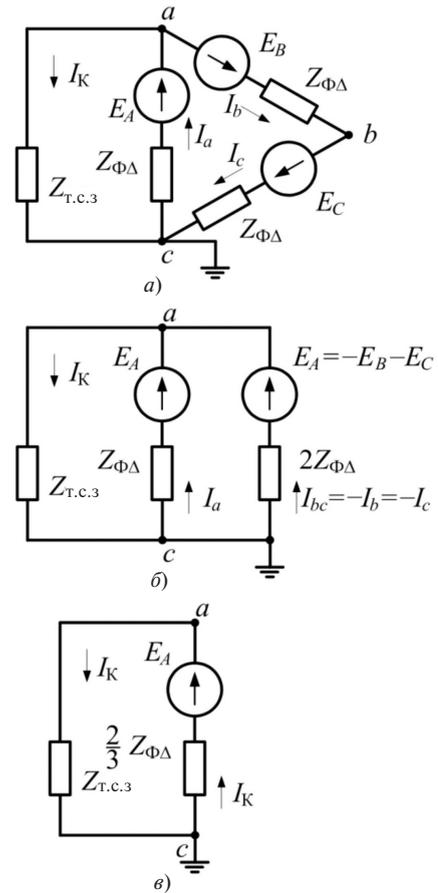
Итак, получено сопротивление подстанции для расчета двухфазного тока КЗ тяговой сети с представлением тягового трансформатора по схеме замещения Y/Δ.

Если же представить схему замещения трансформатора по схеме Y/Y (рис. 4), то сопротивление подстанции для расчета двухфазного тока КЗ равно

$$Z_{\Pi} = 2Z_{\Phi Y}. \tag{4}$$

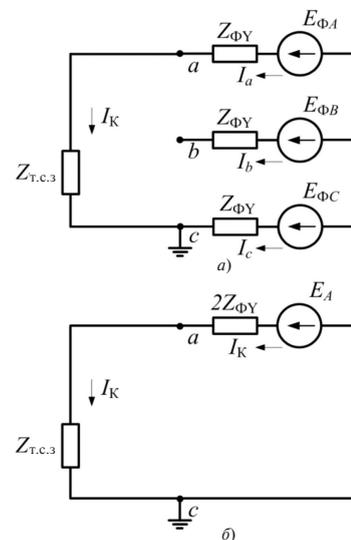
В симметричной системе фазное напряжение холостого хода в схеме замещения трансформатора Y/Y  $E_{\Phi A} = E_{\Phi B} = E_{\Phi C} = E_{\Phi A} / \sqrt{3}$ . Учитывая, что сопротивление фазы трансформатора в схеме замещения Y/Y будет в 3 раза меньше, чем в схеме Y/Δ [2], т.е.

$$E_{\Phi Y} = E_{\Phi\Delta} / 3,$$



**Рис. 3.** Схема замещения тяговой подстанции: а – при двухфазном КЗ с трансформатором со схемой Y/Δ; б, в – расчетные схемы

то получается, что сопротивления подстанции при двухфазных КЗ в тяговой сети при схемах соединения трансформатора Y/Δ и Y/Y одинаковые. Это значит, что при любой схеме замещения трансформатора (Y/Δ или Y/Y) формулы для определения двухфазных токов КЗ будут одинаковыми, несмотря на различие фазных сопротивлений.



**Рис. 4.** Схема замещения тяговой подстанции при двухфазном КЗ; а – трансформатор со схемой Y/Y; б – расчетная схема

Справедливость замены трехфазной сети в рассматриваемой задаче на однофазную для расчета двухфазного КЗ в тяговой сети покажем также с помощью метода эквивалентного генератора. При двухфазном КЗ в тяговой сети независимо от того, как представлять вторичную обмотку тягового трансформатора – соединенной треугольником или звездой, тяговый трансформатор, получающий питание от трехфазной системы внешнего электроснабжения может быть представлен по отношению к тяговой сети эквивалентным однофазным генератором. Параметры этого эквивалентного генератора определяются из режима холостого хода и короткого замыкания. В частности, ЭДС равна номинальному напряжению  $U_{НОМ}$  на выводах тягового трансформатора, т.е. напряжению на выводах трансформатора в режиме холостого хода. Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора, равное сопротивлению подстанции  $Z_{П}$ , равно:

$$Z_{П} = 2 \left( \frac{u_{к} U_{НОМ}^2}{100 S_{тр}} + \frac{U_6^2}{S_{кз}} \right) = 2(Z_{тр.фY} + Z_{сфY}) =$$

$$= \frac{2}{3} \left( \frac{3u_{к} U_{НОМ}^2}{100 S_{тр}} + \frac{3U_6^2}{S_{кз}} \right) = \frac{2}{3} (Z_{тр.ф\Delta} + Z_{сф\Delta}).$$

Если учесть [2], как было указано, что  $Z_{тр.ф\Delta} = 3Z_{тр.фY}$  и  $Z_{сф\Delta} = 3Z_{сфY}$ , то внутреннее сопротивление эквивалентного генератора будет одним и тем же независимо от принятой схемы соединения обмоток трансформатора. Таким образом, если тяговую подстанцию представить по отношению к тяговой сети однофазным эквивалентным генератором, то ток КЗ в тяговой сети будет один и тот же независимо от схемы соединения тяговой обмотки.

Таким образом, доказана возможность замещения схемы симметричной трехфазной сети для расчета двухфазных токов КЗ в тяговой сети переменного тока схемой однофазной сети, что много десятилетий успешно используется в расчетах [4]).

Расчеты авторов показывают, что мощность, развиваемая однофазным эквивалентным генератором при коротком замыкании, точно такая же, как и мощность, генерируемая трехфазной системой внешнего электроснабжения. Кроме того, потери мощности в питающих линиях и в трансформаторе будут одни и те же, независимо от того, как рассчитывали токи КЗ: по трехфазной схеме с трансформатором Y/Δ или по трехфазной схеме с трансформатором Y/Y, или по однофазной схеме замещения.

**Выводы.** 1. Существующая методика расчета токов КЗ [4] имеет методическую погрешность в связи с тем, что питание смежных тяговых подстанций представляется в схеме замещения от независимых

(не связанных между собой) источников питания, что, как правило, отличается от реальных схем.

2. Предложенная новая схема замещения для расчета токов КЗ отличается тем, что в схеме внешнего электроснабжения тяговых подстанций добавлено взаимное узловое сопротивление, которое повышает точность распределения токов КЗ.

3. Допустимо применение однофазной схемы замещения в расчетах двухфазных токов КЗ в схеме электроснабжения с симметричными трехфазными сетями 110(220) кВ и однофазными тяговыми сетями с использованием теории эквивалентного генератора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучма К.Г., Марквардт Г.Г., Пупынин В.Н. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети. М.: Трансжелдориздат, 1960, 260 с.
2. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965, 464 с.
3. Косарев Б.В., Зельвянский Я.А., Сибаров Ю.Г. Электробезопасность в системе электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1983, 200 с.
4. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005, 216 с.
5. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Методика расчета токораспределения в тяговой сети переменного тока. – Вестник ВНИИЖТ, 2017, № 6, с. 329–335.
6. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Анализ токораспределения в тяговых сетях переменного тока при их двухстороннем питании и учете сопротивления системы внешнего электроснабжения. – ЭЭТ, 2018, № 1, с. 8–13.
7. Герман Л.А., Кишкурно К.В. Сравнение методов расчёта системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети. – Вестник ВНИИЖТ, 2013, № 1, с. 16–21.
8. Алексеев Е.А., Булатов Ю.Н., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2016, 169 с.
9. 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.
10. Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957, 344 с.
11. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Трансформаторы. М.: Энергия, 1974, 240 с.
12. Серебряков А.С. Трансформаторы: Учебное пос. М.: Издат. дом МЭИ, 2014, 360 с.

[12.11.2018]

*Авторы: Герман Леонид Абрамович окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) в 1959 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и практика совершенствования системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Профессор кафедры Филиала Самарского государственного университета путей сообщения (Н. Новгород).*

*Серебряков Александр Сергеевич окончил Нижегородский государственный университет (НГГУ) им. Р.Е. Алексеева в 1961 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». Профессор кафедры Нижегородского государственного инженерно-экономического университета.*

**Лоскутов Алексей Борисович** окончил Горьковский политехнический институт в 1976 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Повышение эффективности систем электроснабжения электро-технологических установок». Заведующий кафедрой НГТУ.

**Осокин Владимир Леонидович** окончил Нижегородскую государственную сельскохозяйственную академию в 1998 г. В 2011 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение эффективности функцио-

нирования электрических подогревателей воды путем разработки стенда для их тестирования». Заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического университета.

**Субханвердиев Камил Субханвердиевич** окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) в 2012 г. Инженер I категории Проектно-изыскательского института электрификации железных дорог и энергетических установок «Трансэлектропроект».

*Elektrichestvo*, 2019, No. 5, pp. 19–23

DOI:10.24160/0013-5380-2019-5-19-23

## Calculation of Short-Circuit Fault Currents in an Electric Traction Network with Double Ended Power Supply

**GERMAN Leonid A.** (Branch of the Samara State University of Railway, N. Novgorod, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**SEREBRYAKOV Alexandr S.** (N. Novgorod State Engineer-Economic University (NNSEEU), Knyaguinino, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**LOSKUTOV Aleksey B.** (N. Novgorod State Technical University, N. Novgorod, Russia) – Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

**OSOKIN Vladimir L.** (NNSEEU, Knyaguinino, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**SUBKHANVERDIYEV Kamil' S.** («Transelektroproyekt», Moscow, Russia) – Engineer

A source of methodical error in calculations of short-circuit (SC) fault currents is shown on the example of an electric traction network that takes power supply from two traction substations. It is pointed out that in a real power supply arrangement, two adjacent traction substations are connected via a mutual impedance by the 110 (220) kV power lines, whereas in the design analysis circuit there is no such connection. Based on the analysis circuit used in designing, a new equivalent circuit was drawn, in which the resulting traction power supply arrangement remains unchanged. The modification of the initial circuit made it possible to eliminate the existing error and make the calculation of voltages under SC fault conditions in the traction network to be explicit in nature. The validity of replacing the symmetrical three-phase external power supply system and traction transformer by a single-line equivalent circuit in calculating the two-phase SC fault currents in the traction network is shown. The possibility of replacing a symmetrical three-phase network by a single-phase network both by transforming the three-phase equivalent circuit and using the equivalent generator method is proven. It is found that, despite the difference between the phase impedances of substations containing transformers with the Y/Δ and Y/Y winding connection schemes, the formulas for determining two-phase SC fault currents will be the same.

**Key words:** electric traction network, external power supply, short-circuit fault, equivalent circuit, calculation

### REFERENCES

1. **Kuchma K.G., Marquardt G.G., Pupynin V.N.** *Zashchita ot tokov korotkogo замыкания в контактной сети* (Protection from short-circuit fault currents in a contact system). Moscow, Transzheldorizdat, 1960, 260 p.
2. **Marquardt G.G.** *Energosnabzheniye elektricheskikh zheleznikh dorog* (Railway electrical power supply systems). Moscow, Transport, 1965, 464 p.
3. **Kosarev B.V., Zel'vyanskiy Ya.A., Sibarov Yu.G.** *Elektrobezopasnost' v sisteme elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* (Electrical safety in the railway transport electric power supply system). Moscow, Transport, 1983, 200 p.
4. **Rukovodyashchiye ukazaniya po releyroy zashchite sistem tyagovogo elektrosnabzheniya** (Guidelines for relay protection of traction electric power supply systems). Moscow, TRANSIZDAT, 2005, 216 p.
5. **Kosarev A.B., Kosarev B.I.** *Vestnik VNIIZhT – in Russ.* (Bulletin of All Russian Sciences Institute of Railway), 2017, No. 6, pp. 329–335.
6. **Kosarev A.B., Kosarev B.I.** *Elektrotehnika i Elektrooborudovaniye transporta – in Russ.* (Electrical Engineering and Electrical Equipment of Transport), 2018, No. 1, pp. 8–13.
7. **German L.A., Kishkurmo K.V.** *Vestnik VNIIZhT – in Russ.* (Bulletin All Russian Sciences Institute of Railway), 2013, No. 1, pp. 16–21.
8. **Alekseyenko Ye.A., Bulatov Yu.N., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.** *Modelirovaniye avariynykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznikh dorog* (Modeling of emergency operating conditions in railway electric power supply systems). Irkutsk, Irkutsk State University of Railway, 2016, 169 p.
9. **GOST 52719-2007.** *Natsional'nyi standart RF. Korotkiye замыкания в электростановках. Metody rascheta v elektростановках peremennogo toka napryazheniyem syvshe 1 kV* (GOST R 52735-2007: National Standard of the Russian Federation. Short-circuits in electrical installations. Calculation methods in alternating current electrical installations with voltage above 1 kV). Moscow, Standartinform, 2007, 36 p.
10. **Atabekov G.I.** *Teoreticheskiye osnovy releyroy zashchity vysokovol'tnykh setey* (Theoretical principles of relay protection for high-voltage networks). Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1957, 344 p.
11. **Petrov G.N.** *Elektricheskiye mashiny. V 3-kh chastyakh. Transformatory* (Electrical machines. In 3d parts. Transformers). Moscow, Energiya, 1974, 240 p.
12. **Serebryakov A.S.** *Transformatory* (Transformers). Moscow, Publ. House MEI, 2014, 360 p.

[12.11.2018]