

УДК 621.3.064

А.С. Серебряков ¹, Л.А. Герман ¹, В.Л. Осокин ²

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ПИТАНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

¹ Московский государственный университет
путей сообщения Императора Николая II

² Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет

Для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления современными электротехническими комплексами важной задачей является теоретическое обоснование основных положений и соотношений, не имеющих однозначного решения. Статья посвящена вопросам определения токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Информация о количественных соотношениях при возникновении короткого замыкания необходима для разработки систем быстрого обнаружения и ликвидации аварийного режима. Показано, что при составлении схем замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока, получающих питание по двум линиям от одной системы внешнего электроснабжения, необходимо учитывать взаимное сопротивление. Это позволяет оценить влияние тока короткого замыкания одной смежной подстанции на ток другой подстанции. Приведена система уравнений для определения параметров схемы замещения для расчета токов короткого замыкания в межподстанционной зоне по двум опытам короткого замыкания на шинах смежных подстанций. Представлена схема замещения, позволяющая по соотношению токов питающих линий смежных подстанций определить удаленность места повреждения от питающих подстанций.

Ключевые слова: межподстанционная зона, однолинейная схема замещения, релейная защита, соединение обмоток трансформатора, ток короткого замыкания, тяговая сеть переменного тока.

1. Введение

Эффективность систем электроснабжения потребителей электроэнергии в современных условиях можно повысить за счет широкого внедрения автоматизированных систем управления, основанных на цифровых информационных технологиях. Проблема интеллектуализации и внедрения оптимального управления в системе электроснабжения, включая цифровую защиту и автоматику, требует надежного теоретического обоснования основных положений, на которых строятся управляющие системы.

Следует признать, что в настоящее время еще многие из указанных вопросов не решены до конца.

В частности, среди специалистов до сих пор нет однозначного решения и теоретического обоснования выбора уставок релейной защиты на первичной и вторичной стороне трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y/D-11. Нет обоснования правомочности преобразования схем соединения обмоток трансформатора из треугольника в звезду при несимметричной нагрузке или коротком замыкании.

Цель настоящей статьи – дать теоретическое обоснование основных соотношений, необходимых для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления трансформаторными подстанциями и их защиты. Эти же теоретические обоснования могут лечь в основу информационных систем распознавания режима электрической сети и обнаружения предаварийного режима.

II. Постановка проблемы

Схема соединений обмоток трансформаторов Y/D-11 применяется для питания участков железной дороги, электрифицированной на переменном токе напряжением 25 кВ [1-5]. От этих же трансформаторов может получать электрическую энергию и тяговая нагрузка, в том числе расположенные рядом с железной дорогой ремонтные заводы, а также сельскохозяйственные потребители электроэнергии. Наиболее опасными для тяговых трансформаторов в эксплуатации являются аварийные режимы, вызванные короткими замыканиями (КЗ) [1, 3]. Чаще всего они происходят при замыкании контактного провода на рельс. Для разработки систем быстрого обнаружения и ликвидации КЗ необходимо исследовать количественные соотношения при возникающих аварийных режимах. Вначале обратимся к нормативным документам по указанным вопросам.

В руководящих указаниях по релейной защите [6, 7] систем тягового электроснабжения приведена расчетная схема питания тяговой сети на участке электрифицированной железной дороги переменного тока от двух смежных тяговых подстанций A и B при коротком замыкании в межподстанционной зоне (рис. 1), когда в результате повреждения контактная сеть соединяется с рельсовой сетью. По этой схеме рассчитывается ток короткого замыкания I_K и токи короткого замыкания питающих линий I_{KA} и I_{KB} подстанций A и B , по значению которых определяют уставки релейной защиты. По умолчанию предполагается, что силовые тяговые трансформаторы на тяговых подстанциях A и B получают питание от двух независимых, т.е. не связанных между собой систем внешнего электроснабжения с напряжениями U_{0A} и U_{0B} [6, 7]. В действительности же питание смежных тяговых подстанций может осуществляться на практике по раз-

личным схемам, но, как правило, по двум линиям электропередачи с двухсторонним питанием [1-3, 7-10].

III. Определения параметров схемы замещения

В качестве примера рассмотрим теоретическое обоснование определения параметров элементов схемы замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, когда смежные тяговые подстанции получают питание от опорной тяговой или сетевой подстанции двумя линиями электропередачи с двухсторонним питанием (рис. 2).

В этом случае опорная подстанция и система внешнего электроснабжения эквивалентруется источником питания с напряжением U_0 . В качестве тяговых трансформаторов используют трехобмоточные трехфазные трансформаторы 110/27,5 кВ с соединением тяговой обмотки в треугольник. Третья обмотка тягового трансформатора, используемая для питания нетяговых потребителей, на схеме не показана.

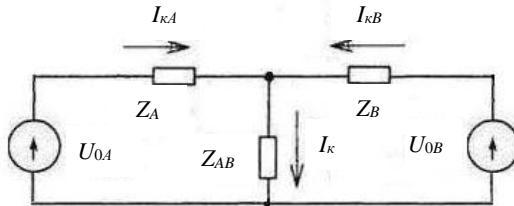


Рис. 1. Схема замещения тяговой сети по нормативным документам

Сначала обоснуем возможность представить при двухфазном коротком замыкании трехфазную схему питания в виде однолинейной схемы, как это сделано на рис. 2. Особенностью представленной однолинейной схемы является то, что в последовательно включенных элементах одной и той же ветви действуют разные системы токов. В однофазных элементах токи текут по одному проводу, а в трехфазных элементах – по трем проводам. Возникает вопрос, можно ли на однолинейной схеме так включать указанные элементы. При обосновании не будем учитывать тяговые нагрузки в рассматриваемой межподстанционной зоне и смежных межподстанционных зонах, как это принято в нормативных документах. С учетом указанных допущений короткое замыкание в межподстанционной зоне следует рассматривать как двухфазное короткое замыкание тяговой сети при питании от смежных тяговых трансформаторов.

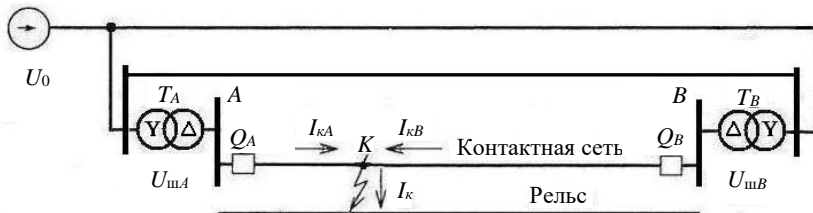


Рис. 2. Схема питания тяговой сети от одной системы внешнего электроснабжения с двухсторонним питанием

Рассмотрим сначала короткое замыкание в одном плече тяговой подстанции или в одной фидерной зоне, когда нагрузка в другом плече, как уже было указано выше, отсутствует.

При условии, что намагничивающие токи трансформатора равны нулю и в первичной и вторичной обмотках, соединенных по схеме Y/D отсутствуют токи нулевой последовательности, на каждом стержне магнитопровода трансформатора, т.е. в каждой фазе должно существовать равенство первичной и вторичной магнитодвижущей силы (МДС). Это значит, что для приведенного трансформатора должно существовать равенство первичных и вторичных токов в каждой фазе [4, 11, 12]. Другими словами, каждая фаза будет работать независимо. Действительно, как указано в [12], при наличии одной из обмоток, соединенной в треугольник, центр звезды фазных напряжений другой обмотки, соединенной в звезду, совпадает с центром тяжести треугольника линейных напряжений. Токи нулевой последовательности в обмотку, соединенную треугольником, из других обмоток не трансформируются. Следовательно, сумма мгновенных токов в ней равна нулю и каждая фаза его работает независимо. Схема замещения тягового трансформатора и расчетные схемы при двухфазном коротком замыкании и одностороннем питании электрифицированного участка железной дороги приведены на рис. 3. Приведенные к напряжению тяговой сети фазные сопротивления $Z_{ФС}$ питающей линии перенесены во вторичную обмотку тягового трансформатора и включены последовательно с фазным сопротивлением короткого замыкания трансформатора $Z_{ФК}$. Таким образом, в каждой фазе вторичной обмотки трансформатора будет включено сопротивление:

$$Z_{ФКС} = Z_{ФК} + Z_{ФС}. \quad (1)$$

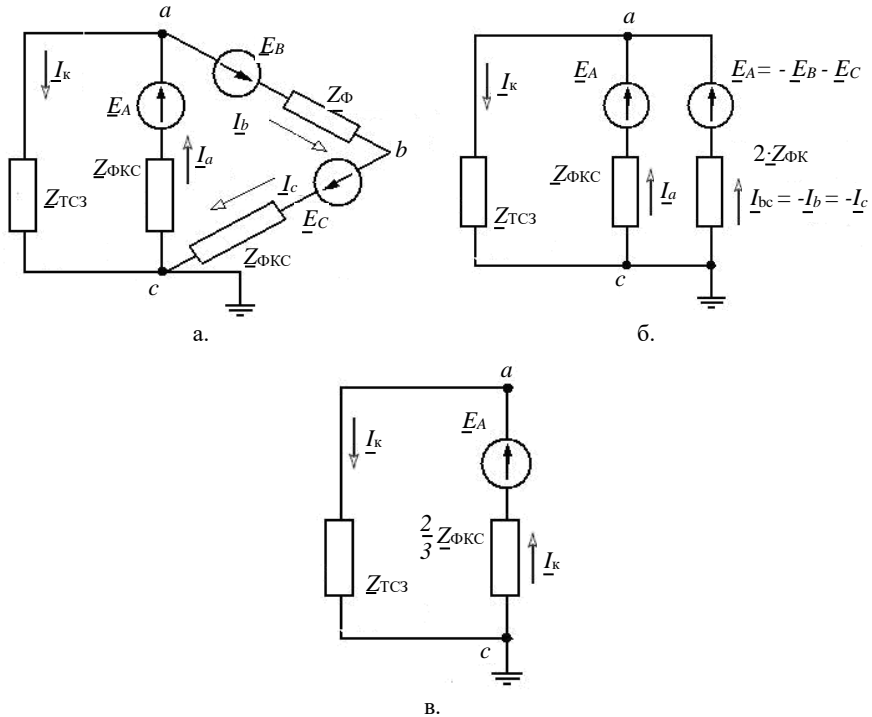


Рис. 3. Схема замещения тягового трансформатора при двухфазном коротком замыкании и одностороннем питании электрифицированного участка железной дороги (а), промежуточная (б) и окончательная (в) расчетные схемы

При двухфазном замыкании на выводах тяговой обмотки (рис. 3) одна фаза a обмотки оказывается соединенной параллельно с двумя соединенными последовательно фазами b и c этой же обмотки. В обеих ветвях действуют одинаковые по модулю и фазе источники ЭДС, поскольку $E_A = -E_B - E_C$. Но при этом сопротивления ветвей разные: сопротивление одной ветви (одной фазы трансформатора и одной фазы питающей линии) – $Z_{\Phi\text{КС}}$, а другой в два раза больше, т.е. $2 \cdot Z_{\Phi\text{КС}}$. Следовательно, при соединении вторичной обмотки трансформатора треугольником и двухфазном коротком замыкании ток в обмотке трансформатора протекает по двум параллельным ветвям: в «своей фазе» ax протекает фазный ток, равный $I_k \cdot 2/3$, а в двух других последовательно соединенных фазах by и cz – одинаковый ток $I_k \cdot 1/3$. Таким образом, эквивалентное внутреннее сопротивление Z_{Π}

тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании и соединении тяговой обмотки в треугольник согласно рис. 3 будет равно:

$$Z_{\Pi} = \frac{Z_{\text{ФКС}} \cdot 2 \cdot Z_{\text{ФКС}}}{Z_{\text{ФКС}} + 2 \cdot Z_{\text{ФКС}}} = \frac{2}{3} \cdot Z_{\text{ФКС}} = \frac{2}{3} \cdot Z_{\text{Ф}\Delta} . \quad (2)$$

Формулу (2) для внутреннего сопротивления Z_{Π} тяговой подстанции можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} Z_{\Pi} &= \frac{2}{3} \cdot Z_{\text{Ф}\Delta} = \frac{2}{3} \cdot (Z_{\text{ФТ}\Delta} + Z_{\text{ФС}\Delta}) = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{3 \cdot U_{\text{К}} \% \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{Н}} \cdot n} + \frac{3 \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{С}}} \right] = 2 \cdot (Z_{\text{ФТГ}} + Z_{\text{ФСГ}}) . \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $Z_{\text{ФТГ}}$ и $Z_{\text{ФСГ}}$ – расчетные фазные сопротивления обмотки трансформатора и питающей линии системы внешнего электроснабжения в предположении, что вторичная обмотка эквивалентного тягового трансформатора соединена звездой.

Умножение на коэффициент два фазного сопротивления при соединении вторичной обмотки звездой или умножение на $2/3$ при соединении вторичной обмотки треугольником в формуле (3) есть не что иное, как переход к однофазной схеме. Умножение на коэффициент 2 в формуле (3) вместо коэффициента $2/3$ означает, что по умолчанию схема соединения вторичной обмотки преобразуется из треугольника в звезду.

Поскольку во втором смежном трансформаторе будут точно такие же соотношения, то токи в каждой одноименной фазе и токи в однолинейной схеме можно для каждого узла складывать и вычитать в комплексной форме. Для однофазной и однолинейной схем будут выполняться законы Кирхгофа, что облегчает расчет и позволяет пользоваться однолинейной схемой замещения, показанной на рис. 4, а [9].

Если известны значения сопротивлений, указанных на схеме, то расчет токов КЗ производится по известным правилам. Если же точные значения сопротивлений не известны, то их можно определить из двух опытов короткого замыкания. В первом опыте измеряются токи $I_{\text{кА}}$ (А) и $I_{\text{кВ}}$ (А) питающих линий на подстанциях А и В при коротком замыкании на шинах подстанции А (рис. 5, а), а во втором опыте измеряют токи $I_{\text{кА}}$ (В) и $I_{\text{кВ}}$ (В) при замыкании на шинах подстанции В (рис. 5, б). Чтобы уменьшить число определяемых опытным путем параметров схемы, ее следует предварительно упростить: сначала в соответствии с рис. 4, б, преобразовав треугольник сопротивлений $Z_{\text{П}\Delta}$, $Z_{\text{ПВ}}$ и $Z_{\text{П}\Delta\text{В}}$ в звезду сопротивлений $Z_{\text{А}}$,

Z_B и Z_C , а затем – в соответствии с рис. 4, в, сопротивления Z_0 , Z_C одним сопротивлением Z_1 . Окончательные упрощенные схемы при поочередном коротком замыкании на шинах подстанции A и B приведена на рис. 5. На рис. 4 сопротивление $Z_4 = Z_{TCA} + Z_{TCB}$ представляет собой сопротивление тяговой сети межподстанционной зоны.

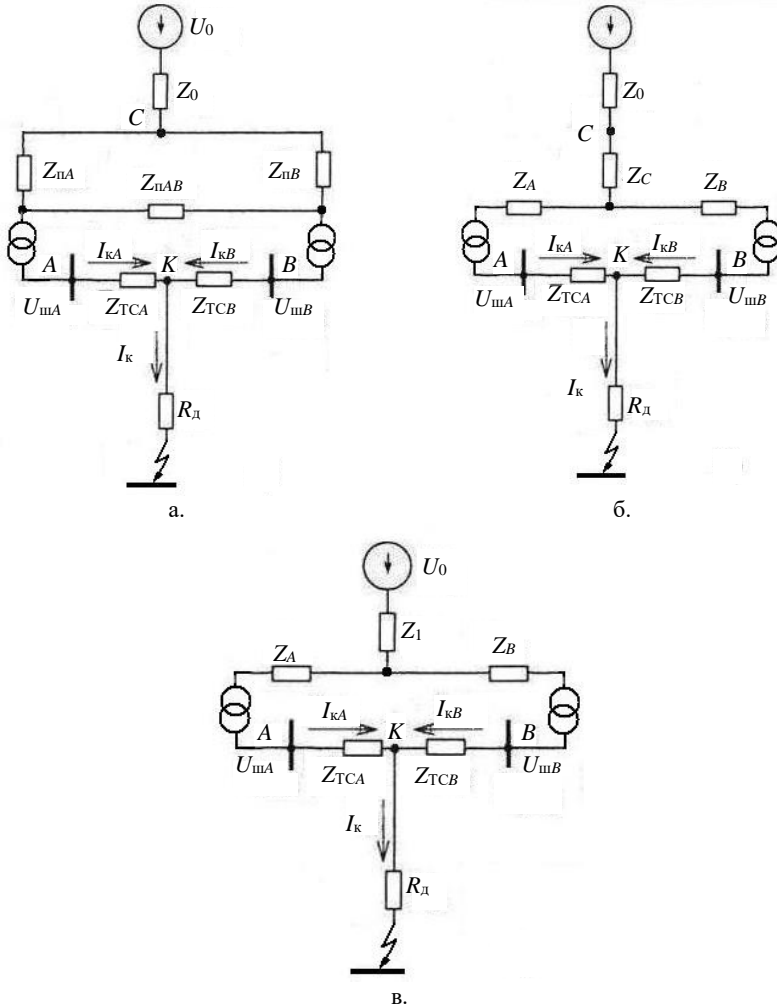
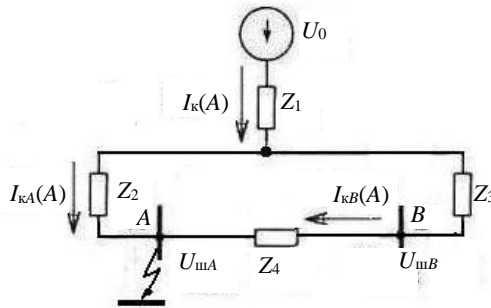


Рис. 4. Преобразование схемы питания при коротком замыкании в межподстанционной зоне

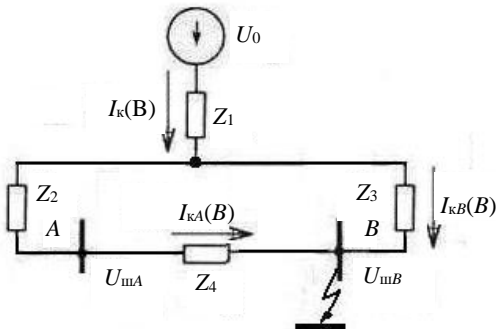
Для двух схем на рис. 5 составим следующую систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} I_{\kappa}(A) & I_{\kappa A}(A) & 0 & 0 \\ I_{\kappa}(A) & 0 & I_{\kappa B}(A) & I_{\kappa B}(A) \\ I_{\kappa}(B) & I_{\kappa A}(B) & 0 & I_{\kappa A}(B) \\ 0 & I_{\kappa A}(B) & -I_{\kappa B}(B) & I_{\kappa A}(B) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_0 \\ U_0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Решая уравнение (4), получим выражения для определения значений искомых сопротивлений. Зная их, можно рассчитать ток короткого замыкания в любой заданной точке схемы. Отметим, что по соотношению токов короткого замыкания $I_{\kappa A}$ и $I_{\kappa B}$ можно рассчитать и удаленность от подстанций A и B места произошедшего повреждения, что ускорит его обнаружение и ликвидацию.



а.



б.

Рис. 5. Упрощенные схемы при коротком замыкании на шинах подстанции A (а) и B (б)

Отметим следующие замечания по расчетам.

1. Приведенные расчеты взаимного сопротивления приведены для одной энергосистемы, питающие две смежные подстанции. Если же эти подстанции питаются от разных энергосистем, то расчеты токов КЗ следует выполнять отдельно для каждой энергосистемы.

2. Взаимное сопротивление можно определять на действующей подстанции и по методике [10].

IV. Выводы

1. При составлении схем замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока, получающих питание по двум линиям от одной системы внешнего электроснабжения, необходимо учитывать в этих схемах так называемое взаимное сопротивление, поскольку с его помощью можно учесть влияние тока короткого замыкания одной смежной подстанции на ток другой подстанции.

2. Расчет взаимного сопротивления по питающим линиям 110 (220) кВ позволяет уточнить расчеты релейной защиты тяговых сетей.

3. Представленная схема для расчета токов короткого замыкания в межподстанционной зоне тяговой сети позволяет по соотношению токов определить в этой зоне удаленность места повреждения от питающих подстанций, что ускоряет его обнаружение и сокращает перерыв в питании потребителей первой категории.

© Серебряков А.С., 2018

© Герман Л.А., 2018

© Осокин В.Л., 2018

Библиографический список

- [1] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 528 с.
- [2] Бей Ю.М. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986. – 319 с.
- [3] Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [4] Марквардт Г.Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе электроснабжения. М.: Транспорт, 1972. – 224 с.
- [5] Косарев А.Б. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 329-334.
- [6] Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2005. – 216 с.
- [7] 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».
- [8] Герман Л.А. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменных токов при учете внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 3. С. 17-23.

- [9] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 1. С. 16-21.
- [10] Герман Л.А. Способ определения узлового взаимного сопротивления в тяговой сети железных дорог. Пат. 23967077 РФ, опубл. 20.08.2001.
- [11] Серебряков А.С. Трансформаторы. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 360.
- [12] Петров Г.Н. Электрические машины. В 3 – х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. М.: Энергии, 1974. – 240 с.

A.S. Serebryakov ¹, L.A. German ¹, V.L. Osokin ²

**DETERMINATION OF EQUIVALENT CIRCUIT
PARAMETERS FOR SHORT CURRENTS CALCULATION
WITH TWO-WAY SUPPLY OF CONSUMERS**

¹ Nizhny Novgorod branch of Moscow State University of Railway Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod Engineering-economic State University
Knyaginino, Russia

Abstract. An important task for the information support of intelligent control systems of modern electrotechnical complexes is the theoretical substantiation of the main propositions and relations that do not have an unambiguous solution. The article is devoted to the issues of determining short circuit currents in the alternating current (AC) traction network. Information about the quantitative ratios in the event of a short circuit is necessary for the development of systems for rapid detection and elimination of emergency mode. It is shown that it is necessary to take into account the mutual resistance when drawing up equivalent circuits for calculating short circuit currents in AC traction networks that receive power from two lines from one external power supply system. This makes it possible to evaluate the influence of the short circuit current of one adjacent substation on the current of another substation. The system of equations for determining the parameters of the equivalent circuit for calculating short circuit currents in the inter-substation zone using two short circuit tests on buses of adjacent substations is presented. A replacement scheme is presented, which allows determining the distance of the damage site from the supplying substations by the ratio of the currents of the supply lines of adjacent substations.

Keywords: connection of transformer windings, interstation zone, relay protection, short circuit current, single-line equivalent circuit, traction network of alternating current.

References

- [1] K.G. Marquardt, Power supply of electrified railways. Moscow: Transport, 1983, P. 528.
- [2] Yu.M. Bei, Traction substation. Moscow: Transport, 1986, P. 319.
- [3] E.P. Figurnov, Relay protection. Moscow: UMTs ZhDT, 2009, P. 604.
- [4] G.G. Marquardt, The application of probability theory and computing technology in the power supply system. Moscow: Transport, 1972, P. 224.
- [5] A.B. Kosarev, «The method of calculating the current distribution in the AC traction networks», Vestnik of the Railway Research Institute, T. 76, no. 6, pp. 329-334, 2017.
- [6] Guidelines for relay protection of traction power supply systems. Moscow: TRANSIZDAT, 2005, P. 216.
- [7] STO Railways 07.021.4-2015 «Protection of power supply systems of the railway against short circuits and overload. Part 4. Methodology for selecting protection settings in the AC traction power supply system».
- [8] L.A. German, «Calculations of short circuit currents in the traction network of alternating currents when accounting for external power supply», Electronics and electrical equipment transport, no. 3, pp. 17-23, 2017.
- [9] L.A. German and K.V. Kishkurno, «Comparison of methods for calculating the traction power supply system for different ways of taking into account the parameters of the external network», Vestnik of the Railway Research Institute, no. 1, pp. 16-21, 2013.
- [10] L.A. German, «The method of determining the nodal mutual resistance in the traction network of railways», R. F. Patent 23967077, Aug. 20, 2001.
- [11] A.S. Serebryakov, Transformers. Moscow: Publishing House MEI, 2014, P. 360.
- [12] G.N. Petrov, Electric cars. In 3 parts. Part 1 Introduction Transformer matora. Moscow: Energia, 1974, P. 240.