

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.315.1: 621.3.014.3: 621.3.064.1: 621.3.022

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-6-74-83

**РАСЧЁТ РЕЖИМА ТРЁХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10 КВ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ТОКОВ НАГРУЗКИ****ВОЛЧКОВ ЮРИЙ ДМИТРИЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент¹

volchkov.iurij@yandex.ru

ВИНОГРАДОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ✉, канд. техн. наук, доцент^{2,3}

winaleksandr@gmail.com✉

ЛАНСБЕРГ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, учебный мастер II категории¹

LansbergAA@yandex.ru

СОРОКИН НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ, старший преподаватель¹

sorokinnc@rambler.ru

ВИНОГРАДОВА АЛИНА ВАСИЛЬЕВНА, канд. техн. наук, старший научный сотрудник²

alinawin@rambler.ru

ФОМИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, старший преподаватель¹

finigor@rambler.ru

¹ Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орёл, Генерала Родина ул., 69² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Ток нагрузки оказывает влияние на значение тока короткого замыкания (КЗ) в сети и на значение напряжения в ней. Это влияние необходимо учитывать для правильного выбора коммутационных аппаратов, для осуществления способов дистанционного контроля режимов работы электрических сетей, для определения режимов, в которых возможно отключение нагрузок, подключенных через магнитные пускатели, контакторы. Неучёт влияния тока нагрузки может привести к неверной интерпретации выявленных режимов работы сети при дистанционном контроле и, как следствие, к принятию диспетчером неверных решений, а также не позволяет уточнять выбор коммутационных аппаратов в сети 10 кВ. Выполнена разработка методики расчета режима трёхфазного КЗ в электрической сети 10 кВ с учётом влияния токов нагрузки, демонстрируемая в статье на примере реальной электрической сети, содержащей реклоузеры и получающей питание от разных секций шин низкого напряжения подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ, находящейся на балансе филиала ПАО МРСК Центра – Орёлэнерго. Для данной сети рассчитаны значения токов трёхфазного короткого замыкания в точках с разной удалённостью от шин подстанции. Определены значения токов нагрузки и их доля в полном токе короткого замыкания. Рассчитаны значения напряжения в разных точках сети при коротких замыканиях в ней. Показано, что при удалённых коротких замыканиях следует учитывать влияние тока нагрузки на полный ток короткого замыкания.

Ключевые слова: режим трёхфазного короткого замыкания, электрические сети 10 кВ, токи нагрузки, напряжение при коротком замыкании, методика расчёта.

Формат цитирования: Волчков Ю.Д., Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Виноградова А.В., Фомин И.Н. Расчёт режима трёхфазного короткого замыкания в электрической сети 10 кВ с учётом влияния токов нагрузки // Агроинженерия. 2021. № 6(106). С. 74-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-74-83>.

© Волчков Ю.Д., Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Виноградова А.В., Фомин И.Н., 2021



ORIGINAL PAPER

**ENGINEERING ANALYSIS OF THE THREE-PHASE SHORT CIRCUIT MODE
IN THE 10 KV ELECTRIC NETWORK TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE
OF LOAD CURRENTS****YURI D. VOLCHKOV**, PhD (Eng), Associate Professor¹

volchkov.iurij@yandex.ru

ALEKSANDR V. VINOGRADOV✉, PhD (Eng), Associate Professor^{2,3}

winaleksandr@gmail.com✉

ALEKSANDR A. LANSBERG, *Training Instructor of Category II*¹

LansbergAA@yandex.ru

NIKOLAY S. SOROKIN, *Senior Lecturer*¹

sorokinnc@rambler.ru

ALINA V. VINOGRADOVA, *PhD (Eng), Senior Researcher*²

alinawin@rambler.ru

IGOR N. FOMIN, *Senior Lecturer*¹

finigor@rambler.ru

¹ Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; 69, Generala Rodina Str, Orel, 302019, Russian Federation

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Bld 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The load current affects the value of the short-circuit current in the electric network and, consequently, the voltage value. In some cases, this influence must be taken into account for the correct choice of switching devices, remote monitoring the operating modes of electric networks, and determining the modes. It is possible to disconnect loads connected through magnetic starters and contactors. Failure to consider the influence of the load current can lead to an incorrect interpretation of the identified grid operating modes during remote monitoring and, as a result, incorrect dispatcher's decisions. In addition, it is also insufficient to specify the choice of switching devices in the 10 kV feed network. The article describes a method for analyzing the three-phase short circuit mode in a 10 kV feed network, taking into account the influence of load currents. The method is exemplified by the case of an actual electric network – the 10 kV ring feed network containing reclosers and receiving power from different sections of low-voltage buses of the “Kulikovskaya” 110/35/10 kV substation, belonging to the Branch of PJSC «DGC of Center»-“Orelenargo.” For this network, the values of the three-phase short-circuit currents at points with different distances from the substation buses have been determined. The authors have figured out the values of the load currents and their shares in the total short-circuit current. The voltage values at different points of the network in the case of short circuits have also been determined. The research proves that the effect of the load current on the total short-circuit current should be taken into account for the case of remote short circuits.

Key words: three-phase short-circuit mode, 10 kV electrical networks, load currents, short-circuit voltage, calculation method.

For citation: Volchkov Yu.D., Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S., Vinogradova A.V., Fomin I.N. Engineering analysis of the three-phase short circuit mode in the 10 kV electric network taking into account the influence of load currents. *Agricultural Engineering*, 2021; 6 (106): 74-83. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-74-83>.

Введение. Одним из аварийных в работе электрической сети 10 кВ является режим короткого замыкания (КЗ). Данный режим характеризуется наибольшим значением тока, протекающего по линиям электропередачи (ЛЭП) и другим элементам электрической сети по сравнению с другими режимами работы, что приводит к значительному изменению напряжения в разных её точках. В точке трёхфазного КЗ и за ней по отношению к источнику электроснабжения значение напряжения принимается равным нулю. По мере отдаления от данной точки в сторону источника электроснабжения оно возрастает.

Отечественными и зарубежными учёными исследуются вопросы, связанные с влиянием токов КЗ на работу электроустановок, проводятся исследования по раннему выявлению и идентификации неисправностей электрооборудования с целью предупреждения возникновения аварийных режимов работы энергосистемы [1]. Токи КЗ оказывают значительное электродинамическое и термическое воздействие на электрооборудование, токоведущие части, изоляцию и разрушают их, а также значительно снижают напряжение в системе электроснабжения. Поэтому создание методик их расчёта является актуальным для правильного выбора коммутационных электрических аппаратов [2], разработки технических средств и технологий предупреждения возникновения КЗ [3, 4], методов и средств по их ограничению [5], способов и технических средств дистанционного контроля режимов работы электрических сетей, для работы коммутационных аппаратов в сетях [6]. Изучаются

вопросы влияния конфигурации электрической сети, характеристик входящего в сеть оборудования на значения тока КЗ. Получены, например [7-12], новые методы расчёта и идентификации токов КЗ, позволяющие более эффективно выбрать защитные коммутационные аппараты в системах с распределённой генерацией на основе асинхронных генераторов и синхронных машин.

Большинство исследований параметров режимов КЗ не учитывает особенностей сельских электрических сетей. В то же время сельские электрические сети 10 кВ являются протяжёнными, питают распределённую нагрузку, в состав которой, как правило, не входят мощные асинхронные и синхронные машины. Значительную долю электрических нагрузок сельских сетей составляют освещение (42%), электронагреватели (11%), электроприводы машин и механизмов (37%) [13], которые даже при значительном снижении напряжения потребляют электроэнергию, что оказывает влияние на значение тока КЗ в сети и на значение напряжения в ней. В некоторых случаях это влияние необходимо учитывать для правильного выбора коммутационных аппаратов, для осуществления способов дистанционного контроля режимов работы электрических сетей, для определения режимов, в которых возможно отключение нагрузок, подключённых через магнитные пускатели, контакторы. Кроме того, расчёт напряжения в разных точках сети при КЗ в ней позволяет определять необходимость введения запрета на действие средств автоматики, например, включения автоматического ввода резерва (АВР) [14],

определять, в каком случае будут отключены средства секционирования в сети 0,4 кВ при КЗ в сети 10 кВ [15].

При установке в сети 10 кВ реклоузеров¹ [16-18], пунктов секционирования и резервирования знание значений напряжения и тока КЗ с учётом влияния токов нагрузки позволяет осуществлять бесканальные способы дистанционного контроля их работы [19]. Неучёт влияния тока нагрузки может привести к неверной интерпретации выявленных бросков тока в сети при дистанционном контроле и, как след-

ствие, к принятию диспетчером неверных решений. Кроме того, это не позволяет уточнять выбор коммутационных аппаратов в сети 10 кВ.

Цель исследований: разработка методики расчёта режима трёхфазного КЗ в электрической сети 10 кВ с учётом влияния токов нагрузки и демонстрация её на примере реальной электрической сети.

Материал и методы. Объектом исследования является кольцевая распределительная электрическая сеть 10 кВ, содержащая реклоузеры и получающая питание от разных секций шин низкого напряжения (НН) подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ, находящейся на балансе филиала ПАО МРСК Центра – Орёлэнерго (рис. 1).

¹ Таврида Электрик. Вакуумный реклоузер PBA/TEL. Техническая информация. 2014. URL: <https://www.tavrida.com/ter/support/documents/5/> (дата обращения: 17.12.2020).

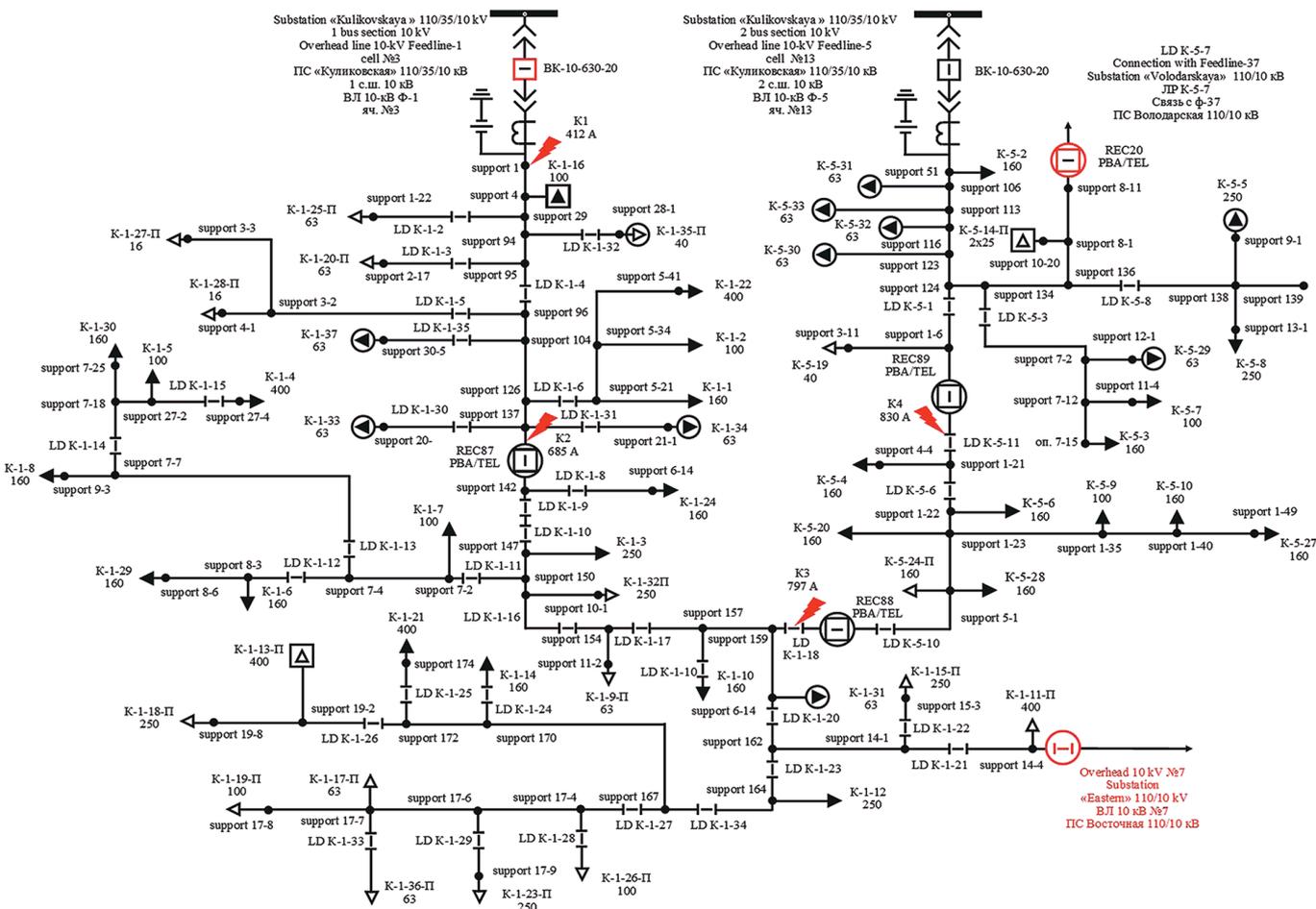


Рис. 1. Рассматриваемая кольцевая электрическая сеть 10 кВ с расчётными точками КЗ

Fig. 1. 10 kV ring feed network with setting-out short-circuit points

Рассматриваемая электрическая сеть 10 кВ в нормальном режиме работы является разомкнутой, что обеспечивается нормально отключенным положением реклоузера REC88. Реклоузеры REC88, REC87 и REC89 выполняют функции пунктов секционирования и резервирования. Головные масляные выключатели ВК-10-630-20 на отходящих линиях (фидерах) Ф-1 и Ф-5 оснащены делительной автоматикой, то есть при исчезновении напряжения на соответствующих шинах подстанции они отключаются. В зависимости от того, на каких шинах подстанции исчезло напряжение, включаются REC88 и REC87 или REC88 и REC89, подавая напряжение на резервируемые участки ЛЭП. Работа схемы в замкнутом режиме не предусмотрена.

В рассматриваемой электрической сети 10 кВ методом расчёта в относительных единицах, согласно «ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ», были определены значения максимального и минимального токов трёхфазных КЗ в контрольных точках сети (на каждом из участков линий электропередачи) при питании от разных секций шин [20]. Однако в указанной работе не учтено значение тока нагрузки и не определены значения напряжения в сети при КЗ.

На рисунке 1 представлена однолинейная силовая схема рассматриваемой кольцевой электрической сети 10 кВ в режиме, когда 1-я секция шин подстанции «Куликовская»

110/35/10 кВ выведена аварийно или для планового ремонта, а питание всей сети осуществляется от 2-й секции шин с расчетными точками КЗ К1-К4.

Указанные на схеме сети (рис. 1) точки трёхфазного КЗ К1-К4, для которых рассчитаны токи КЗ, являются характерными, выбранными из множества возможных мест повреждения рассматриваемой электрической сети.

Предметом исследования является расчёт электрических параметров режимов установившегося трёхфазного КЗ в рассматриваемой электрической сети 10 кВ при замыканиях в точках К1-К4.

При проведении исследования использовались основные положения теории переходных процессов в системах электроснабжения, которые были применены к рассматриваемой кольцевой электрической сети (рис. 1). В рассматриваемом режиме работы сети при питании всех потребителей от 2-й секции шин подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ электрическая энергия передаётся от источника питания, в роли которого выступает система сборных шин, к потребителям – трансформаторным подстанциям 10/0,4 кВ (ТП 10/0,4 кВ). При симметричных трёхфазных КЗ, при которых каждая из фаз электроустановки находится в одинаковых условиях, в электрической сети происходит перераспределение потоков мощности, а напряжение в месте КЗ уменьшается до нуля, при этом замыкание делит сеть на две независимые части. В этом случае вся подключенная к электрической сети нагрузка за местом КЗ не оказывает влияния на режим. Так, в случае возникновения КЗ в каждой из точек К1-К4 2-я секция сборных шин подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ будет непосредственно питать точки КЗ. В связи с этим расчёт режимов КЗ в каждой расчётной точке К1-К4 производится от места КЗ ко 2-й секции сборных шин.

Для проведения расчёта сначала была составлена схема замещения рассматриваемой электрической сети. В ней были учтены сопротивления основных элементов, которые, согласно ГОСТ Р 52735-2007, оказывают влияние на параметры режима КЗ. Расчёт режима производился на одной ступени напряжения сети, поэтому сопротивления определялись далее по расчётным выражениям методом именованных единиц с использованием данных по значениям параметров оборудования². Так, определялось сопротивление двухобмоточных трансформаторов ТП 10/0,4 кВ, которое принималось равным полному сопротивлению трансформатора. При расчёте сопротивлений линий электропередачи 10 кВ и сопротивлений нагрузок, подключенных к ТП 10/0,4 кВ, были приняты допущения: часть параметров режима КЗ, а именно коэффициенты мощности $\cos \varphi$, не учитывались в расчёте, то есть ток нагрузки представлялся в виде модуля и его активная и реактивная составляющие отдельно не рассматривались.

Полные сопротивления участков линий определялись в именованных единицах с учётом как реактивного, так и активного сопротивления. Ввиду того, что их отношение меньше 3, то согласно ГОСТ Р 52735-2007 требуется учитывать активное сопротивление провода для повышения точности результатов расчета. Удельные активные и индуктивные сопротивления для проводов и кабелей, используемых в рассматриваемой электрической сети 10 кВ, были определены

по данным «ГОСТ 31946-2012. Провода самонесущие изолированные и защищённые для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия» и источника [21].

В связи с тем, что при проведении исследований данные по подключенным к ТП 10/0,4 кВ по стороне низкого напряжения 0,4 кВ электроприемникам отсутствовали, то эквивалентные полные сопротивления нагрузок ТП 10/0,4 кВ для представления их в схеме замещения определялись в соответствии с ГОСТ Р 52735-2007 по формуле:

$$z_{\text{КН}} = 0,35 \cdot \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{\text{ном.КН}}}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где 0,35 – коэффициент, учитывающий характер комплексной нагрузки, подключенный к ТП 10/0,4 кВ; $S_{\text{ном.КН}}$ – номинальное сопротивление комплексной нагрузки в нормальном режиме работы сети, кВА.

Данные значения были получены по результатам замеров нагрузки ТП 10/0,4 кВ рассматриваемой электрической сети персоналом филиала ПАО МРСК Центра – Орелэнерго и представлены в работе [22].

Упрощение смешанного соединения рассчитанных сопротивлений элементов производилось путём эквивалентных преобразований, позволяющих упростить топологию сети и не производить вычисления по законам Кирхгофа.

Преобразование последовательно соединённых элементов согласно схемам замещения сети и нахождение эквивалентного сопротивления для них осуществлялись путём нахождения суммы сопротивлений отдельных элементов участков сети, соединённых последовательно. В схеме замещения число параллельных ветвей не было больше трех, поэтому преобразование параллельных элементов сети и нахождение эквивалентного сопротивления ($Z_{\text{экв}}$, Ом) осуществлялись по известным формулам для параллельного соединения двух и трёх сопротивлений.

Определение параметров режима трехфазного КЗ в электрической сети производилось с использованием комплексного метода расчёта цепей переменного тока по закону Ома для участка цепи по выражению

$$U = I \cdot Z, \text{ В}, \quad (2)$$

где $I \approx I_{\text{ПО}}^{(3)}$ – значение трёхфазного тока КЗ в рассматриваемой точке электрической сети, А; $Z \approx Z_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление участка электрической сети, Ом; U – напряжение, приложенное к участку электрической сети, В. Данный параметр в точке замыкания при расчетах режимов был принят равным 0 В.

Определение потерь напряжения на участке сети в режиме КЗ осуществлялось с учётом термического действия тока КЗ на провода электрической сети:

$$\Delta U = I_{\text{ПО}}^{(3)} \cdot Z_{\text{экв}}, \text{ В}. \quad (3)$$

При этом напряжение в начале участка определялось по формуле:

$$U_n = \Delta U + U_K, \quad (4)$$

где ΔU – потери напряжения на участке электрической сети, В; U_K – напряжение в точке КЗ, 0 В; U_n – напряжение в узле электрической сети п.

При расчёте параметров режима установившегося трёхфазного КЗ по выражениям принимались допущения того, что параметры линий электропередачи и нагрузки

² Тольяттинский трансформатор. Энергия для жизни. URL: <https://transformator.com.ru/> (дата обращения: 02.05.2021).

потребителей одинаковы, причем следует выявить погрешность инженерных расчетов, которая заключается в том, что $\cos \varphi$ нагрузки по результатам замеров составляет 0,92. При этом также следует определить параметры цепи КЗ при КЗ в определённой точке электрической сети 10 кВ, которые для расчёта токов КЗ были вычислены [20]. Коэффициент мощности параметров электрической цепи определяли по формуле [21]:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \tag{5}$$

где R – результирующее активное сопротивление до точки КЗ, Ом; Z – результирующее полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

Действительные потери напряжения на участке сети с учетом параметров нагрузки:

$$\Delta U = I_{\text{по}}^{(3)} \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi), \tag{6}$$

где $\cos \varphi$ – коэффициент активной мощности нагрузки/цепи КЗ; $\sin \varphi$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки/цепи КЗ. Например, для точки КЗ K2 $\cos \varphi = 0,74$, $\sin \varphi = 0,673$.

Ток нагрузки в режиме КЗ определялся по закону Ома:

$$I_{n(i)} = \frac{U_n}{Z_{\text{ЭКВ}}}, \text{ А,}$$

где $I_{n(i)}$ – ток нагрузки i -й ТП 10/0,4 кВ.

При этом по мере приближения ко 2-й секции шин подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ нагрузка каждой ТП 10/0,4 кВ суммировалось со значением тока трёхфазного КЗ по выражению

$$I_{\text{рез}} = I_{\text{по}}^{(3)} + I_{n(i)}, \text{ А.} \tag{7}$$

Согласно ГОСТ Р 52735-2007 при расчете максимального начального действующего значения периодической составляющей тока трёхфазного КЗ должна быть учтена комплексная нагрузка в случае, если её доля в суммарном токе КЗ составляет не менее 5%. В связи с этим определение доли комплексной нагрузки в полном токе переходного режима производилось по формуле:

$$I_{\text{к.н.}, \%} = \frac{I_{\text{рез}} - I_{\text{по}}^{(3)}}{I_{\text{по}}^{(3)}} \cdot 100\%, \tag{8}$$

где $I_{\text{рез}}$ – полный ток, протекающий в электрической сети, А; $I_{\text{по}}^{(3)}$ – значение тока трёхфазного КЗ в рассматриваемой точке, А.

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 представлена разработанная схема замещения рассматриваемой кольцевой электрической сети 10 кВ при трёхфазном КЗ в точке K2. При данном режиме работы нагрузка ТП 10/0,4 кВ, которая подключена между выключателем фидера № 1 ВК-10-630-20 и REC87, не будет влиять на полный ток КЗ в сети. С учётом описанных ранее методов исследования выполнены расчёты для намеченных точек.

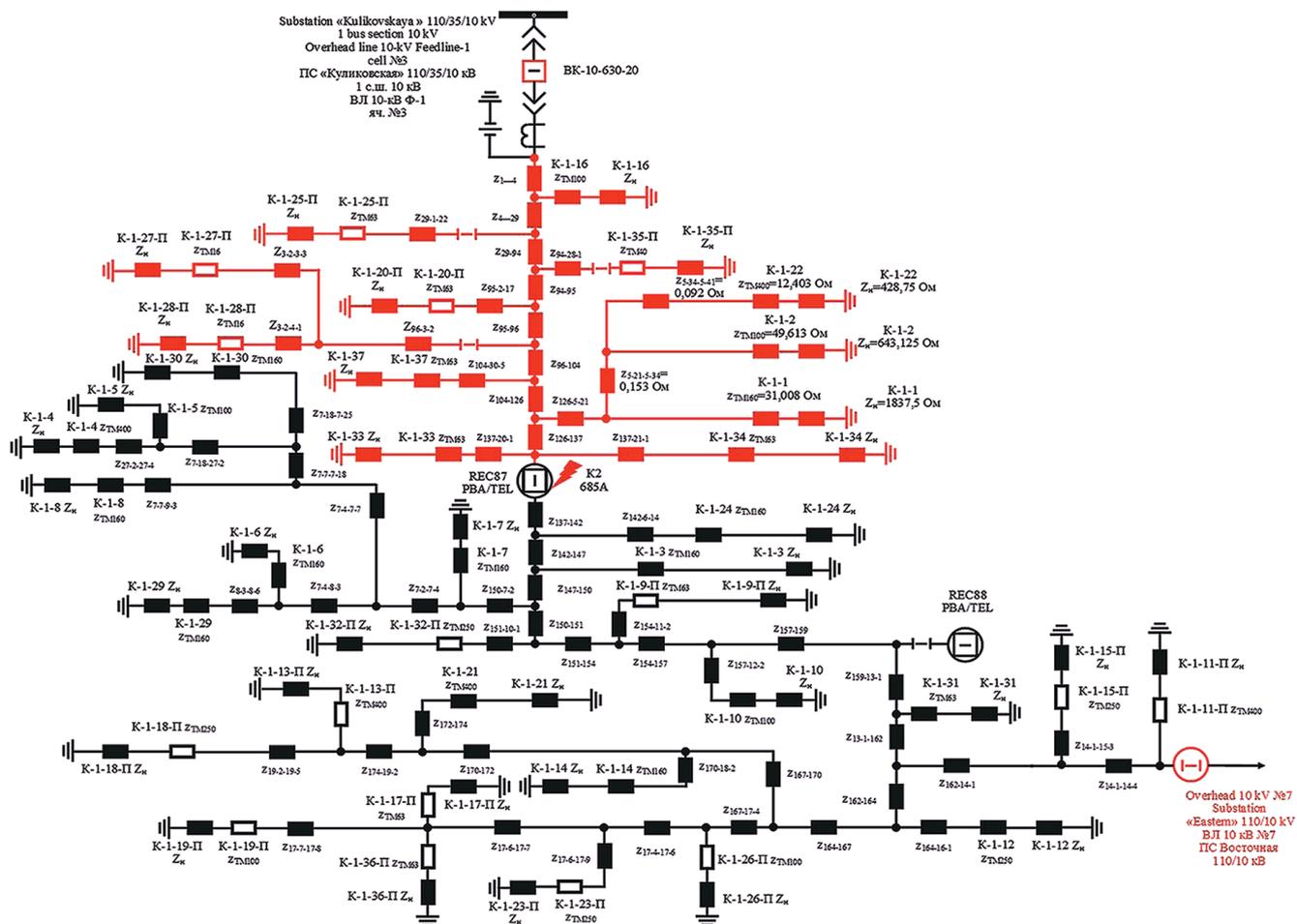


Рис. 2. Схема замещения фидера № 1 рассматриваемой кольцевой электрической сети 10 кВ при трёхфазном КЗ в точке K2
 Fig. 2. Replacement scheme of Feeder No.1 of the considered 10 kV ring feed network at a three-phase short circuit at the K2 point

Результаты расчёта напряжения на ТП 10/0,4 кВ в режиме КЗ в точке К1 представлены на графике (рис. 3), а расчетные значения токов трехфазного КЗ и полного тока, протекающего в сети с учетом токов нагрузки

в контрольных точках сети, за которые приняты места установки коммутационных аппаратов для рассматриваемых режимов установившегося трёхфазного КЗ, отражены в таблице.

Таблица

Значения токов трёхфазного короткого замыкания и полных токов с учётом нагрузки в контрольных точках рассматриваемой электрической сети при КЗ в местах К1-К4

Table

Values of three-phase short-circuit currents and full currents, taking into account the load at the control points of the considered electric network at short-circuit in the K1-K4 points

Электрические параметры режима работы <i>Electrical parameters of the operating mode</i>	Контрольные точки электрической сети <i>Control points of the electrical network</i>			
	REC87	REC88	REC89	BK-10-630-20
КЗ в районе опоры № 1 фидера № 1 при питании ВЛ-10 кВ через высоковольтный выключатель фидера № 5 <i>Short circuit on the support No.1 of feedline No.1 when the overhead 10 kV line is feeding through high voltage switch of feedline No.5</i>				
Значение тока трёхфазного КЗ, А / <i>Value of the three-phase short-circuit current, A</i>	412			
Значение полного тока с учетом нагрузки, А / <i>Value of the total current taking into account the load, A</i>	424,133	487,94	517,723	559,62
КЗ на REC87 при питании ВЛ-10 кВ через высоковольтный выключатель фидера № 5 <i>Short circuit on the REC88 when the overhead 10 kV line is feeding through high voltage switch feedline No.5</i>				
Значение тока трёхфазного КЗ, А / <i>Value of the three-phase short-circuit current, A</i>	685			
Значение полного тока с учетом нагрузки, А / <i>Value of the total current taking into account the load, A</i>	685	699,988	710,078	731,893
КЗ на REC88 при питании ВЛ-10 кВ через высоковольтный выключатель № 5 <i>Short circuit on the REC88 when the overhead line 10 kV feeding through high voltage switch feedline № 5</i>				
Значение тока трёхфазного КЗ, А / <i>Value of the three-phase short-circuit current, A</i>	-	797		
Значение полного тока с учетом нагрузки, А / <i>Value of the total current taking into account the load, A</i>	-	797	798,987	810,987
КЗ на REC89 при питании ВЛ-10 кВ через высоковольтный выключатель № 5 <i>Short circuit on the REC89 when the overhead 10 kV line is feeding through high voltage switch feedline No.5</i>				
Значение тока трёхфазного КЗ, А / <i>Value of the three-phase short-circuit current, A</i>	-	-	830	
Значение полного тока с учетом нагрузки, А / <i>Value of the total current taking into account the load, A</i>	-	-	830	840,433

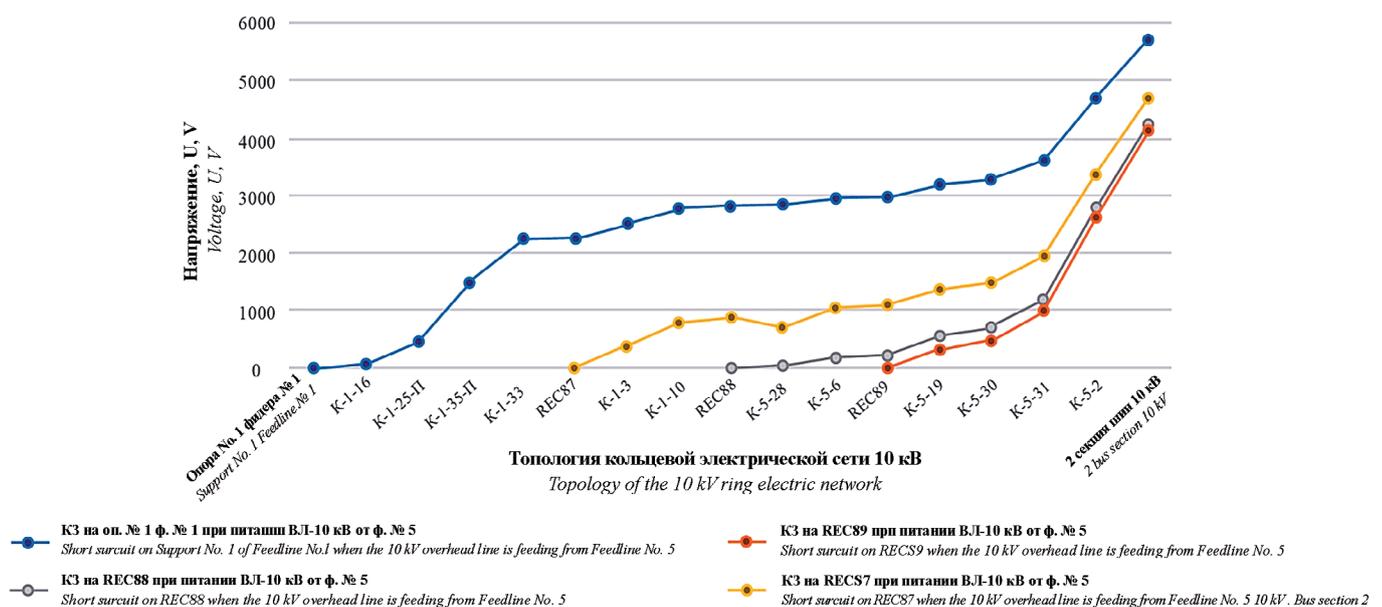


Рис. 3. Напряжения в контрольных точках электрической сети 10 кВ в рассматриваемых режимах

Fig. 3. Voltages at control points of the 10 kV feed network in the considered modes

Графики напряжении, представленные на рисунке 3, позволяют сделать вывод о том, что методика расчёта режимов трёхфазного установившегося короткого замыкания в электрических сетях 10 кВ разработана верно. При ее использовании соблюдаются основные положения теории расчёта данных режимов: при удалении КЗ от источника питания напряжение на источнике питания снижается в меньшей степени (рис. 3). Так, при КЗ на реклоузере REC89 напряжение на 2-й секции шин подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ составляет 4165 В, а при удалении точки КЗ от шин подстанции оно растёт: например, при замыкании на REC88-4246 В, на REC87-4697 В, а в случае замыкания в самой удаленной точке сети на опоре № 1 фидера № 1 подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ оно составляет 5711 В.

Для оценки влияния тока нагрузки на полный ток КЗ по формуле (12) можно оценить составляющую тока нагрузки в полном токе КЗ. Например, для исследуемого по схеме замещения режима при КЗ в точке К2 (рис. 2) ток КЗ без учёта нагрузки составляет 685 А, а полный ток, рассчитанный по рассмотренной методике, – 731,893 А. Доля тока нагрузки в полном токе КЗ для данного режима составляет

$$I_{к.н., \%} = \frac{731,893 - 685}{685} \cdot 100\% = 6,846\%.$$

С учётом ГОСТ Р 52735-2007 данный ток следует учитывать при расчёте начального действующего значения периодической составляющей тока трёхфазного КЗ, так как его доля в суммарном токе КЗ составляет более

5%. В связи с этим значение тока трёхфазного КЗ в точке К2 может быть скорректировано до 731,893 А. Доли токов нагрузки в полном токе КЗ для других режимов по топологии сети представлены на рисунке 4.

Из рисунка 4 следует, что при КЗ, близких ко 2-й секции шин подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ (точки К3, К4), влияние тока нагрузки на коммутационное оборудование можно не учитывать, так как его доля при КЗ в точках К3 и К4 возрастает к шинам подстанции в пределах от 1,257...1,755%, то есть значения тока полного тока, включающего ток нагрузки и трёхфазного КЗ, проходящего в режиме устойчивого короткого замыкания через высоковольтный выключатель фидера № 5, в точках К3 и К4 возрастают со значений 797А и 830А до значений 810,987А и 840,433А. Наибольшее влияние ток нагрузки оказывает на полный ток КЗ при замыкании в точке К1 на опоре № 1 фидера № 1. В этом случае, а также при КЗ в точках между К1 и К2, при питании сети от 2-й секции шин, значения токов трёхфазных КЗ, рассчитанные по ГОСТ Р 52735-2007, должны быть скорректированы с учетом влияния комплексной нагрузки потребителей сети, так как при замыканиях в указанных точках ток нагрузки возрастает к шинам подстанции «Куликовская» 110/35/10 кВ в пределах от 6,846 до 35,83% полного тока КЗ, то есть значения тока полного тока, включающего ток нагрузки и трёхфазного КЗ, проходящего в режиме устойчивого короткого замыкания через высоковольтный выключатель фидера № 5, в точках К1 и К2 возрастают со значений 412 и 685 А до значений 559,62 и 731,893 А.

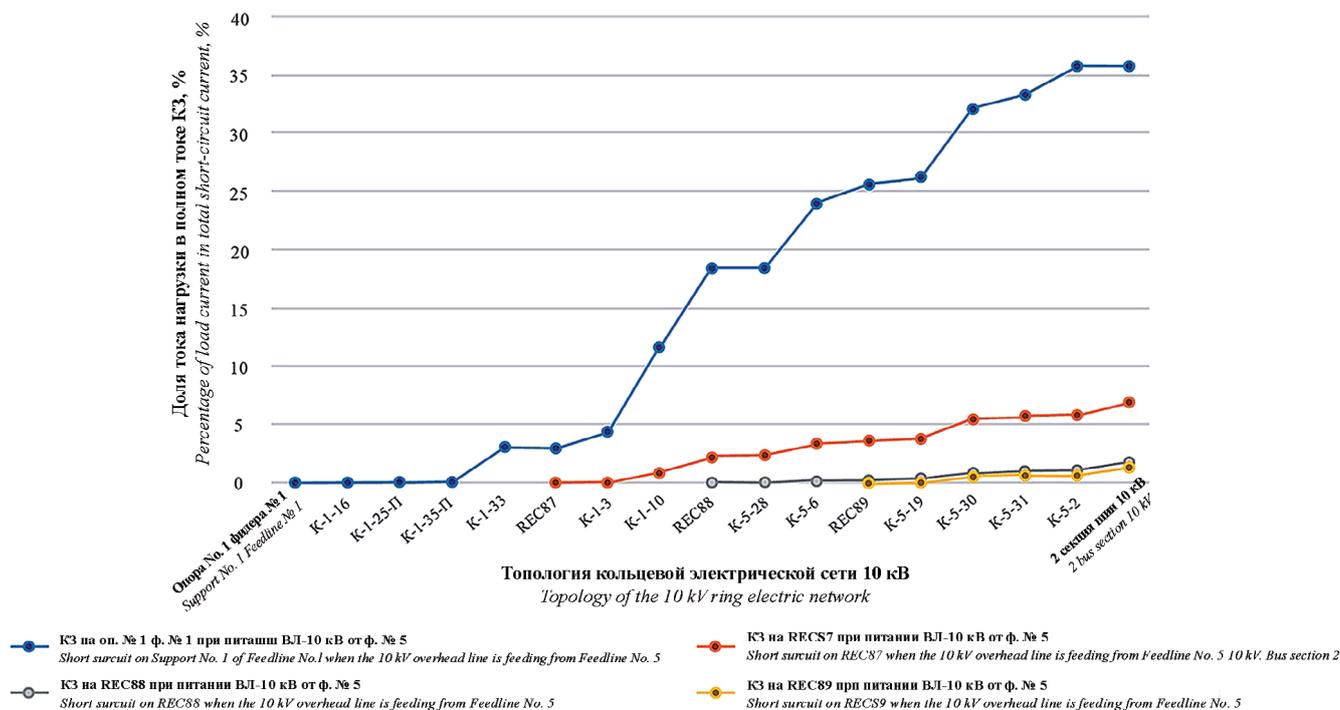


Рис. 4. Доли токов нагрузки в полном токе КЗ в рассматриваемой электрической сети 10 кВ
 Fig. 4. Share of load currents in the total short-circuit current in the considered 10 kV feed network

Выводы

1. В зависимости от места, в котором происходит трёхфазное короткое замыкание в электрической сети 10 кВ,

а также от конфигурации данной сети на значение тока короткого замыкания может оказывать ток нагрузки, от чего также зависит распределение напряжения в электрической сети.

2. Представленная методика расчёта режима трёхфазного короткого замыкания в электрической сети 10 кВ учитывает место возникновения замыкания и влияние значения тока нагрузки на полный ток в сети в рассматриваемом режиме. Методика позволяет также рассчитать значение напряжения в разных точках сети при коротком замыкании в ней.

3. Предложенная методика расчёта режима трёхфазного короткого замыкания в электрической сети 10 кВ проиллюстрирована на примере реальной электрической сети. Показано, что при замыканиях в удалённых

от источника питания (шины подстанции) точка ток нагрузки составляет от 6,846 до 35,83% полного тока КЗ. При этом напряжение в линии изменяется от 0 В в точке короткого замыкания до 5711 В на шинах подстанции.

4. Применение предложенной методики позволяет учитывать влияние тока нагрузки на ток трёхфазного короткого замыкания при выборе характеристик коммутационных аппаратов, средств релейной защиты, при настройке средств дистанционного контроля режимов работы электрической сети.

Библиографический список

1. Xiren Miao, Yanping Chan, Ronghua Qiu et al. Research on early detection and identification of short circuit fault based on terminal voltage in low voltage distribution system. 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 21-23 Oct. 2016, <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2016.7871206>

2. Guo Y., Miao X. Short circuit fault current detection and rapid breaking actuator technologies of low voltage distribution system. *Low Voltage Apparatus*. 2013; 7: 18-22.

3. Wu S., Bao G. Early detection technology of short circuit fault based on TMS320F2812. *Low Voltage Apparatus*. 2013; 6: 21-24, 29.

4. Wu X., Miao X. Research on early detection of short-circuit fault in multi-level low voltage system. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2015; 9: 38-43.

5. Miao X., Wu X. Early detection and prediction for short-circuit current in a multilevel low voltage system. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014; 11: 177-184.

6. Виноградов А.В., Астахов С.М., Сорокин Н.С. Дистанционный контроль отключения выключателей в распределительных сетях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 12. С. 44-46.

7. Morrez J., Haan S.W.H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007; 22 (1): 174-180. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889615>

8. Ma J., Zhang W., Lui J. et al. Research on short circuit current characteristics of doubly-fed wind power generator considering converter regulation. *Electric Power Components and Systems*. 2018; 45 (19): 2118-2130. <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1400605>

9. Zhou H.L., Yang G., Li. D.Y. Short circuit current analysis of DFIG wind turbines with crowbar protection. In Proc. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382825>

10. Xiong X., Qi X., Ouyang J. Effect of doubly-fed wind turbines short-circuit current on second harmonic escapement of transformer protection. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2014; 13: 2201-2209.

11. Шулаков Н.В., Судаков А.И., Чабанов Е.А. Новые подходы к получению исходной информации и методам идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2013. № 8. С. 114-127.

References

1. Xiren Miao, Yanping Chan, Ronghua Qiu, Junjie Chen. Research on early detection and identification of short circuit fault based on terminal voltage in low voltage distribution system. 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 21-23 Oct. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2016.7871206>

2. Guo Y., Miao X. Short circuit fault current detection and rapid breaking actuator technologies of low voltage distribution system. *Low Voltage Apparatus*, 2013; 7: 18-22, July.

3. Wu S., Bao G. Early detection technology of short circuit fault based on TMS320F2812. *Low Voltage Apparatus*. 2013; 6: 21-24, 29.

4. Wu X., Miao X. Research on early detection of short-circuit fault in multi-level low voltage system. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2015; 9: 38-43.

5. Miao X., Wu X. Early detection and prediction for short-circuit current in a multilevel low voltage system. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014; 11: 177-184.

6. Vinogradov A.V., Astakhov S.M., Sorokin N.S. Distsantsionnyy kontrol' otklyucheniya vyklyuchateley v raspredelitel'nykh setyakh [Remote switching off in distribution networks]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystava*, 2008; 12: 44-46. (In Rus.)

7. Morrez J., Haan S.W.H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007; 22 (1): 174-180. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889615>

8. Ma J., Zhang W., Lui J. et al. Research on short circuit current characteristics of doubly-fed wind power generator considering converter regulation. *Electric Power Components and Systems*. 2018; 45 (19): 2118-2130. <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1400605>

9. Zhou H.L., Yang G., Li. D.Y. Short circuit current analysis of DFIG wind turbines with crowbar protection. In Proc. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382825>

10. Xiong X., Qi X., Ouyang J. Effect of doubly-fed wind turbines short-circuit current on second harmonic escapement of transformer protection. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2014; 13: 2201-2209.

11. Shulakov N.V., Sudakov A.I., Chabanov E.A. Novye podkhody k polucheniyu iskhodnoy informatsii i metodam identifikatsii perekhodnykh protsessov moshchnykh sinkhronnykh mashin [New approaches to obtaining source information and methods for identifying transients of powerful synchronous machines]. *Vestnik Permskogo nauchnogo*

12. Чабанов Е.А. и др. Вероятностно-статистические методы идентификации синусоидально возрастающих переходных процессов синхронных машин / Е.А. Чабанов, А.И. Судаков, А.М. Турпак, В.А. Лоскутников // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12-10. С. 2135-2141.
13. Эрк А.Ф., Судаченко В.Н., Размук В.А. и др. Результаты энергетического обследования сельскохозяйственных предприятий // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2014. № 85. С. 89-93.
14. Виноградов А.В. Совершенствование автоматического резервирования на двухтрансформаторных подстанциях: Монография. Орел.: Изд-во Орел ГАУ, 2007. 172 с.
15. Виноградов А.В. Разработка принципов управления конфигурацией сельских электрических сетей и технических средств их реализации: Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2021. 527 с.
16. Левин П.Н., Добрынин П.А., Середкин О.А. Секционирование распределительных сетей с помощью реклоузеров, с целью повышения уровня надежности электрических сетей // *Научный журнал. Инженерные системы и сооружения*. 2020. № 1 (38). С. 143-146.
17. Thomas R., Zyl S. van, Naidoo R.M. et al. Recloser based energy exposure assessment of a distribution network. *Journal of energy in southern Africa*. 2019; 30 (4). <http://doi.org/10.17159/2413-3051/2019/v30i4a2486>
18. Wright L., Ayers L. Mitigation of undesired operation of recloser controls due to distribution line inrush. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53 (1): 80-87. <http://doi.org/10.1109/TIA.2016.2613975>
19. Фомин И.Н., Беликов Р.П. Контроль отключения высоковольтных выключателей в секционированной линии электропередачи // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2019. № 2 (56). С. 48-59.
20. Виноградов А.В., Фомин И.Н., Капитонов А.И. и др. Определение токов коротких замыканий в сельской электрической сети 10 кВ, секционируемой реклоузерами для осуществления дистанционного контроля их срабатывания // *Вестник аграрной науки Дона*. 2021. № 1 (53). С. 34-43.
21. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ: Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. М.: Папирус ПРО, 2003-2005.
22. Виноградов А.В., Фомин И.Н., Лансберг А.А. Определение электрических нагрузок трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ кольцевой электрической сети 10 кВ, содержащей реклоузеры // *Физика и современные технологии в АПК: Материалы XII Всероссийской (с международным участием) молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников / Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина*. М.: Издательство Каргуш, 2021. С. 273-278.
- issledovatel'nogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2013; 8: 114-127. (In Rus.)
12. Chabanov E.A., Sudakov A.I., Turpak A.M., Loskutnikov V.A. Veroyatnostno-statisticheskie metody identifikatsii sinusoidal'no vozrastayushchikh perekhodnykh protsessov sinkhronnykh mashin [Probabilistic and statistical methods for identifying sinusoidally increasing transient processes of synchronous machines], *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014; 12-10: 2135-2141. (In Rus.)
13. Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A., Bychkova O.V. Rezul'taty energeticheskogo obsledovaniya sel'khozpredpriyatii. [Results of the energy survey of agricultural enterprises]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*, 2014; 85: 89-93. (In Rus.)
14. Vinogradov A.V. Sovershenstvovanie avtomaticheskogo rezervirovaniya na dvukhtransformatornykh podstanciyah. [Improvement of automatic redundancy at two-transformer substations]. Monograph. Orel.: Izd-vo Orel GAU, 2007: 172. (In Rus.)
15. Vinogradov A.V. Razrabotka printsipov upravleniya konfiguratsiy sel'skikh elektricheskikh setey i tekhnicheskikh sredstv ikh realizatsii [Development of principles for controlling the configuration of rural electric networks and technical means for their implementation]. DS (Eng) thesis: training area 05.20.02. Moscow. 2021: 527. (In Rus.)
16. Levin P.N., Dobrynin P.A., Seredkin O.A. Sektsionirovanie raspredelitel'nykh setey s pomoshch'yu reklouzerov, s tsel'yu povysheniya urovnya nadezhnosti elektricheskikh setey [Partitioning of distribution networks with the help of reclosers to increase the reliability level of electric networks]. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya*, 2020; 1 (38): 143-146. (In Rus.)
17. Thomas R., Zyl S. van, Naidoo R.M. et al. Recloser based energy exposure assessment of a distribution network. *Journal of energy in southern Africa*. 2019; 30 (4). <http://doi.org/10.17159/2413-3051/2019/v30i4a2486>
18. Wright L., Ayers L. Mitigation of undesired operation of recloser controls due to distribution line inrush. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53 (1): 80-87. <http://doi.org/10.1109/TIA.2016.2613975>
19. Fomin I.N., Belikov R.P. Kontrol' otklyucheniya vysokovol'tnykh vyklyuchateley v sektsionirovannoy linii elektroperedachi [Control of disconnecting high-voltage circuit breakers in a partitioned power transmission line]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya*, 2019; 2 (56): 48-59. (In Rus.)
20. Vinogradov A.V., Fomin I.N., Kapitonov A.I. et al. Opredelenie tokov korotkikh zamykaniy v sel'skoy elektricheskoy seti 10 kV, sektsioniruemye reklouzerami dlya osushchestvleniya distancionnogo kontrolya ikh srabatyvaniya [Determination of short-circuit currents in the rural 10 kV electric network partitioned by reclosers for remote monitoring of their operation]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2021; 1 (53): 34-43. (In Rus.)
21. Makarov E.F. Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4-35 kV i 110-1150 kV [Reference book of electrical networks 0.4-35 kV and 110-1150 kV] / ed. by I.T. Goryunov and A.A. Lyubimov. Moscow, Papirus PRO, 2003-2005. (In Rus.)

22. Vinogradov A.V., Fomin I.N., Lansberg A.A. Opredelenie elektricheskikh nagruzok transformatornykh podstantsiy 10/0.4 kV kol'tsevoy elektricheskoy seti 10 kV, sodержashchey reklouzery [Determination of electrical loads of 10/0.4 kV transformer substations of a 10 kV circular electric network containing reclosers]. In: *Fizika i sovremennye tekhnologii v APK. Materialy XII Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) molodezhnoy konferentsii molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov*. Orlovskiy gosudarstvenniy agrarniy universitet im. N.V. Parakhina, 2021: 273-278. (In Rus.)

Критерии авторства

Волчков Ю.Д., Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Виноградова А.В., Фомин И.Н. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Волчков Ю.Д., Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Виноградова А.В., Фомин И.Н. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.05.2021

Одобрена после рецензирования 18.10.2021

Принята к публикации 18.11.2021

Contribution

Yu.D. Volchkov, A.V. Vinogradov, A.A. Lansberg, N.S. Sorokin, A.V. Vinogradova, I.N. Fomin performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. Yu.D. Volchkov, A.V. Vinogradov, A.A. Lansberg, N.S. Sorokin, A.V. Vinogradova, I.N. Fomin have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 19.05.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 18.11.2021