

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ С РЕЗИСТИВНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ<sup>1</sup>

## COMPUTER SIMULATION OF THE SYSTEM OPERATION MODES WITH RESISTIVE-GROUNDED NEUTRAL<sup>2</sup>

V. Biryulin  
D. Kudelina

*Summary.* The article deals with the issues related to the medium voltage electrical networks operation modes operating with low-resistance neutral grounding. The features of such electrical networks operation with single-phase short circuits are considered. The article presents the investigation results on the computer model created by the authors which contains the voltage values on undamaged phases in the short circuit event of one phase to the ground in the electrical network.

*Keywords:* neutral, grounding, resistor, voltage, insulation, power supply reliability, electrical load.

**Бирюлин Владимир Иванович**

кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, Курск  
bir1956@mail.ru

**Куделина Дарья Васильевна**

кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, Курск  
mary\_joy@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассматриваются вопросы, связанные с режимами работы электрических сетей среднего напряжения, работающих с низкоомным заземлением нейтрали. Рассмотрены особенности работы таких электрических сетей при однофазных коротких замыканиях. Представлены результаты исследования на созданной авторами компьютерной модели значений напряжений на неповрежденных фазах в случае появления в электрической сети короткого замыкания одной фазы на землю.

*Ключевые слова:* нейтраль, заземление, резистор, напряжение, изоляция, надежность электроснабжения, электрическая нагрузка.

### Введение

Электрические сети среднего напряжения или сети с номинальным напряжением 6–35 кВ в настоящее время могут выполняться и эксплуатироваться с различными способами заземления нейтрали — от изолированной нейтрали до заземленной через резистор с низким или высоким значением его сопротивления [1]. От способа заземления нейтрали зависят многие важные функции данных электрических сетей:

- бесперебойность снабжения электрической энергией потребителей;
- безопасность обслуживающего персонала и надежность электрооборудования в случаях возникновения замыканий одной фазы на землю или ОЗЗ (однофазное замыкание на землю) с учетом изменения значений напряжений на неповрежденных фазах;
- возникновение значительных перенапряжений в электрических сетях, особенно при перемежающихся ОЗЗ;
- значение тока, протекающего в месте возникновения ОЗЗ;
- принципы выполнения устройств релейной защиты от ОЗЗ в электрических сетях;

— величина уровня изоляции токоведущих частей электрических сетей и электрооборудования.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что конкретный способ заземления нейтрали в электрических сетях среднего напряжения определяет реализацию тех или иных технических решений для рассматриваемой электросети напряжением 6–35 кВ.

### Литературный обзор

Данные электрические сети с напряжениями 6–35 кВ в нашей стране имеют намного большую длину по сравнению с высоковольтными сетями. Конструктивное их выполнение, в том числе и способ заземления нейтрали, зависит от многих факторов. Известно, что в этих сетях наиболее часто по сравнению с другими видами повреждений возникают ОЗЗ [1].

Если электрическая сеть работает с изолированной нейтралью, то в этом случае в месте пробоя изоляции одной фазы на землю протекает ток замыкания. Величина данного тока определяется емкостью линии, значение которой в свою очередь зависит от суммарной длины линий, образующих рассматриваемую электрическую

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-5109.2022.4 «Разработка автоматизированной системы выявления объектов, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии».

<sup>2</sup> The publication was carried out with the Russian Federation President Grant financial support for young scientists state support — Candidates of Science, project No. МК-5109.2022.4 «An automated system development for identifying objects which have a negative impact on power quality».

сеть. При относительно небольших токах ОЗЗ быстрого отключения данного повреждения не производят, что позволяет увеличить надёжность электроснабжения потребителей. В разветвленных кабельных сетях среднего класса напряжения может выполняться компенсация емкостных токов с помощью дугогасящих реакторов, обеспечивает работу электрической сети в режиме компенсированной нейтрали.

Как для изолированной, так и компенсированной нейтрали, характерны следующие негативные факторы:

- возможность возникновения значительных перенапряжений, вредно влияющих на изоляцию токоведущих частей, особенно при перемежающихся замыканиях;
- поражение людей и животных шаговым напряжением, существующим на поверхности грунта при ОЗЗ;
- разрушение арматуры, находящейся в железобетонных опорах линий;
- возрастание напряжения на неповрежденных фазах до междуфазного значения относительно земли.

Для решения проблемы возникновения перенапряжений в электрических сетях среднего напряжения в случае при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу, феррорезонансных и резонансных явлений возможно обеспечить сокращение повреждений изоляции высоковольтного оборудования за счет перехода от режима изолированной нейтрали сети к резистивному либо комбинированному (нейтраль заземлена через параллельно включенные дугогасящий реактор и резистор) способу заземления нейтрали.

В настоящее время в электрических сетях все шире применяются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция). Такие кабели имеют существенные преимущества перед ранее разработанными типами кабелей [2], но при использовании таких кабелей следует учитывать тот факт, что их СПЭ-изоляция имеет высокую чувствительность к различным перенапряжениям, возникающим в электрической сети при ОЗЗ [3]. Поэтому в сетях, выполненных такими кабелями, необходимо обеспечивать минимальное время отключения поврежденной линии с ОЗЗ и одновременно с этим снижать как величину перенапряжений, так и время существования этих перенапряжений. Для реализации этих требований необходимо применение режима резистивного заземления нейтрали. Данный режим имеет в нашей стране пока ограниченное распространение в отличие от других стран, где он имеет гораздо более широкую область применения [4].

Переход к резистивному заземлению нейтрали (возможны варианты заземления через большое сопротив-

ление — высокоомное заземление и через небольшое — низкоомное заземление) обеспечивает в электрических сетях среднего напряжения [5–8]:

- отсутствие значительных по величине дуговых перенапряжений и снижение вероятности перехода ОЗЗ в многофазные повреждения изоляции электрооборудования [9, 10];
- при высокоомном заземлении нейтрали возникновение ОЗЗ не является аварийным режимом, что позволяет не отключать первое возникающее в такой сети замыкание на землю;
- устранение опасности появления опасных феррорезонансных явлений, вызывающих повреждения измерительных трансформаторов напряжения;
- при низкоомном заземлении нейтрали значительно снижается вероятность поражения электрическим током людей при ОЗЗ, так как этот режим будет являться аварийным и вызовет быстрое селективное отключение релейной защитой поврежденного участка, что также позволит избежать перехода ОЗЗ в многофазное замыкание [11, 12].

Отсутствие возникновения в электрической сети дуговых перенапряжений при появлении ОЗЗ и возможность применения эффективно действующей селективной релейной защиты от таких повреждений обеспечивают эффективность применения такого режима работы нейтрали в сетях среднего напряжения [13, 14], но в перечисленных источниках не рассматривались вопросы, связанные с анализом изменения напряжений на неповрежденных фазах электрической сети при возникновении в ней ОЗЗ, что требует дополнительного изучения.

## Материалы и методы

Авторы статьи провели исследование режима работы системы электроснабжения, включающей в себя электрическую сеть среднего напряжения с низкоомным резистивным заземлением, при возникновении в ней ОЗЗ, на компьютерной модели. Данная модель была разработана в программной среде PSCAD, предназначенной для моделирования электроэнергетических систем и энергетических объектов.

Схема модели приведена на рис. 1. Данная расчетная схема включает в себя питающую систему с напряжением 220 кВ, трансформаторную подстанцию с трансформатором, от которого через реакторы питаются две секции шин с отходящими от них кабельными линиями. Режимы нейтрали, реализованные на подстанции: сторона 220 кВ с глухозаземленной нейтралью, сторона 20 кВ с резистивно-заземленной нейтралью (сопротивление заземления 12 Ом).

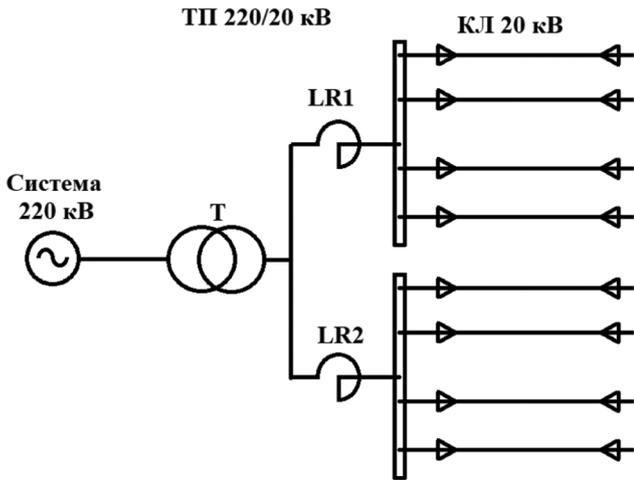


Рис. 1. Расчетная схема моделируемой системы электроснабжения

Моделирование работы данной системы производилось для двух режимов. Первый — установившийся режим, в котором производились измерения напряжений на фазах первой секции шин. Второй режим — возникновение однофазного КЗ, при котором происходило замыкание на землю фазы А. Так как вся модель исследуемой системы электроснабжения имеет большие размеры, то в статье приводится только два фрагмента этой модели — рис. 2 и рис. 3.

На этом рисунке показана модель кабельной линии, отходящей от секции шин напряжением 20 кВ. В PSCAD каждая кабельная линия состоит из трех компонентов. Первый компонент ( $S_1$  и  $S_2$ ) представляет собой разде-

литель одного трехфазного сигнала на три однофазных, и он применяется как для приемного конца линии ( $S_1$ ), так и для передающего ( $S_2$ ).

К однофазным выводам подключаются компоненты кабельного интерфейса (C1, C2, C3), с помощью которых задается число жил кабеля, его конструкция (например, токоведущая жила, изоляция жилы, экран, оболочка). Здесь же задается способ заземления экрана (по умолчанию или же через явно выраженные выводы, как показано на рис. 2). На рисунке показано присоединение этих экранов к заземляющим устройствам трансформаторной подстанции и распределительного пункта.

Остальные данные задаются непосредственно в компоненте кабельной линии (включена между кабельными интерфейсами) — длина, геометрические размеры конструктивных элементов, характеристики материалов, примененных при изготовлении кабеля (удельные сопротивления, диэлектрическая проницаемость и т.д.).

На рис. 3 представлен фрагмент компьютерной модели, где вертикальная линия представляет часть секции шин напряжением 20 кВ. К этой секции шин подключены трехфазный измеритель напряжения с меткой Ea\_1, осуществляющий измерение значений фазных напряжений относительно земли. Вывод результатов измерений этих напряжений производился в окно построения графиков.

Значение напряжения каждой фазы определялось измерителями Ua, Ub, Uc. Эти измерители подключены к секции шин через разделитель трехфазных сигналов

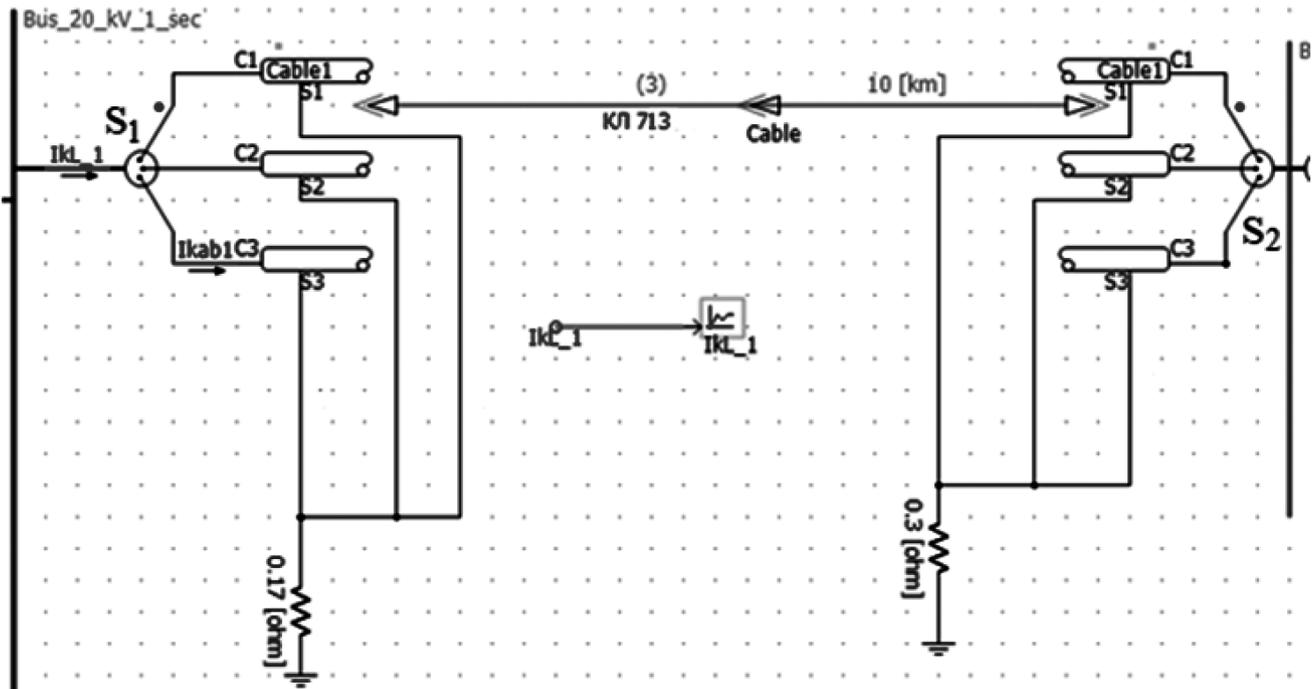


Рис. 2. Модель кабельной линии

на однофазные. Вывод результатов этих измерений производился на измерительные приборы для регистрации действующих значений напряжения.

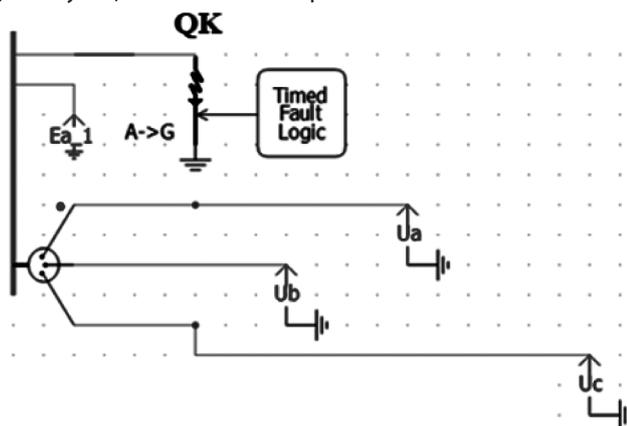


Рис. 3. Фрагмент компьютерной модели

### Результаты

Моделирование возникновения однофазного КЗ производилось с помощью короткозамыкателя QK. Он осуществлял замыкание фазы А на землю (вид повреждения указан рядом с пиктограммой этого компонента, он указывается автоматически после выбора вида повреждения) в установленный при наладке модели момент времени.

Таким образом, в модели системы электроснабжения производились измерения напряжений фаз относительно земли с регистрацией величин этих напряжений, как в виде графика, так и в виде числовых показаний измерительных приборов (действующие значения).

На рисунке 4 приведен фрагмент графика фазных напряжений в исследуемой модели. До момента времени

1,0 с существовал установившийся режим, после этого момента времени — однофазное КЗ. По графику хорошо видно, что после возникновения однофазного КЗ напряжение фазы А становится практически равным нулю, а напряжения неповрежденных фаз В и С возрастают.

Для более полного исследования влияния величины сопротивления заземления нейтрали обмотки силового трансформатора с номинальным напряжением 20 кВ (сторона НН), к которой подключается кабельная сеть среднего напряжения, было выполнено моделирование возникновения однофазного КЗ при различных значениях сопротивления заземления нейтрали. При этом моделировании фиксировались значения напряжений фаз в предшествующем (нормальном) режиме работы и в режиме замыкания фазы А на землю. Результаты данного моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты моделирования нормального и аварийного режимов работы исследуемой системы электроснабжения

R, Ом	U <sub>A</sub> , кВ	U <sub>B</sub> , кВ	U <sub>C</sub> , кВ
1	12,83/0,09	12,83/16,30	12,83/17,85
2	12,83/0,05	12,83/19,42	12,83/21,62
5	12,83/0,02	12,83/21,50	12,83/23,38
12	12,83/0,01	12,83/22,22	12,83/22,23
15	12,83/0,01	12,83/22,32	12,83/22,98
20	12,83/0,00	12,83/22,42	12,83/22,92
25	12,83/0,00	12,83/22,48	12,83/22,88
30	12,83/0,00	12,83/22,51	12,83/22,86
50	12,83/0,00	12,83/22,58	12,83/22,80

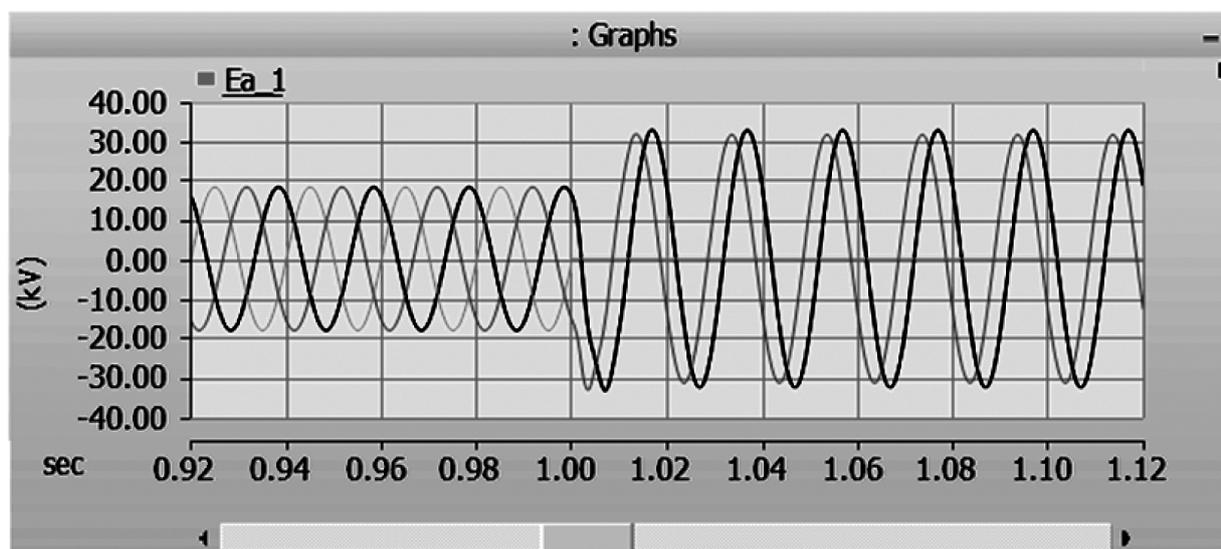


Рис. 4. График фазных напряжений до и после возникновения однофазного короткого замыкания

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, при возникновении однофазного КЗ происходит возрастание напряжения на неповрежденных фазах.

Для более полного анализа полученной информации произведем обработку полученных данных. В ходе обработки данных рассчитывались значения коэффициентов, выражающих отношения напряжений на неповрежденных фазах в режиме однофазного КЗ и нормальном режиме работы для фазы В и фазы С соответственно, как:

$$K_B = \frac{U_{BK}}{U_{BH}},$$

$$K_C = \frac{U_{CK}}{U_{CH}},$$

где  $U_{BK}$  и  $U_{CK}$  — напряжения на фазах В и С в режиме однофазного КЗ;  $U_{BH}$  и  $U_{CH}$  — напряжения на фазах В и С в нормальном режиме работы.

Полученные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Отношения напряжений на неповрежденных фазах

R, Ом	$K_B$ , кВ	$K_C$ , кВ
1	1,27	1,39
2	1,51	1,69
5	1,68	1,82
12	1,73	1,73
15	1,74	1,79
20	1,75	1,79
25	1,75	1,78
30	1,75	1,78
50	1,76	1,78

### Обсуждение

Произведем анализ данных, приведенных в табл. 1. Если сопротивление резистора, осуществляющего заземление нейтрали, составляет 12 Ом (как приведено в [3]), то при такой величине этого сопротивления в режиме однофазного КЗ на землю на неповрежденных фазах возникает напряжение, равное междуфазному или линейному значению.

Данная ситуация практически соответствует режиму изолированной нейтрали по величине напряжений на неповрежденных фазах. Конечно, в отличие от изолированной нейтрали, в системе с резистивно-заземленной нейтралью (особенно в случае применения низкоомного заземления нейтрали) замыкание одной фазы на землю является аварийным режимом, требующим быстрого отключения возникающего повреждения.

Поэтому в данном случае исключается длительное воздействие повышенного напряжения на изоляцию токоведущих частей и электрооборудования. Но все же такое повышение напряжения следует учитывать при разработке электрооборудования и проектировании электрических сетей среднего напряжения, работающих в режиме низкоомного заземления нейтрали питающей обмотки силовых трансформаторов.

Также повышение напряжения, пусть и кратковременное, может послужить причиной для возникновения насыщения стали магнитопроводов трансформаторов напряжения и резкого изменения индуктивного сопротивления первичной обмотки. Это явление может послужить причиной резонанса при определенном сочетании параметров элементов между индуктивностью первичной обмотки трансформатора напряжения и емкостью кабельных линий.

### Заключение

Разработанная авторами статьи компьютерная модель может использоваться для анализа режимов работы электрической сети среднего напряжения с низкоомным заземлением нейтрали. При проведении моделирования было выявлено, что работа такой сети с сопротивлением заземления нейтрали, равным 12 Ом, при однофазном замыкании на землю сопровождается повышением напряжения на неповрежденных фазах этой сети от фазного до междуфазного значения.

Такой рост напряжения, несмотря на его кратковременность, обусловленную срабатыванием релейной защиты и отключением поврежденного элемента сети, может негативно сказываться на работе электрооборудования. Для снижения такого негативного воздействия целесообразно снижать величину сопротивления заземления нейтрали, обязательно рассматривая при этом возможные последствия от возрастания тока однофазного КЗ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев, Г.М., Зиганшин, А.Г. Возможность влияния современных технологий на режим нейтрали электрических сетей // Вестник Чувашского университета. 2021. №3. С. 103–112. doi: 10.47026/1810-1909-2021-3-103-112.
2. Майоров, А.В., Челазнов, А.А., Ильиных, М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. №6. С. 23–29.
3. Короткевич, М.А., Подгайский, С.И., Голомуздов, А.В. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. №5. С. 417–432.
4. Бакиров, А.Р., Васильева, А.Ю., Ширковец, А.И., Телегин, А.В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №4. С. 328–334.
5. Евминов, Л.И., Алферова, Т.В. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6–35 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2019. №4 (25). С. 94–109.
6. Евминов Л.И., Алферова Т.В. Применение резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2022. №2 (89). С. 53–67.
7. Лоскутов, А.А., Кузина, О.В. Анализ применения резистивного заземления нейтрали в распределительных сетях на основе имитационного моделирования // Интеллектуальная электротехника. 2019. №2. С.61–71.
8. Куликова, Н.А., Титаренко, О.Н., Тяпкина, В.А. Резистивное заземление нейтрали — способ повышения надёжности работы электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–38.
9. Ощепков, В.А., Владимиров, Л.В., Плотников, Д.И., Шакинов, Е.Е., Мельников, С.А., Паламарчук, Д.В. Влияние режима работы нейтрали распределительных электрических сетей на уровень перенапряжений при однофазном замыкании на землю // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. №1 (67). С. 119–123. doi: 10.23670/IRJ.2018.67.090.
10. Ляхомский, А.В., Герасимов, А.И., Перфильева, Е.Н. Моделирование режимов однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6 кВ открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №2. С. 164–178. doi: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-164-178.
11. Андреев, А.А. Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. №4 (72). С. 56–70. doi: 10.14498/tech.2021.4.5.
12. Булычев, А.В. Выбор параметров срабатывания защит от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях при разных режимах нейтрали // Релейная защита и автоматизация. 2022. №1(46). С. 36–45.
13. Куликова, Н.А., Титаренко, О.Н., Тяпкина, В.А. Резистивное заземление нейтрали — способ повышения надёжности работ электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–38.
14. Кузьмин И.А., Магдеев Н.Н., Евдокунин Г.А., Брилинский А.С., Грунина О.И. Переход к резистивному заземлению нейтрали в сети 6–10 кВ ПАО «Ленэнерго» как шаг на пути к автоматизации // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3(10). С. 18–25.