

УДК 621.316.925.1

Выявление однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

Углова М.Б.¹, Пантюхова Н.Н.², Гайдук С.В.³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия.¹mbuglova@mail.sevsu.ru, ²pantuhova34@gmail.com, ³svgaidyk@sevsu.ru

Статья поступила 05.05.2025 г.; после доработки 20.05.2025 г.

Аннотация

Проведен анализ современных методов выявления однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью (6–35 кВ) системы электроснабжения собственных нужд электростанций. Рассмотрены способы технической реализации защит, реагирующие на следующие признаки: емкостной ток и напряжение нулевой последовательности, токи нулевой последовательности, создаваемые искусственным путем, высшие гармоники в установившемся режиме, токи переходного режима. Проведен сравнительный анализ методов по четырем свойствам релейной защиты: селективность, быстрдействие, чувствительность и надежность. Дополнительно оценена сложность технической реализации и требования к применяемым измерительным и исполнительным органам (трансформаторам тока и реле). На основе сравнения выбран наиболее оптимальный метод – выявление однофазного замыкания на землю при помощи токов нулевой последовательности, создаваемых искусственным путем.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, система собственных нужд, изолированная нейтраль, напряжение и ток нулевой последовательности, высшие гармоники, переходные процессы, релейная защита.

Detecting of a single phase-to-ground fault in a network with an isolated neutral

Uglova M.B.¹, Pantyukhova N.N.², Gaiduk S.V.³FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia.¹mbuglova@mail.sevsu.ru, ²pantuhova34@gmail.com, ³svgaidyk@sevsu.ru

Received 05.05.2025 y.; received in final form 20.05.2025 y.

Abstract

The analysis of modern methods for detecting single-phase ground faults (SPGF) in 6–35 kV isolated neutral networks of power plants' auxiliary power supply systems has been conducted. The study examines technical implementations of protection devices responding to the following parameters: capacitive current and zero-sequence voltage, artificially generated zero-sequence currents, higher harmonics in steady-state conditions, and transient currents. A comparative analysis of the methods has been performed according to four key relay protection characteristics: selectivity, response speed, sensitivity, and reliability. The technical implementation complexity and requirements for measurement and control components (current transformers and relays) have been additionally evaluated. Based on the comprehensive comparison, the most optimal method has been identified – single-phase ground fault detection using artificially generated zero-sequence currents.

Keywords: single-phase earth fault, self-contained system, isolated neutral, voltage and current of the zero sequence, higher harmonics, transients, relay protection.

Введение

Система электроснабжения собственных

нужд электростанций является важным элементом энергосистемы, отвечающим за сохранность

генерирующего и вспомогательного оборудования, а также за обеспечение технологического процесса выработки электроэнергии. Данное оборудование имеет номинальное напряжение 6–35 кВ, что соответствует регламентируемому п 1.2.16 ПУЭ [1] режиму работу нейтрали в отечественных сетях, а именно режим изолированной нейтрали или компенсированной нейтрали, заземленной через большое индуктивное сопротивление дугогасящего реактора или через активное сопротивление. Режим работы нейтрали определяет величину тока в месте повреждения, возможный уровень перенапряжений на фазах, требования к фазной и линейной изоляции электрооборудования, устройство и принципы действия релейной защиты, вероятность возникновения феррорезонанса при неустойчивом (дуговом) замыкании в месте повреждения. Таким образом, применение изолированной нейтрали имеет ряд преимуществ: отсутствие превышения установленных ПУЭ токов при однофазном замыкании на землю, отсутствие искажений значений междуфазных напряжения с последующим сохранением работоспособности и сокращением перерывов в электроснабжении потребителей при возникновении однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), что делает возможным выполнение действия защиты не только на отключение, но и на сигнал. Однако изолированная нейтраль подразумевает и наличие недостатков, а именно – при неустойчивых ОЗЗ, сопровождающихся перемежающейся дугой, наблюдается повышение вероятности появления феррорезонанса, перенапряжений высокой кратности на неповрежденных фазах, ведущих к повреждению изоляции, выходу из строя электрооборудования и дальнейший переход от аномального режима работы сети к аварийному с возникновением двухфазного короткого замыкания или двойного замыкания на землю. Кроме того, ток однофазного замыкания вблизи места замыкания на землю представляет опасность для жизни персонала.

Величина тока замыкания на землю определяется как утроенное значение емкостного тока нулевой последовательности. Защиты от замыкания на землю независимо от режима компенсации должны быть селективными и иметь высокую чувствительность, что осложняется величиной тока замыкания, находящегося в пределах до 30 А и требует применение устройств релейной защиты с возможностью выставления необходимых уставок и трансформаторов тока с минимальными погрешностями для достоверной трансформации первичного тока замыкания. Все применяемые устройства релейной защиты

можно подразделить на четыре группы [3], реагирующие:

- 1) на естественный емкостной ток сети (при отсутствии компенсации или при наличии перекомпенсации емкостного тока сети);
- 2) на токи нулевой последовательности, создаваемые искусственным путем;
- 3) на токи высших гармоник, возникающие в поврежденной линии при резонансной компенсации емкостных токов в установившемся режиме;
- 4) на токи переходного режима, возникающие в первый момент замыкания на землю.

Выявление ОЗЗ с помощью емкостного тока и напряжения нулевой последовательности

Применение линейных трансформаторов тока нецелесообразно по причине сравнительно большого коэффициента трансформации, обусловленного током нагрузки линии, вследствие чего вторичный ток замыкания имеет очень малое значение. Для включения на такой ток, необходимо выбрать соответствующее токовое реле с большим сопротивлением обмотки, что приводит только к частичной трансформации и попаданию тока в реле, тогда как другая часть вторичного тока замыкается на вторичные обмотки трансформаторов тока неповрежденных фаз. Это свидетельствует об отсутствии требуемой чувствительности и необходимости применения более точного измерительного оборудования.

Для выполнения чувствительной селективной сигнализации о выявлении ОЗЗ необходимо использовать специальные трансформаторы тока нулевой последовательности (рис. 1), имеющие во вторичной обмотке малые токи небаланса, зависящие только от несимметрии расположения фаз первичного тока [3].

Токи трех фаз создают соответствующие магнитные потоки, которые, складываясь, образуют результирующий поток. Так как сумма токов трех фаз определяется как утроенное значение тока нулевой последовательности, то можно утверждать, что результирующий магнитный поток также пропорционален току нулевой последовательности. Поток $\Phi_{рез}$, вторичная ЭДС E_2 и вторичный ток I_2 могут возникнуть только при условии, что сумма токов не равна нулю, то есть при наличии тока нулевой последовательности, появляющейся при замыкании фазы на землю. В режиме нагрузки и при многофазных коротких замыканиях во вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности будет

протекать сумма токов фаз, равная нулю, и поэтому ток в реле отсутствует.

Кроме того, при прохождении токов по оболочке неповрежденного кабеля, проходящего через трансформатор тока нулевой последовательности, может возникнуть ток небаланса, который спровоцирует срабатывание защиты. Этот ток небаланса появляется при замыканиях на землю в других частях сети вблизи кабеля или при работе сварочных аппаратов. Для исключения ложной работы защиты необходимо компенсировать влияние блуждающих токов, замыкающихся по броневой оболочке кабеля, что достигается изолированием от земли воронки и оболочки кабеля (рисунок 1, в). При таком исполнении ток, проходящий по оболочке кабеля, возвращается по заземляющему проводу, вследствие чего магнитные потоки от тока броневой оболочки и провода в магнитопроводе взаимно уничтожаются, предотвращая ложное срабатывание. Таким образом селективность действия защиты основана на различии абсолютных значений токов $3I_0$ в защищаемой линии при замыкании на ней и замыкании на землю внешнем.

Для получения максимальной мощности от трансформатора тока нулевой последовательности, а значит и максимальной чувствительности реле, необходимо обеспечить равенство сопротивления обмотки реле сопротивлению самого трансформатора тока нулевой последовательности. Из эквивалентной схемы замещения (рисунок 1, б) видно, что при выполнении условия $Z_p = Z_{нам}$ вторичный ток и ток намагничивания оказываются одинаковыми $I_p = I_{нам}$, отсюда следует, что погрешность трансформатора достигает около 50%. Поэтому чувствительность защиты оценивается по первичному току, при котором обеспечивается действие защиты. В ряде случаев она должна быть на уровне долей ампера. При малых значениях трансформатор тока нулевой последовательности работает в начальной части характеристики намагничивания, при которой магнитодвижущая сила, созданная одновитковым трансформатором тока нулевой последовательности, очень мала. Таким образом, для обеспечения необходимой чувствительности, кроме конструктивных улучшений трансформаторов тока нулевой последовательности, требуется применение высокочувствительных исполнительных органов.

Токовое реле, подключенное к вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности, служит измерительным органом защиты и действует на сигнал через реле времени. В качестве измерительного органа применимо

электромеханическое реле РТ-40/2 или реле на полупроводниковой базе РТЗ-50. Целесообразней использовать последнее, так как защита может осуществить свою функцию даже при значении первичного тока замыкания в 1–2 А (диапазон регулирования уставки в пределах 10–60 мА). Также возможно применение реле типа РТЗ -51, выполненное на интегральных микросхемах. Данный тип реле имеет шесть диапазонов срабатывания по току – от 0,02 до 0,12 А, при это $k_b = 0,93$. Таким образом, предложенные реле имеют достаточную чувствительность и могут быть широко использованы в выявлении однофазного замыкания на землю.

Выявление ОЗЗ при помощи токов нулевой последовательности, создаваемых искусственным путем

В ряде случаев естественные токи нулевой последовательности недостаточны для надежной работы релейной защиты, особенно при высокоомных замыканиях (при переходном сопротивлении в месте КЗ $> 1–5$ кОм).

Поэтому для повышения чувствительности обнаружения однофазных замыканий на землю применяется метод создания токов нулевой последовательности искусственным путем, позволяющие увеличить сигнал повреждения и обеспечить селективность защит.

Суть метода заключается в заземлении нейтрали сети через активное сопротивление. Для создания и заземления нейтрали сети устанавливаются трансформаторы со схемой соединения «звезда-треугольник» (типа ТСЗК-63/10) с включенными между нейтралью обмотки высокого напряжения и контуром заземления двумя параллельно соединенными бетэловыми резисторами сопротивлением 200 Ом (рис. 2). Это позволяет повысить ток замыкания на землю до значений, достаточных для работы релейной защиты. Сигнал о замыкании регистрируется по появлению тока нулевой последовательности через специальные трансформаторы тока и чувствительные реле.

Таким образом, достигается повышение чувствительности к обнаружению замыканий на землю за счет увеличенного тока нулевой последовательности. Также достигается необходимая селективность выявления замыканий на конкретных присоединениях за счет использования направленных защит и чувствительных токовых реле стандартного исполнения (РТЗ-51, РТЗ-50, РТ-40/2). Частичное заземление нейтрали через активное сопротивление дополнительно сни-

жает перенапряжения в сети при дуговых замыканиях и производит эффективное гашение дуги, что особенно важно для систем электроснабжения собственных нужд, где требуется высокая степень надежности питания асинхронной нагрузки [3].

Однако вышеупомянутый способ отличается особенностями, которые препятствуют безукоризненной работе системы собственных нужд:

- увеличение токов замыкания до 40 А и выше, что может приводить к развитию повреждений при длительном замыкании, особенно в

ремонтных режимах;

- при ложном срабатывании защиты возможно нежелательное отключение секций собственных нужд, а значит снижается надежность питания;
- требуется выдержка времени для защиты от неотключаемых замыканий, что ухудшает условия резервирования питания;
- необходимость дополнительного оборудования.

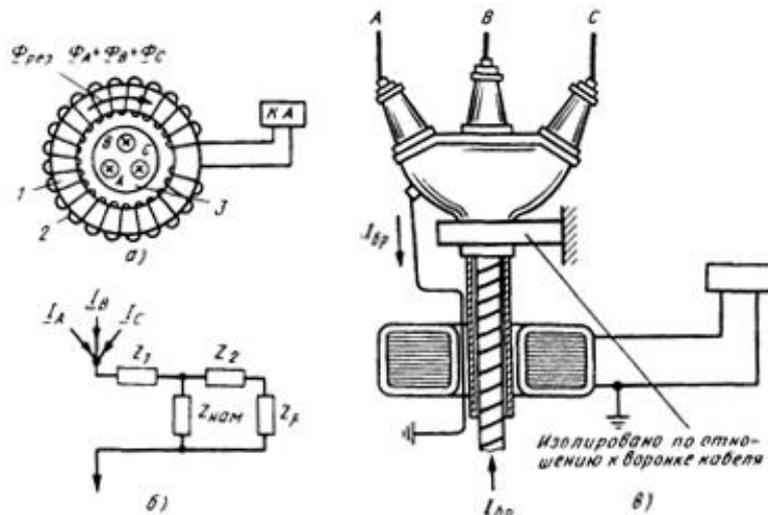


Рис. 1. Трансформатор тока нулевой последовательности: а – устройство; б – схема замещения; в – установка ТНП на кабеле; 1 – магнитопровод; 2 – вторичная обмотка; 3 – трехфазный силовой кабель.

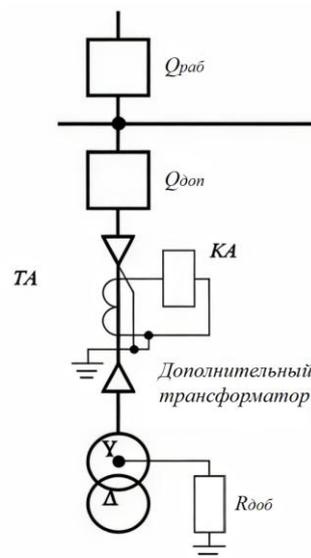


Рис. 2. Схема подключения дополнительного трансформатора к распределительному устройству собственных нужд при выполнении частичного заземления нейтрали сети

Эти риски отражены и в анализе ПУЭ 7-го издания, где подчеркивается важность селективности и чувствительности защиты (п. 1.7.78–1.7.82 [2]).

Для электростанций применение данного метода требует выполнения ряда обязательных условий:

- отключение должно происходить без выдержки времени на присоединениях электродвигателей и дизель-генераторов;
- на секциях надежного питания – защита должна работать преимущественно на сигнал при выполнении функций безопасности, с возможностью перевода на отключение в нормальных режимах;
- выдержка времени на отключение ввода рабочего питания – порядка 0,5–1,0 секунд для предотвращения отказов схемы АВР (автоматического ввода резерва);
- контроль правильности функционирования защиты осуществляется в строгом соответствии с требованиями ПУЭ [2].

Выявление ОЗЗ при помощи высших гармоник в установившемся режиме

В установившемся режиме замыканий на землю емкостные токи повреждения и токи нулевой последовательности содержат кроме тока рабочей частоты 50 Гц составляющие высших гармоник. В сетях с компенсированной нейтралью сглаживаются лишь основные гармоники емкостного тока замыкания на землю ($3I_0$ и I_3), тогда как высшие гармоники остаются некомпенсированными.

Кроме того, из-за нелинейности характеристики намагничивания дугогасящего реактора, его индуктивный ток ($I_{дгр}$) также содержит высшие гармоники. Эти гармоники суммируются с гармониками естественного емкостного тока в поврежденной линии электропередачи. Таким образом, высшие гармоники в токе I_3 и I_0 , имеют место как в некомпенсированной, так и компенсированной сетях. Высшие гармоники в токах возникают из-за наличия гармоник в фазных напряжениях и напряжении U_0 , под действием которых появляются эти токи.

Искажение формы напряжения возникает из-за падения напряжения на сопротивлениях элементов сети, вызванного несинусоидальными токами намагничивания силовых трансформаторов, а также некоторыми видами нагрузки. Дополнительным фактором являются высшие гармоники в ЭДС генераторов. Частотный состав и амплитуды этих гармоник могут меняться при

изменении конфигурации сети, состава работающих трансформаторов и характера нелинейной нагрузки. В реальных условиях доля высших гармоник в токах достигает 5 – 15% от основной гармоники (50 Гц), а их частотный диапазон составляет 150 – 1000 Гц.

Как известно, токи неповрежденных линий, сходящиеся в месте замыкания, суммируются в поврежденной линии. Соответственно, высшие гармоники тока в аварийном присоединении равны сумме гармонических составляющих всех неповрежденных линий. В сетях с компенсированной нейтралью к этой сумме добавляются гармоники тока дугогасящего реактора.

В результате количество, амплитуды и общий уровень гармоник в токе поврежденной линии всегда превышают соответствующие показатели любой из неповрежденных линий. Это различие используется для построения селективных релейных защит, работающих на основе высших гармоник. Существует три основных принципа их действия:

- 1) Абсолютное значение гармоник – защита сравнивает уровень высших гармоник в каждом присоединении с заданной уставкой.
- 2) Относительное сравнение – уровни гармоник всех линий сопоставляются между собой, и поврежденной считается линия с наибольшим значением.
- 3) Сравнение с эталонной моделью – ток в каждом присоединении проверяется на соответствие модели линии с заведомо большим емкостным током.

Таким образом, различие в гармоническом составе токов позволяет селективно выявлять поврежденные участки сети. Кроме того, за счет применения частотных фильтров и релейных защит для анализа гармоник метод можно считать достаточно чувствительным.

Отстройка от переходных процессов осуществляется следующим образом: при переходных процессах высшие гармоники токов неповрежденных фаз быстро затухают, а в установившемся режиме остаются только при замыкании, что уменьшает количество ложных срабатываний.

Применение метода сопряжено с определенными проблемами:

- необходимость сложной фильтрации с установкой частотных фильтров для отделения высших гармоник (LC-фильтры, настроенные на пропуск частот 150 – 200 Гц и подавление основной гармоники 50 Гц);
- зависимость спектрального состава токов от

структуры и конфигурации сети;

- при наличии значительных искажений синусоиды даже без замыканий возможны ложные сигналы для срабатывания защиты;
- требуется точная настройка уставок чувствительности и фильтров по месту.

Таким образом, в системе собственных нужд электростанций применение метода контроля высших гармоник целесообразно при наличии разветвленной электрической сети и наличии компенсированной нейтрали для повышения надежности сигнализации о замыканиях на землю без немедленного отключения секций. Может использоваться в сочетании с другими методами для резервирования систем защиты.

Выявление ОЗЗ при помощи токов переходного режима

Метод основан на анализе переходных процессов, возникающих в сети в начальный момент возникновения однофазного замыкания на землю. Во время замыкания возникает резкое перераспределение зарядов в емкостях фаз относительно земли. Этот процесс носит характер периодических токов с затухающими амплитудами, чья частота и скорость затухания зависит от величин сопротивлений зарядного и разрядного контуров.

Ключевая особенность заключается в том, что токи переходного процесса имеют намного большую амплитуду (в 3–5 раз превышающую установившиеся емкостные токи) и выраженные частотные характеристики, которые быстро затухают через несколько десятков миллисекунд. Кроме того, переходной процесс сопровождается появлением кратковременных импульсов токов нулевой последовательности, что дает возможность выявить поврежденное присоединение по величине и направлению переходного тока [3].

В качестве измерительного органа может применяться реле, реагирующее на амплитуду переходного тока. Такое реле должно обладать быстродействием ($t_{CP} < 0,1$ с). При значительных начальных амплитудах защита может подключаться либо к трехтрансформаторному фильтру токов нулевой последовательности, либо к обычным трансформаторам тока нулевой последовательности на ток $3I_0$, при этом в измерительную цепь включается фильтр, пропускающий только высокочастотные составляющие (свыше 1000–2000 Гц).

Селективность защиты, как и в случае с гармоническими составляющими установившегося

режима, обеспечивается за счет разницы в величине и направлении переходного тока в поврежденной и неповрежденных линиях. В поврежденной линии (на участке между местом КЗ и шиной подстанции Р) этот ток равен сумме токов всех неповрежденных присоединений.

Конструктивно защита может быть реализована двумя способами:

- с абсолютной уставкой по току в каждом присоединении;
- с относительным сравнением токов между присоединениями для выявления поврежденного участка по максимальному значению.

Несмотря на перспективность защиты на переходных токах пока не получили широкого распространения, однако активные разработки в этом направлении ведутся.

Альтернативным решением может быть применение реле направления мощности, реагирующего на направление (знак) электромагнитной волны тока. Это означает, что можно выполнить селективную защиту, срабатывающую при положительном знаке и протекании мощности от шин к точке повреждения на присоединении и недействующую при отрицательном знаке на неповрежденных присоединениях. Измерительный орган такой защиты должен выполняться с помощью быстродействующего реле направления мощности, способного подействовать от первого импульса мгновенной мощности S , пришедшего к месту установки защиты на фронте волны тока и напряжения и запомнить его.

Серийно выпускается и применяется в эксплуатации импульсное устройство релейной защиты типа ИЗС, выполненное на интегральных микросхемах. Токовые цепи устройства ИЗС могут подключаться к трансформаторам тока нулевой последовательности или к трех трансформаторному фильтру. Цепи напряжения подключаются к обмоткам измерительного трансформатора напряжения, соединенным в разомкнутый треугольник.

Таким образом, достигается требуемая селективность: токи переходного режима в поврежденной линии существенно больше, чем в неповрежденных. Обеспечивается высокая чувствительность, позволяющая выявить замыкания при токах меньше 1 А в установившемся режиме, вместе с этим и быстродействие, и локализация замыкания, не требующая для срабатывания защиты наступления установившегося режима. Отличительной чертой данного метода является и независимость от способа заземления нейтрали. Эти преимущества делают метод особенно эффективным для сетей собственных

нужд электростанций, где требуется максимально быстрое обнаружение дефектов.

Однако необходимо и применение высокоточной и быстродействующей аппаратуры, способной произвести отделение переходных токов от помех и установившихся токов. Важен точный подбор уставок, исключающих ложное срабатывание при включении мощных нагрузок, таких как двигатели и сварочные аппараты, и от внешних коротких замыканий.

Выводы

Метод выявления ОЗЗ по естественным емкостным токам подходит только для простых сетей без компенсации. На электростанциях, где сеть сложная, разветвленная и содержит дугогасящие реакторы или резисторы в нейтрали, этот способ малопригоден. Он не обеспечивает нужную селективность и чувствительность для сетей собственных нужд 6–10 кВ.

Применение искусственно создаваемых токов нулевой последовательности – основной и наиболее распространенный способ выявления ОЗЗ в сетях собственных нужд электростанций. Используется активно благодаря высокому уровню селективности, чувствительности и приемлемой простоте реализации. Именно этот способ прописан в рекомендациях для АЭС, ТЭС и ГРЭС (например, через трансформаторы ТСЗК-63/10 с резисторами) [2].

Метод выявления ОЗЗ по токам высших гармоник используется в основном в сетях с компенсированной нейтралью, где обычный ток замыкания мал. Помогает повысить чувствительность, но как самостоятельный метод редко используется из-за зависимости от качества напряжения и сетевых искажений.

Метод выявления ОЗЗ по токам переходного режима – наиболее прогрессивный метод, обладающий высочайшей чувствительностью и быстродействием. Однако требует применения современной цифровой техники, точной настройки и защиты от помех. На новых энергоблоках и современных электростанциях активно внедряется в дополнение к методам искусственного создания токов нулевой последовательности.

Можно сделать вывод, что для систем электроснабжения собственных нужд электростанций наиболее эффективным и широко применяемым методом является метод выявления ОЗЗ по токам нулевой последовательности, создаваемым искусственным путем (способ №2). В пер-

спективных проектах он комбинируется с методом по токам переходного режима (способ №4) для повышения чувствительности и скорости обнаружения повреждений, особенно при малых токах замыкания.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Раздел 1. Общие правила. Глава 1.2. Электропитание и электрические сети. (Издание седьмое), утв. Прик. Минэнерго России от 08.07.2002 №204. «Сфера», М. 2002.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Раздел 1. Общие правила. Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности. (Издание седьмое), утв. Прик. Минэнерго России от 08.07.2002 №204. «Сфера», М. 2002.
3. Эксплуатация релейной защиты электрооборудования электрических станций. Конспект лекций по дисциплине: учебное пособие для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электрические станции». В двух частях. Ч. 1 / М.Б. Углова, А.В. Углов; Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2023. – 101 с.: ил. – Текст: непосредственный.

References

1. Rules of Electrical Installations Design (Russian Electrical Code). Section 1. General rules. Chapter 1.2. Power supply and electrical networks. (Seventh edition), approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia dated 08.07.2002 No. 204. «Sphere», M. 2002.
2. Rules of Electrical Installations Design (Russian Electrical Code). Section 1. General rules. Chapter 1.7. Grounding and protective measures of electrical safety. (Seventh edition), approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia dated 08.07.2002 No. 204. «Sphere», M. 2002.
3. Operation of relay protection of electrical equipment of electric power plants. Lecture notes on the discipline: a textbook for students of the field of study 13.04.02 "Electric power engineering and electrical engineering" profile "Electric power stations". In two parts. Part 1 / M.B. Uglova, A.V. Uglov; Sevastopol State University. Sevastopol: SevGU, 2023. 101 p.: ill. – Text: direct.