

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Сорокин А.В., аспирант гр. А0971-19-01, 2 курс
Научный руководитель: Шабанов В.А., к.т.н., профессор
Уфимский государственный нефтяной технический университет
г.Уфа

Аннотация. В статье предложен и описан метод определения тока однофазного замыкания на землю. Описан алгоритм и проведен анализ работы метода, в зависимости от различных условий работы.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, изолированная нейтраль, ток однофазного замыкания на землю.

Согласно различным источникам, однофазные замыкания (ОЗЗ) на землю являются наиболее распространённым проблемой в сетях 6-35кВ. Хотя с ОЗЗ допускается работа линии в некоторых сетях, в течении ограниченного времени, это может привести к различным проблемам. Наиболее распространёнными из них являются переход в междуфазные короткие замыкания, поражение электрическим током людей и животных, феррорезонанс, перемежающаяся дуга и т.д. [1]

Принцип действия наиболее распространённых устройств релейной защиты и автоматики от однофазных замыканий на землю основан на измерении и анализе тока нулевой последовательности. Как известно, выделение тока нулевой последовательности производится с помощью фильтров нулевой последовательности. [2]



Рисунок 1- структурная схема, поясняющая классификацию фильтров тока нулевой последовательности.

Фильтры нулевой последовательности предназначены для выделения тока нулевой последовательности в месте установки устройства защиты, т.е. в начале линии. Фильтры нулевой последовательности, установленные на неповрежденных линиях, выделяют ток нулевой последовательности, тех линий на которых они установлены. Фильтры нулевой последовательности, установленные в начале поврежденной линии, выделяют суммарный емкостной ток неповрежденных элементов сети, что меньше реальной

величины тока однофазного замыкания на землю на емкостной ток поврежденной линии. То есть реальная величина тока однофазного замыкания на землю может значительно отличаться от тока $3I_0$, замеренного в начале линии. [3]

Все методы, позволяющие определить величину тока однофазного замыкания, можно условно разделить на две группы: аналитические и измерительные.

К аналитическим методам относятся метод моделирования и всевозможные расчетные методы. Данные методы позволяют произвести расчет уставок РЗА и определить емкостной ток сети, но они не учитывают ряд важных параметров, а именно: влияние переходного сопротивления, параметры сети в конкретный момент времени и изменения параметров линий, связанных со старением изоляции.

Наиболее распространенные измерительные методы: включение конденсатора в одну из фаз, искусственное смещение нейтрали и создание искусственного замыкания. [4]

Известны более современные разработки алгоритмов определения тока однофазного замыкания на землю. [5,6,7] Также разрабатываются методы определения тока однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях. [8]

Преимущество данного метода заключается в том, что измерение производится в момент возникновения однофазного замыкания на землю и соответственно учитываются все реальные параметры сети и в данный момент (влияние переходного сопротивления замыкания, реальная емкость сети в момент возникновения ОЗЗ и температурное влияние). К тому же, этот метод не требует ни подключения дополнительных устройств (конденсатора, источника напряжения (тока)), ни выполнения сложных, многоступенчатых операций. Он может быть реализован в современном микропроцессорном терминале релейной защиты и автоматики.

Данная методика определения тока однофазного замыкания имеет свою актуальность для создания и реализации принципиально новых устройств релейной защиты и ОМП, для корректной работы алгоритмов которых, необходима точная информация о величине тока однофазного замыкания.

Нормальный режим работы сети. Как известно, линии обладают распределенной емкостью, поэтому в нормальном режиме работы сети кроме тока нагрузки в линии протекают емкостные токи, обусловленные емкостью линии. Произвести измерение этих токов возможно только методом двустороннего замера. Выделить из фазного тока ток нагрузки или емкостной ток односторонним замером невозможно.

Если пренебречь междуфазной емкостью линии и активной проводимостью изоляции линии, то можно сказать, под действием фазного напряжения в линиях сети, помимо тока нагрузки, протекают емкостные токи, опережающие соответствующие фазные напряжения на 90° . В таком случае,

для симметричного режима работы сети будут справедливы следующие выражения:

$$\underline{I}_{-A}^{HP} = \underline{I}_{A(C)}^{HP} + \underline{I}_{наг_A}; \quad (1)$$

$$\underline{I}_{-B}^{HP} = \underline{I}_{B(C)}^{HP} + \underline{I}_{наг_B}; \quad (2)$$

$$\underline{I}_{-C}^{HP} = \underline{I}_{C(C)}^{HP} + \underline{I}_{наг_C}; \quad (3)$$

где:

$\underline{I}_{-A}^{HP}, \underline{I}_{-B}^{HP}, \underline{I}_{-C}^{HP}$ - фазные токи, нормального режима работы сети;

$\underline{I}_{A(C)}^{HP}, \underline{I}_{B(C)}^{HP}, \underline{I}_{C(C)}^{HP}$, - емкостные токи, нормального режима работы сети;

$\underline{I}_{наг_A}, \underline{I}_{наг_B}, \underline{I}_{наг_C}$ - фазные токи нагрузки, нормального режима работы сети.

Т.к. сдвиг между напряжениями сети 120° , то таким же он будет и для этих емкостных токов, соответственно их геометрическая сумма равна 0: [9]

$$\underline{I}_{A(C)}^{HP} + \underline{I}_{B(C)}^{HP} + \underline{I}_{C(C)}^{HP} = 0; \quad (4)$$

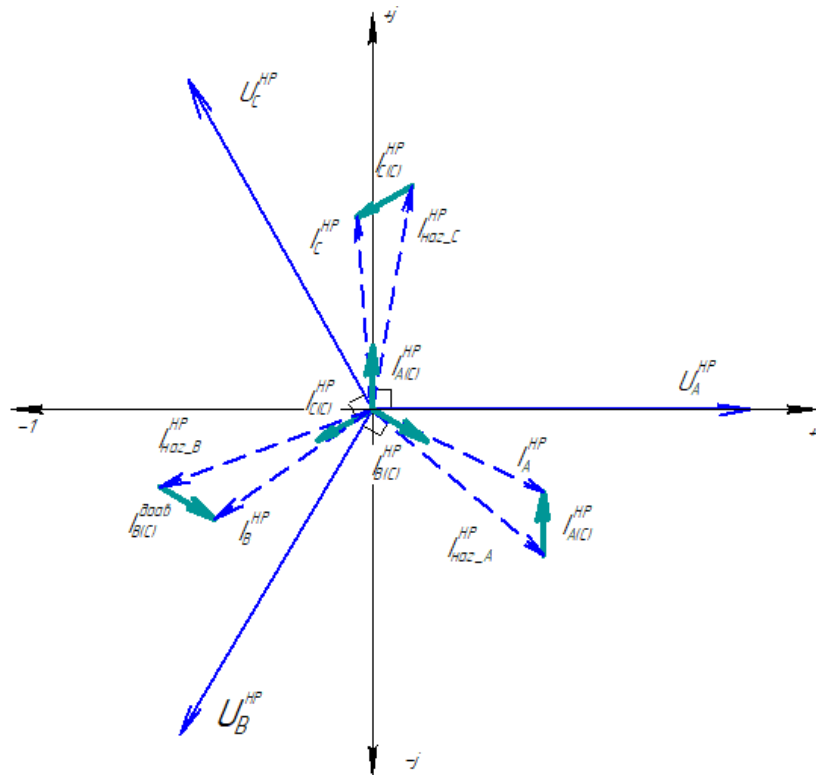


Рисунок 2 – векторная диаграмма, демонстрирующая емкостные токи и соответствующие напряжения в нормальном режиме.

Режим однофазного замыкания на землю. Как известно, при металлическом однофазном металлическом замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжения на неповрежденных фазах увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, а сдвиг между напряжениями равен 60° . Под действием этих напряжений в здоровых фазах линий сети протекают емкостные токи опережающие напряжения соответствующие напряжения на 90° . Емкостные токи неповрежденных фаз в режиме ОЗЗ увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с аналогичными токами нормального режима: [9]

$$\underline{I}_{B(C)}^{O33} = -j \frac{\underline{U}_B^{O33}}{\omega \cdot C_{\Sigma}}; \quad (5)$$

$$\underline{I}_{C(C)}^{O33} = -j \frac{\underline{U}_C^{O33}}{\omega \cdot C_{\Sigma}}; \quad (6)$$

где:

$\underline{U}_B^{O33}; \underline{U}_C^{O33}$ - напряжения неповрежденных фаз В и С в режиме ОЗЗ;

C_{Σ} - суммарная емкость сети.

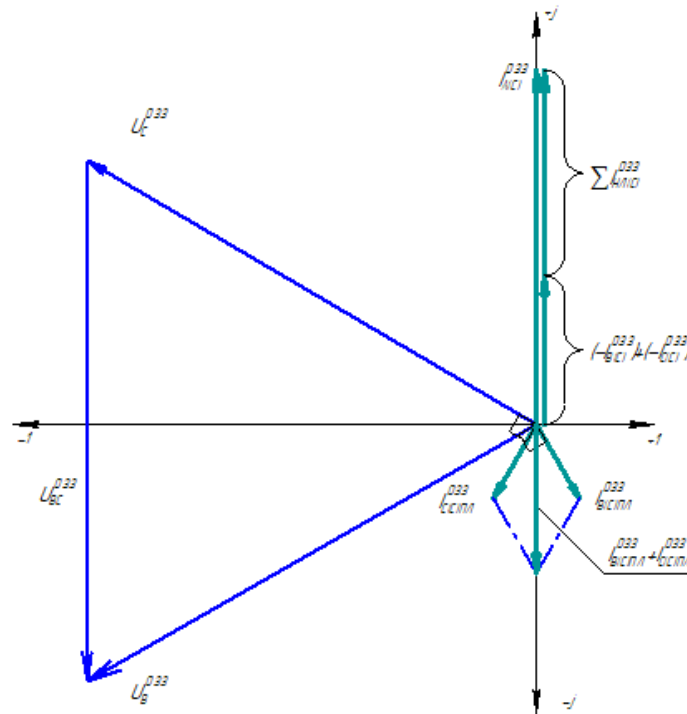


Рисунок 3 – векторная диаграмма, демонстрирующая емкостные токи и соответствующие напряжения в режиме ОЗЗ.

Емкостной ток поврежденной фазы во всех линиях равен 0, т.к. замыкание шунтирует емкость поврежденной фазы сети. [10] Ток однофазного замыкания на землю равен геометрической сумме емкостных токов неповрежденных фаз всей сети:

$$\underline{I}_{O33} = \underline{I}_{B(C)}^{O33} + \underline{I}_{C(C)}^{O33}; \quad (7)$$

Кроме емкостных токов в поврежденной линии протекает токи нагрузки:

$$\underline{I}_A^{O33} = \underline{I}_{O33} + \underline{I}_{наг_A}; \quad (8)$$

$$\underline{I}_B^{O33} = \underline{I}_{B(C)ПЛ}^{O33} + \underline{I}_{наг_B}; \quad (9)$$

$$\underline{I}_C^{O33} = \underline{I}_{C(C)ПЛ}^{O33} + \underline{I}_{наг_C}; \quad (10)$$

где:

$\underline{I}_{B(C)}^{O33}; \underline{I}_{C(C)}^{O33}$ - емкостные токи неповрежденных фаз поврежденной линии, в режиме ОЗЗ.

Если измерить эти фазные токи в начале поврежденной линии (где и производятся измерения в реальных условиях) и найти их геометрическую сумму, то получим:

$$\underline{I}_A^{O33} + \underline{I}_B^{O33} + \underline{I}_C^{O33} = \underline{I}_{O33} + (\underline{I}_{B(C)ПЛ}^{O33} + \underline{I}_{C(C)ПЛ}^{O33}) = \underline{I}_{B(C)\Sigma_{НЛ}}^{O33} + \underline{I}_{C(C)\Sigma_{НЛ}}^{O33}; \quad (11)$$

где:

$\underline{I}_{B(C)ПЛ}^{O33}; \underline{I}_{C(C)ПЛ}^{O33}$ - емкостные токи поврежденной линии неповрежденных фаз В и С, в режиме ОЗЗ;

$\underline{I}_{B(C)\Sigma_{НЛ}}^{O33}; \underline{I}_{C(C)\Sigma_{НЛ}}^{O33}$ - суммарные емкостные токи неповрежденных линий неповрежденных фаз В и С, в режиме ОЗЗ.

В таком случае для определения тока однофазного замыкания необходимо определить сумму емкостных токов поврежденной линии:

$$\underline{I}_{O33} = \underline{I}_A^{O33} + \underline{I}_B^{O33} + \underline{I}_C^{O33} + [(-\underline{I}_{B(C)ПЛ}^{O33}) + (-\underline{I}_{C(C)ПЛ}^{O33})] = \underline{I}_{B(C)\Sigma_{НЛ}}^{O33} + \underline{I}_{C(C)\Sigma_{НЛ}}^{O33} + [(-\underline{I}_{B(C)ПЛ}^{O33}) + (-\underline{I}_{C(C)ПЛ}^{O33})]; \quad (12)$$

Если исходить из предположения, что ток нагрузки протекающий в поврежденной линии остался неизменным, после возникновения ОЗЗ, также, как и треугольник междуфазных напряжений, то можно записать:

$$\underline{I}_{B(C)ПЛ}^{O33} = \underline{I}_B^{O33} - \underline{I}_{наг_B} = \underline{I}_B^{O33} - (\underline{I}_B^{HP} - \underline{I}_{B(C)}^{HP}); \quad (13)$$

$$\underline{I}_{C(C)ПЛ}^{O33} = \underline{I}_C^{O33} - \underline{I}_{наг_C} = \underline{I}_C^{O33} - (\underline{I}_C^{HP} - \underline{I}_{C(C)}^{HP}); \quad (14)$$

Однако, как отмечалось ранее, замерить емкостные токи линии односторонним методом невозможно. Поэтому емкостные токи в нормальном режиме необходимо вычислить:

$$\underline{I}_{B(C)}^{HP} = -j\underline{U}_B^{HP} \cdot \omega \cdot C_{y\partial} \cdot l_L; \quad (15)$$

$$\underline{I}_{C(C)}^{HP} = -j\underline{U}_C^{HP} \cdot \omega \cdot C_{y\partial} \cdot l_L; \quad (16)$$

где:

$C_{y\partial}$ - удельная емкость контролируемой линии, мкФ/км;

ω - угловая частота, рад/с;

l_L - длина контролируемой линии, км.

Алгоритм определения тока ОЗЗ. Данный метод основан на постоянной записи в память устройства данных о величинах фазного тока. Принцип действия этого алгоритма заключается в том, что постоянно контролируется модуль и аргумент всех фазных токов и производится запись в память устройства этих данных. После возникновения однофазного замыкания на землю, устройство определяет последние доаварийные значения фазных токов, определяет поврежденную фазу и определяет послеаварийное значение фазного тока. Затем вычисляется величина тока однофазного замыкания на землю по ниже представленному алгоритму. Алгоритм, построен из предложения, что замыкание произошло на фазе А.

1. Устройствами РЗиА фиксируются фазные токи в нормальном режиме.

2. Устройство вычисляет емкостные токи контролируемой линии, соответствующих фаз в нормальном режиме:

$$\underline{I}_{A(C)}^{HP} = -j\underline{U}_A^{HP} \cdot \omega \cdot C_{y\partial} \cdot l_L; \quad (17)$$

$$I_{B(C)}^{HP} = -jU_B^{HP} \cdot \omega \cdot C_{y0} \cdot l_L; \quad (18)$$

$$I_{C(C)}^{HP} = -jU_C^{HP} \cdot \omega \cdot C_{y0} \cdot l_L; \quad (19)$$

3. После возникновения ОЗЗ (предположим в фазе А), устройство определяет поврежденную фазу и производит замер фазных токов в неповрежденных фазах. Затем вычисляется емкостные токи неповрежденных фаз:

$$I_{B(C)ПЛ}^{O33} = I_B^{O33} - I_{наг_B} = I_B^{O33} - (I_B^{HP} - I_{B(C)}^{HP}); \quad (20)$$

$$I_{C(C)ПЛ}^{O33} = I_C^{O33} - I_{наг_C} = I_C^{O33} - (I_C^{HP} - I_{C(C)}^{HP}); \quad (21)$$

4. Вычисляется ток однофазного замыкания на землю:

$$I_{O33} = I_A^{O33} + I_B^{O33} + I_C^{O33} + [(-I_{B(C)ПЛ}^{O33}) + (-I_{C(C)ПЛ}^{O33})]; \quad (22)$$

Оценка работы алгоритма. Оценка работы алгоритма была осуществлена при помощи моделирования в программе Matlab Simulink. Для удобства предоставления информации представим результаты в виде зависимостей относительной погрешности линии аргумента и модуля, вычисленного алгоритмом тока ОЗЗ от условий работы алгоритма.

В первой части исследования работы алгоритма рассмотрим влияние удельной емкости на работу алгоритма, при различных собственных емкостных токах линии. В литературе [11], описано определение удельной емкости воздушной линии по геометрическим параметрам линии или по справочным данным. Для анализа работы метода будем использовать оба метода. Согласно табличным данным, емкость одноцепной воздушной линии 10 кВ, без грозозащитного троса – 0,0256 мкФ/км. Произведя ряд вычислений по упрощенным формулам получим более точные значения погонной емкости для нашей линии - 4,1382 нФ/км. Отличие между табличными и вычисленным значениями погонной емкости более, чем в 6 раз.

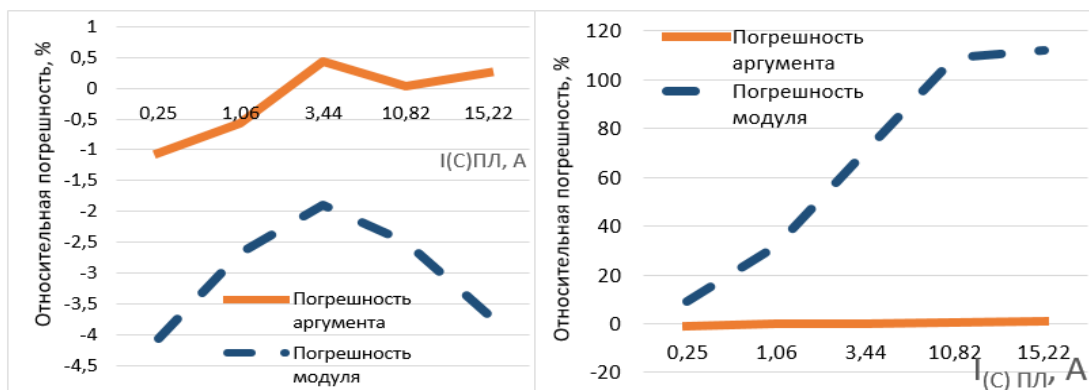


Рисунок 4 – зависимость относительной погрешности от собственного емкостного тока поврежденной линии; а- при точном определении удельной емкости; б- при приблизительном.

Как видно из диаграмм, результат работы алгоритма в основе, которого табличное значение удельной емкости имеет существенную погрешность в определении модуля тока ОЗЗ, которая увеличивается с увеличением собственного емкостного тока. Максимальная погрешность при определении

аргумента 1%. Максимальная погрешность вычислений алгоритма, при вводе точного значения емкости по модулю – 4,7%, по аргументу – 1,05%.

Вторая часть исследования работы алгоритма представлен анализ влияния переходного сопротивления в месте замыкания на работу алгоритма, при различных собственных емкостных токах линии. В алгоритме используется удельная емкость, вычисленная по упрощенным формулам.

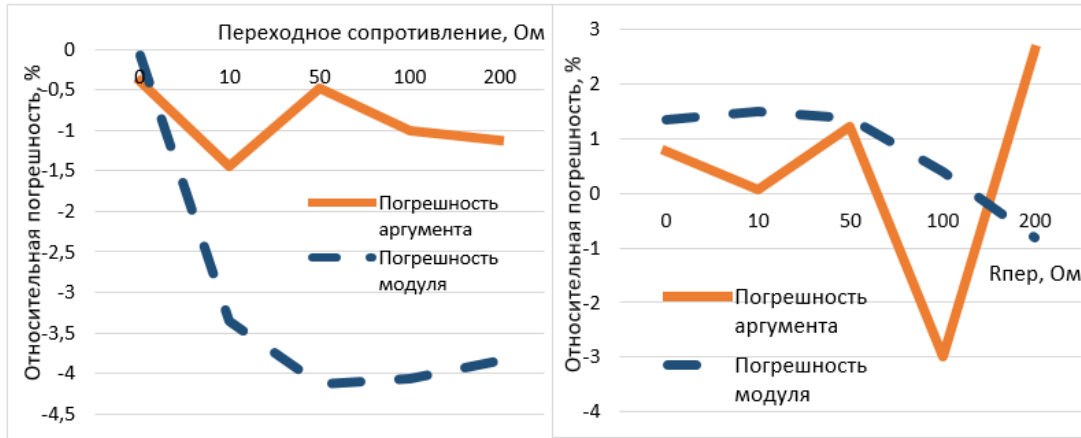


Рисунок 5 – распределение тока ОЗЗ в распределительной сети с изолированной нейтралью.

Во всех случаях погрешность не превышает 5%

Закключение.

1. Предложен метод определения тока однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью.
2. Погрешность работы метода, при точном вычислении удельной емкости не превышает 5%.
3. На погрешность вычисления не оказывает существенное влияние переходное сопротивление замыкания, в исследуемом диапазоне.

Список литературы:

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2008. — 639 с.
2. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов/ А.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – М.: МЭИ, 2010 - 336с.
3. Кузнецов Ф.Д. Фильтры симметричных составляющих и их применение в схемах релейной защиты: практическое пособие; под. ред. Б.А. Алексева. –М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 88с.: ил.
4. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87). Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ.– М. : СПО Союзтехэнерго, 1988. – 70с
5. Утегулов Б.Б., Утегулов А.Б., Уахитова А.Б., Бегентаев Б.М. Разработка методов определения токов однофазного замыкания на землю и утечки в несимметричной сети с изолированной нейтралью // Наука и техника Казахстана. 2010. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodov->

opredeleniya-tokov-odnofaznogo-zamykaniya-na-zemlyu-i-utechki-v-nesimmetrichnoy-seti-s-izolirovannoy-neutralyu (дата обращения: 08.02.2021).

6. Утегулов Б.Б., Шинтемиров А.М. Математическое моделирование устройства автоматического определения тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-10 кВ // Наука и техника Казахстана. 2003. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskoe-modelirovanie-ustroystva-avtomaticheskogo-opredeleniya-toka-odnofaznogo-zamykaniya-na-zemlyu-v-elektricheskikh-setyah> (дата обращения: 08.02.2021).

7. Жанкуанышев М.К., Утегулов Б.Б., Утегулов А.Б., Уахитова А.Б. Разработка алгоритма автоматического определения тока однофазного замыкания на землю в электрической сети 6 - 10 кВ // Наука и техника Казахстана. 2011. №1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-avtomaticheskogo-opredeleniya-toka-odnofaznogo-zamykaniya-na-zemlyu-v-elektricheskoy-seti-6-10-kv> (дата обращения: 08.02.2021).

8. Осипов Д.С., Долингер С.Ю., Сафонов Д.Г. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов // ОНВ. 2016. №4 (148). URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-avtomaticheskoy-nastroyki-embkostnyh-tokov-na-osnove-suschestvuyuschih-metodov-kompensatsii](https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-avtomaticheskoy-nastroyki-embkostnyh-tokov-na-osnove-suschestvuyuschih-metodov) (дата обращения: 08.02.2021).

9. Чернобровов Н.В. Релейная защита: Учебное пособие для техникумов. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 2012. — 680 с

10. Шабанов В.А. Симметричные составляющие токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью: Учеб. пособие/ В.А. Шабанов; Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т.— Уфа, 2002— 65 с

11. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс». 2001— 104 с