

# Электротехника

УДК 621.3

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И УСЛОВИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

*А.А. Андреев* \*

Тольяттинский государственный университет  
Россия, 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

E-mail: bikurina@yandex.ru

***Аннотация.** Проблема определения однофазного замыкания на землю в сетях с изолированным и компенсированным режимом нейтрали до сих пор актуальна. Согласно существующим данным по времени устранения данных технологических нарушений ставится под сомнение действенность существующих защит. Данный вопрос стоит особенно остро для электросетевых компаний, обслуживающих городские электрические сети, так как массовость линий, проложенных рядом друг с другом, и разнородный характер нагрузки делают режим сети неподходящим для использования современных защит. Поэтому для определения повреждения используются методы последовательного отключения и разделения сети на участки, которые применялись еще полвека назад. Следовательно, проведение анализа существующих защит от замыканий на землю поможет обозначить существующую проблему более четко, а также задаст вектор дальнейшим научным исследованиям в этой области. Сведения для данного метода берутся из теоретической и эмпирической информации опубликованных ранее работ. Рассмотрены, в частности, существующие разновидности защит от однофазных замыканий на землю. Произведен их анализ и условия применимости для электрохозяйства городских электрических сетей. В ходе анализа установлено, что существующие защиты от однофазных замыканий на землю позволяют уменьшить круг поиска ОЗЗ, но до сих пор не могут обеспечить абсолютной селективности для условий городских электрических сетей, выполненных кабельными линиями. Так как подобные электрические сети характерны для густонаселенных районов, то изложенная проблема актуальна и требует скорого решения.*

***Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, электроснабжение, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, кабельные линии.*

### Введение и литературный обзор

Эксплуатация электрооборудования может сопровождаться и сопровождается аварийными отключениями, возникающими вследствие технологических отказов, и плановыми отключениями, производящимися вследствие текущих ремонтов. Согласно статистическим данным по повреждаемости электрооборудо-

---

\* Андреев Антон Андреевич, диспетчер электрических сетей АО «ССК», аспирант.

вания наиболее уязвимым элементом сети являются кабельные линии [1, 2]. Причинами повреждения данного элемента сети являются старение изоляции, заводские дефекты, человеческий фактор при проведении земляных работ, перегрузка кабеля. Из многолетних наблюдений повреждаемости кабельных сетей среднего напряжения [3] известно, что повреждения возникают с некоторой цикличностью. Это объясняется сезонными колебаниями природных условий. Таким образом, наиболее уязвимы к подобным перерывам электроснабжения потребители городских электрических сетей, так как их основное исполнение – кабельное. Это подтверждается статистическими данными по повреждаемости основных элементов электросети (см. таблицу).

#### Статистические данные по повреждаемости элементов городской электросети

Элементы городской электросети	Средняя повреждаемость	Длительность перерыва электроснабжения, ч	
		внезапный	плановый
Кабельные линии, км/год			
10 кВ	0,045	10	6
6 кВ	0,033	10	6
1 кВ	0,15	10	6
Воздушные линии, км/год			
6–10 кВ	0,2	2,5	12
1 кВ	0,3	2,5	6
Трансформаторы 6–10 кВ, трансформатор/год			
Воздушных сетей	0,01	10	8
Кабельных сетей	0,001	6	8
В целом (кабельных сетей)			
ТП	0,001	4	8
РП	0,015	6	12

По данным [3], повреждаемость кабельных линий увеличивается вследствие однофазных замыканий на землю.

В распределительных сетях среднего напряжения нейтраль трансформатора изолирована от земли либо заземлена через специальные дугогасящие устройства. Согласно известным общепринятым положениям, режим изолированной (компенсированной) нейтрали имеет неоспоримое преимущество – отсутствует короткозамкнутый контур через землю и нейтраль источника ЭДС при однофазных замыканиях. Следовательно, малый ток замыкания на землю позволяет продолжать работу сети без отключения потребителей. Данные следствия не только косвенно повышают надежность электроснабжения потребителей, сокращая перерыв электропотребления во время однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), но и тем самым повышают ресурс силовых выключателей и снижают требования к заземляющим устройствам [4]. Однако режим работы сети с изолированной нейтралью имеет и целый ряд недостатков: повышенные требования к межфазной изоляции, феррорезонансные явления, дуговые перенапряжения и сложность построения селективных защит. Преобладание недостатков над преимуществами данного режима нейтрали отмечают многие авторы [5–8]. Данные недостатки вытекают из возможности работы сети с замыканием на землю через дугу, так

как физические характеристики электрической дуги носят случайный характер. Переходные процессы, возникающие во время ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью, зависят как от места замыкания, так и от продолжительности горения дуги [9]. Поэтому в ряде случаев наиболее распространенным решением проблемы является компенсация емкостного тока замыкания на землю с помощью дугогасящего реактора (ДГР). Применение ДГР позволяет ограничить возникающие перенапряжения на неповрежденных фазах сети и устранить скачки напряжения после погашения дуги. При автоматизированной подстройке индуктивности и отсутствии смещения нейтрали вероятность возникновения перенапряжений в несколько раз меньше, чем в сетях с изолированной нейтралью [4]. Но несмотря на это проблема определения отходящих присоединений с ОЗЗ сохраняется.

Исходя из опыта эксплуатации, а также теоретических сведений о существующих видах защит укрепляется предположение, что в настоящий момент отсутствуют защиты от ОЗЗ, обладающие должной селективностью. В работах многих авторов описываются возможности и перспективы применения резистивного заземления нейтрали [10–12], которое позволит повысить селективность защит и в последующем автоматизировать процесс поиска поврежденного присоединения. Однако достижение данных преимуществ возможно только при повышении тока ОЗЗ, что также повышает опасность поражения электрическим током живых организмов, находящихся вблизи места замыкания на землю [13, 14]. Вообще вопрос применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали проработан слабо. Официальные документы и всероссийский стандарт, регламентирующий применение данного заземления, отсутствуют. Поэтому проблема селективности защит от ОЗЗ признается, но способы ее решения ограничены. Рекомендованные способы по внедрению и комбинированию нескольких видов защит не решают сформированную проблему, а лишь сглаживают ее последствия.

### **Материалы и методы**

Городское электроснабжение представляет собой систему связанных между собой элементов генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Как известно, любая распределительная сеть характеризуется массовостью и разветвленностью. Данные особенности свойственны городским электрическим сетям. К ним также относятся разделение сетей по принадлежности к обслуживаемым организациям, преобладание или полное выполнение сетей кабельными линиями, разный способ прокладки кабельных линий и так далее [15]. Приведенные свойства могут негативно воздействовать на эксплуатацию и обслуживание данных сетей, особенно при наложении таких факторов, как технологические отказы оборудования и аварийные ситуации [16].

В распределительных схемах городского электроснабжения центрами питания чаще всего являются районные понизительные подстанции, получающие электроэнергию напрямую с электростанции (рис. 1).

Как видно из рисунка, силовые трансформаторы (С1Т, С2Т) выполнены с расщепленной обмоткой низшего напряжения. Данный вид трансформаторов характерен для городских электрических сетей, так как необходимо ограничение токов короткого замыкания. Также преимуществом схем с несколькими системами шин является большая маневренность, что актуально для распределительных сетей среднего напряжения. После трансформирования напряжения электроэнергия распределяется по четырем секциям шин. Каждой секции шин соответ-

ствуют свои распределительные пункты (РП), получающие питание по двум вводам. Данная схема приведена в упрощенном виде с целью ограничения ее загромождения другими элементами электросети, а также для того, чтобы сделать акцент именно на конфигурации подобных схем.

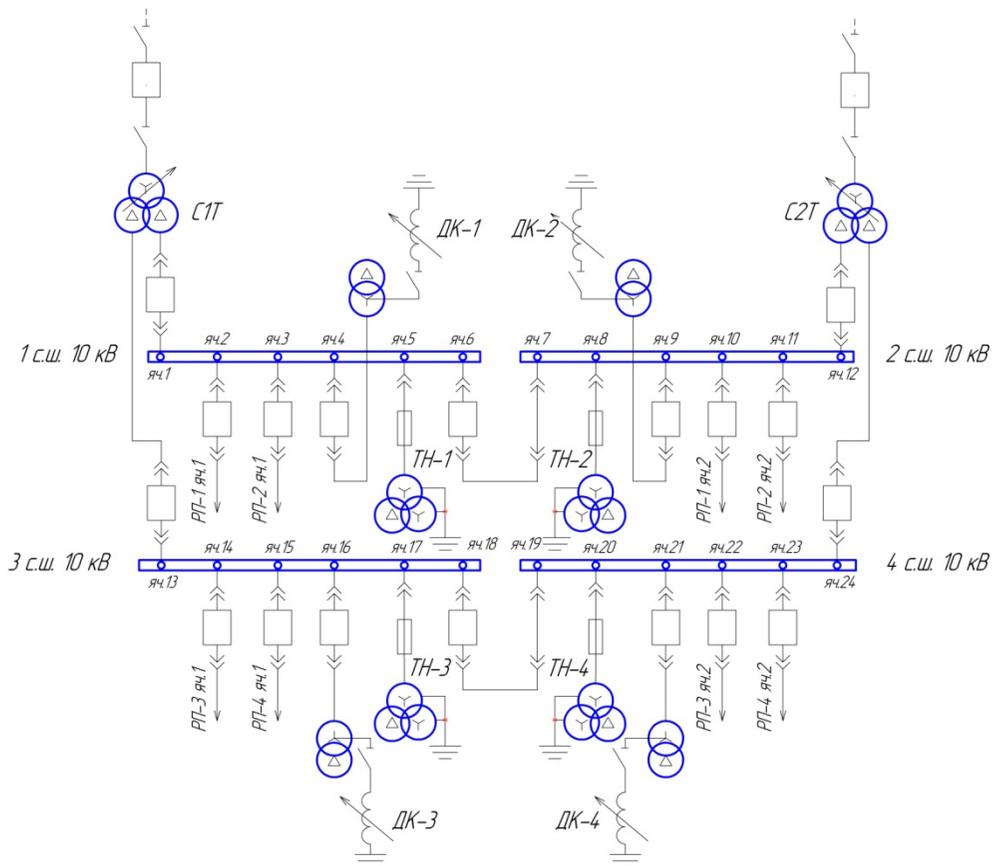


Рис. 1. Упрощенная схема районной понизительной подстанции

Далее от РП запитываются цепочки трансформаторных подстанций. Данный уровень электроснабжения также приведен в соответствующем упрощенном виде (рис. 2).

Конфигурация данной сети выполнена по двухлучевой схеме, что обеспечивает независимое питание потребителей по двум секциям шин. Данная структура характерна для потребителей первой и второй категории. Таким образом, каждая ТП подключена к секции РП. В свою очередь, данные двухтрансформаторные ТП осуществляют трансформирование напряжения до 0,4 кВ и распределение электроэнергии между потребителями. В этих схемах электрические параметры задаются с тем условием, чтобы была возможность параллельной работы трансформаторов и на районной понизительной подстанции, и на каждой ТП. Все линии электропередачи согласно условиям надежности и эстетичности мегаполисов выполнены кабельными линиями. В случае потери питания по одной из секций имеется возможность перевода нагрузки с одной секции шин на другую.

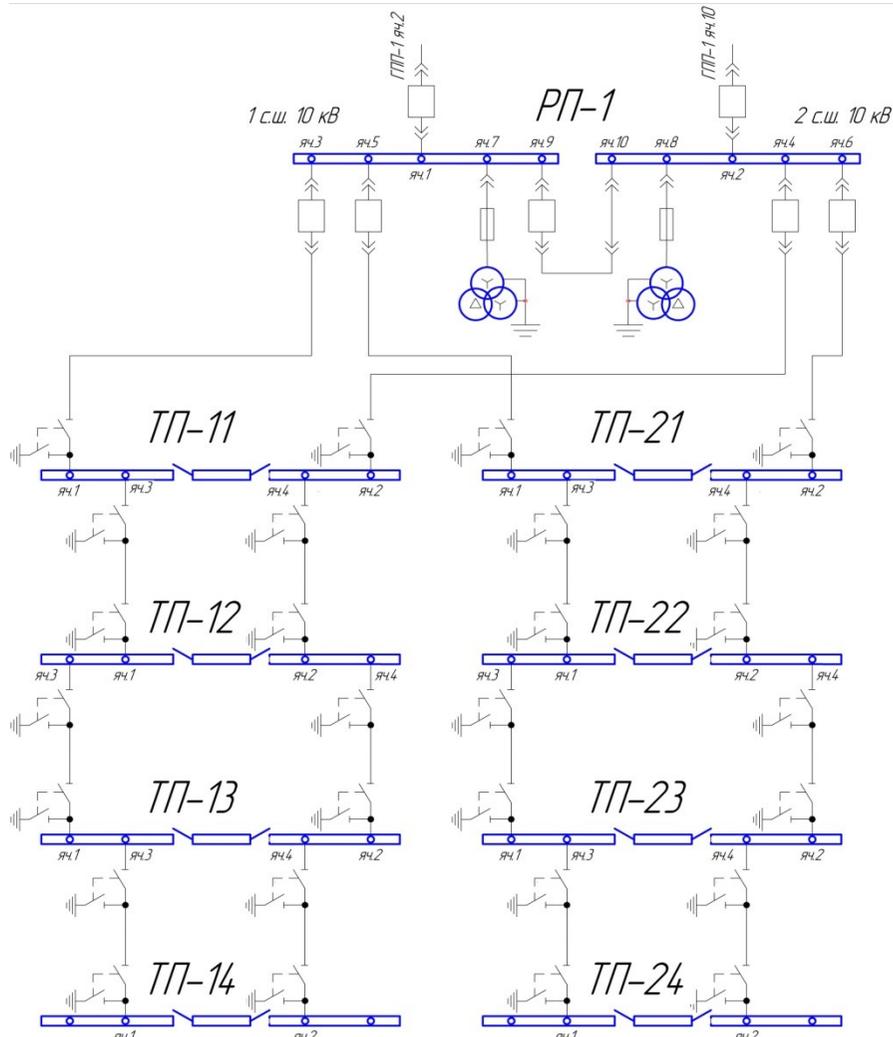


Рис. 2. Упрощенная схема РП с цепочками ТП

Также структура распределительной сети может быть кольцевой конфигурации. В этом случае от одной секции шин распределительного пункта запитана цепочка ТП и вторым концом она присоединена к другой секции шин РП. В нормальном режиме кольцо имеет разрыв на какой-либо ТП в цепочке. Этот разрыв необходим для обеспечения селективности защит и для обособленной работы каждой части цепи. Данная схема применяется для потребителей третьей категории. Поэтому двухлучевая конфигурация обладает приоритетом при выборе схемы в проектируемых городских системах электроснабжения.

Как было отмечено ранее, наиболее распространенным режимом работы нейтрали в городских электрических распределительных сетях является режим компенсированной нейтрали. Данный вид заземления позволяет продолжать работу сети в режиме однофазного замыкания на землю без отключения потребителей. Работа устройств компенсации обеспечивает оперативному персоналу больше времени на поиск и локализацию однофазного замыкания на землю. Од-

нако определение поврежденного кабельного участка не всегда может быть селективно осуществлено существующими защитами от ОЗЗ, поэтому применяются методы последовательного отключения потребителей. Таким образом, при продолжительной работе сети в режиме однофазного замыкания на землю не удастся оперативно определить линию с ОЗЗ. Поэтому объектом исследования являются существующие защиты от ОЗЗ в условиях городских распределительных кабельных сетей, работающих в режиме компенсированной нейтрали.

В качестве метода исследования описанного вопроса выбран анализ в совокупности с изучением и обобщением соответствующей информации. Использование данной методологической основы наиболее целесообразно для рассмотрения положительных и отрицательных сторон существующих защит от ОЗЗ и для их последующего оценивания в конкретных условиях. В ходе исследования используются сведения из теоретической и эмпирической информации опубликованных ранее работ.

Для проверки применимости отдельных видов защит к конкретным условиям эксплуатации рассмотрены защиты от ОЗЗ. Условия применимости будут формироваться относительно городских электрических сетей среднего напряжения с режимом компенсированной нейтрали, все линии которых выполнены кабелями. Существующие в России и за рубежом защиты разделяются на следующие разновидности.

1. *Защиты контроля изоляции сети на землю.* Данная защита основывается на измерении напряжения нулевой последовательности. В основном это осуществляется с помощью контроля изоляции обмоток трансформатора напряжения, которая образует фильтр напряжений нулевой последовательности. В нормальном режиме напряжение в данной обмотке близко к нулю. Возникновение замыкания фазы на землю приведет к появлению в данной обмотке напряжения, что сопровождается срабатыванием реле (рис. 3).

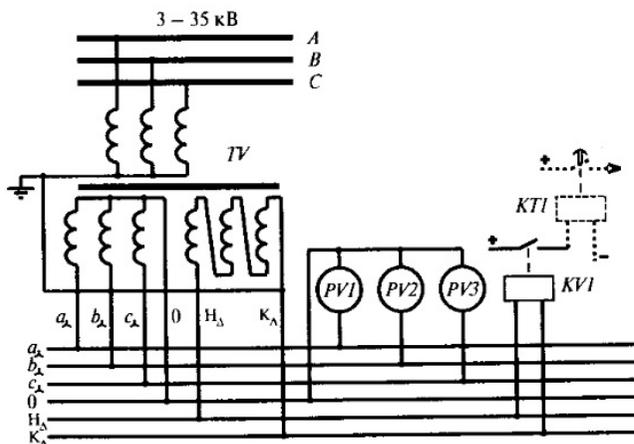


Рис. 3. Принципиальная схема трансформатора напряжения с обмоткой контроля изоляции

Также фиксация поврежденной фазы осуществляется по показаниям вольтметров. В случае замыкания на землю напряжение в поврежденной фазе будет близко к нулю, а в неповрежденной увеличится до соответствующих линейных значений. Также для сетей, где выполняется компенсация емкостных токов на

землю, возможно подключение указательного реле к сигнальной обмотке соответствующего устройства компенсации.

Данный вид защиты достаточно дешев и распространен. По некоторым данным, около 80 % всех подстанций России имеют в своем арсенале только трансформаторы напряжения с обмоткой контроля изоляции. Этот вид защиты обладает достаточно важным преимуществом в достоверности своих показаний, так как в напряжении нулевой последовательности значительно меньше высокочастотных составляющих, что важно при замыканиях через перемежающуюся дугу. Однако подобные устройства довольно условно называются защитами, так как они только сигнализируют о наличии замыкания на данной секции. Подобную защиту возможно выполнить с действием на отключение, но лишь в том случае, когда от секции шин подключено одно отходящее присоединение и нет сомнений в том, что повреждено именно оно. При нескольких присоединениях реле напряжения в обмотке контроля изоляции будет в рабочем положении до тех пор, пока замыкание на землю не устранится [17–19]. Это возможно сделать с помощью метода последовательного отключения, выполнение которого также сомнительно в отдельных случаях. Даже исходя из приведенной ранее упрощенной электрической схемы для того, чтобы определить замыкание на какой-либо отходящей линии, существует момент, когда необходимо проверить все четыре РП, на каждой из которых запитано по две цепочки ТП. Подобные проверки приведут к кратковременному, но все же отключению всех потребителей секции, на которой зафиксировано замыкание. Таким образом, подобные защиты достаточно надежны, но абсолютно неселективны для подстанций с двумя и более отходящими присоединениями.

*2. Ненаправленные токовые защиты нулевой последовательности.* Данные защиты основаны на измерении тока нулевой последовательности. Измерения производятся в зависимости от типа линии либо с помощью трансформаторов тока, соединенных в фильтр токов нулевой последовательности, либо с помощью трансформаторов тока нулевой последовательности (рис. 4).

При повреждении в линии величина удельного емкостного тока замыкания на землю определяется как

$$I_{0C}^{(1)} = 3\omega C_0 U_\phi,$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $U_\phi$  – фазное напряжение сети;  $C_0$  – электрическая фазная емкость.

Чувствительность данных защит производится по расчетам величины

$$k_u = \frac{I_{C\Sigma} - I_{C\text{фиод.}}}{I_{C3}} \geq 1,25.$$

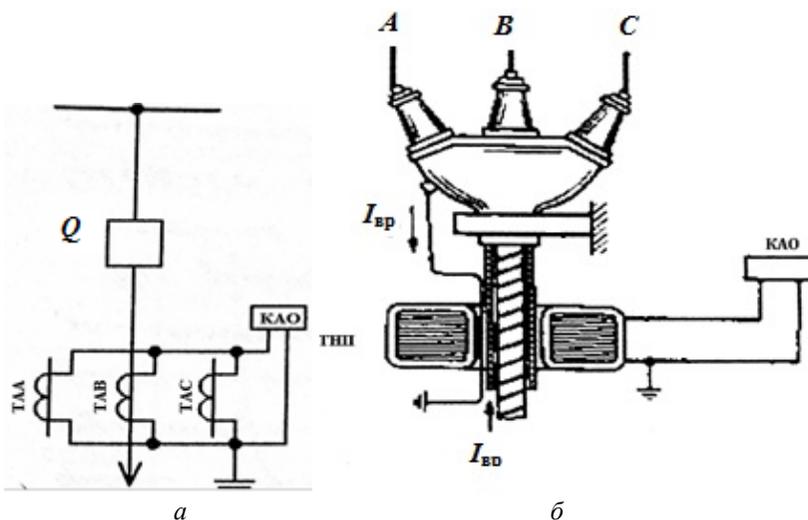


Рис. 4. Ненаправленная токовая защита:  
 а – с фильтром нулевой последовательности;  
 б – с трансформатором тока нулевой последовательности

При этом собственный емкостной ток кабельной линии

$$I_{C\text{фиод.}} = I_{0C}^{(1)} \cdot l.$$

Ток срабатывания защиты определяется как

$$I_{сз.} = K_H \cdot K_{бр} \cdot I_{C\text{фиод.}},$$

где  $K_H$  – коэффициент надежности;  $K_{бр}$  – коэффициент броска емкостного тока.

Расчет коэффициента чувствительности данной защиты во многом зависит от суммарного емкостного тока сети ( $I_{C\Sigma}$ ). Если данная величина будет значительно больше емкостного тока защищаемой линии ( $I_{C\text{фиод.}}$ ), то условие чувствительности будет выполняться. Так как суммарный емкостной ток пропорционален количеству кабельных линий, то защита будет более селективной на подстанции с большим количеством отходящих присоединений. Следовательно, для подстанций с малым емкостным током чувствительности данной защиты может оказаться недостаточно. Также данную защиту необходимо отстраивать от тока небаланса, возникающего из-за неодинаковых характеристик трансформаторов тока нулевой последовательности.

Согласно [20, 21], подобные защиты эффективны в сетях с большим количеством отходящих присоединений, каждое из которых имеет малый емкостной ток. Под это описание подходят цеха с большим количеством высоковольтных двигателей, подключенных через короткие кабели. Структура и характер эксплуатации городских электрических сетей не подходят под данное описание. Данные сети также характеризуются непостоянными параметрами емкости вследствие частых переключений по отношению к первичной схеме. Поэтому данная защита не может обеспечить селективность в подобных условиях.

3. *Направленные токовые защиты нулевой последовательности.* Принципиальное отличие направленных защит от ненаправленных заключается в том, что направленные включают в себя реле направление мощности. Так как емкостные

токи «стекают» в точку замыкания, то по положительному направлению мощности возможно определить именно то присоединение, которое находится на повреждении. Емкостной ток остальных присоединений будет иметь противоположное направление, поэтому отсутствует необходимость отстройки от суммарного емкостного тока. Наиболее распространенным типом этих защит являются ЗЗП-1М и ЗЗН. Для выбранных нами условий применяются защиты ЗЗП-1М, так как ЗЗН предназначена для сетей без компенсации емкостного тока.

Исходя из сведений, представленных в [22], граничным условием селективного срабатывания ЗЗП-1М является суммарный емкостной ток 0,5–0,6 А. Для этого суммарная протяженность неповрежденных линий должна быть не менее 20–25 км. Это условие выполняется в городских электрических сетях, но в случае, когда схема приведена к нормальному виду. Поэтому вероятность соблюдения этого условия будет также определяться количеством отходящих присоединений. Также при замыканиях через перемежающуюся дугу с появлением высших гармоник возможны неселективные срабатывания. Отстроить данные защиты довольно сложно, так как до сих пор не существует однозначной методики по подбору уставок. Поэтому границы применимости данных защит от замыканий на землю до сих пор узкие.

*4. Защиты нулевой последовательности на токах высших гармоник.* Этот вид защиты основан на регистрации токов высших гармоник в сети. Так как ОЗЗ сопровождаются повышением содержания высших гармоник, особенно в поврежденной линии, то метод их регистрирования позволил бы решить проблему поиска повреждения. Данные процессы характерны для сетей всех видов заземления нейтралей [23]. Соответствующий вид защиты подразделяется на защиты, реагирующие на абсолютные значения токов высших гармоник, в которых фактические гармонические составляющие сравниваются с уставкой, и защиты, реагирующие на относительное значение, в которых замеры производятся в данный момент времени. Реализация данного вида защиты распространена в основном в совокупности, так как это наиболее надежно и целесообразно. То есть при ОЗЗ срабатывает защита абсолютного замера и на данных фидерах выпадают соответствующие блинкера. Далее возможно на этих фидерах производить относительный замер с фиксацией измеряемого тока, и присоединение с наибольшим током утечки окажется с ОЗЗ. Для городских электрических сетей распространен подобный алгоритм, а также используется совмещение данного вида защиты с защитами контроля изоляции сети.

С помощью устройств избирательной сигнализации, таких как УСЗ-2/2 и УСЗ-3М, производится измерение токов высших гармоник соответствующих фидеров. Измерения осуществляются посредством трансформаторов тока нулевой последовательности (рис. 5).

Таким образом, оперативный персонал последовательно измеряет токи высших гармоник на фидерах соответствующей секции и выделяет присоединение, где ток наибольший. Также существуют устройства, которые автоматически определяют присоединение с наибольшим током высших гармоник и передают данную информацию в диспетчерский пункт.

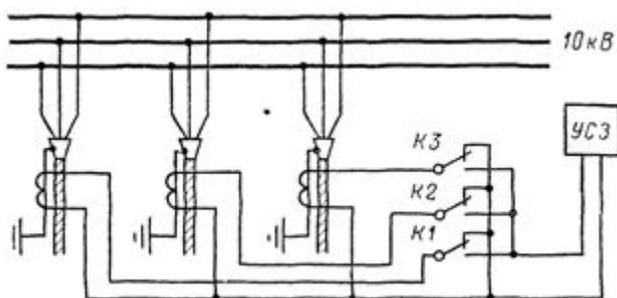


Рис. 5. Подключение УСЗ к трансформатору тока нулевой последовательности

Несмотря на сложность реализации, данные защиты обладают достаточно высокой селективностью, но тем не менее защиты, реагирующие на абсолютное значение высших гармоник, чаще всего срабатывают неселективно. Производя же замер только на присоединениях со сработавшей защитой, нельзя однозначно утверждать, что присоединение с наибольшим током утечки – это присоединение с ОЗЗ. Перемежающаяся дуга может иметь различные параметры в каждый момент времени, следовательно, защита лишь ограничивает круг поиска, но не дает абсолютно селективного срабатывания.

5. *Защита с использованием наложенных токов.* Принцип данного вида защиты основан на введении высокочастотного сигнала в сеть и регистрации его отражения. Отсутствие возвращенного сигнала говорит о том, что существует замыкание. При этом, зная длину линии и токовременные характеристики, возможно зафиксировать расстояние до места пробоя [24, 25]. Частота наложенного тока может быть как выше промышленной, так и ниже. Однако высокие частоты могут присутствовать в сети и в нормальном режиме, чему способствуют нелинейные нагрузки. Так как количество подобных потребителей электроэнергии довольно велико, то применение наложенного тока высокой частоты ограничивается. Использование токов пониженной частоты решает данную проблему, но для их создания требуется специальное устройство, подключенное к нейтрали сети. Для обеспечения должного уровня низкочастотного сигнала требуется применение генераторов большой мощности. Это приводит к усложнению схемы первичной коммутации. В разветвленных сетях с несколькими секциями и соответствующими несколькими ДГР реализация этого решения полностью нецелесообразна. Также не исключаются сложности отстройки данного сигнала от гармонических составляющих при внешних ОЗЗ [26].

Появление защит с использованием наложенных токов не нашло широкого применения. Наличие нелинейных нагрузок ограничивает применение высокочастотных сигналов для обнаружения ОЗЗ. Способ применения наложенного тока пониженной частоты реализовать технически сложно и в некоторых случаях нецелесообразно. Поэтому применение данного вида защит в настоящее время для городских электрических сетей неактуально.

6. *Централизованные защиты от ОЗЗ.* Данные защиты можно отнести также к отдельному виду, так как в их основу заложен принцип централизации данных об ОЗЗ. В качестве сравниваемых физических величин чаще всего используются токи нулевой последовательности всех отходящих присоединений. Так как современные микропроцессорные системы позволяют обрабатывать до 48 каналов одновременно, то измеряемые характеристики емкостного тока актуальны практически в каждый момент времени, что позволяет обеспечивать селективное сра-

батывание [27]. Также в качестве входной информации могут быть использованы: активная мощность нулевой последовательности, величина наложенного тока, токи высших гармоник. Таким образом, централизованная защита выявляет линию с замыканием на основе измеряемых характеристик ОЗЗ. То есть она может включать в себя комбинацию вышеизложенных индивидуальных защит и, производя моментальное вычисление сравниваемых параметров ОЗЗ, осуществлять срабатывание на сигнал либо на отключение.

Однако несмотря на то, что централизованная защита является передовой разработкой в выявлении ОЗЗ, основана она на индивидуальных защитах, которые не лишены недостатков. Например, при сравнении мощностей нулевой последовательности велика вероятность неселективного срабатывания, так как требуется достаточно большая активная составляющая тока утечки. Этого можно добиться в сети с резистивным заземлением нейтрали, возможность применения которого описана выше. Использовать в качестве входной информации наложенный ток также нецелесообразно в подавляющей части распределительных сетей. Это объясняется изложенными выше недостатками, характерными для защит с использованием наложенных токов. Наиболее целесообразной и эффективной защитой для городских электрических сетей является защита на высших гармониках. Моментальное сравнение токов высших гармоник на отходящих присоединениях способствует повышению селективности данной защиты [27]. Однако, как было рассмотрено ранее, суммарная емкость линии часто меняется вследствие оперативных переключений. Следовательно, электрические параметры дугового замыкания непостоянны. Поэтому по величине тока высших гармоник нельзя однозначно определить присоединение с ОЗЗ. Таким образом, централизованные защиты нельзя назвать универсальными; несмотря на точность и быстроту их логического аппарата, они могут обладать недостатками соответствующих индивидуальных защит.

### **Результаты и обсуждение**

Представленные виды защит от ОЗЗ рассмотрены в своем принципиальном исполнении, без конкретизирования отдельных устройств. Для выбора того или иного вида защиты необходимо учитывать режим заземления нейтрали, электрические параметры потребителей, количество отходящих присоединений на подстанции, разветвленность сети, нагрузку и виды ЛЭП. В качестве условий применения были выбраны городские электрические сети с соответствующим большим количеством отходящих присоединений, выполненных в основном кабельными линиями. Многие авторы, рассматривающие подобный вопрос, признают проблему неселективности и предлагают решить ее путем применения резистивного заземления нейтрали. Но на сегодняшний момент государственным стандартом не регламентируется применение данного способа, который имеет как преимущества, так и недостатки. Также подобное решение требует изменения режима нейтрали сети. Поэтому внимание разработчиков и компаний уделяется больше усовершенствованию самих защит. Но несмотря на точность измерений современных защит, выполненных на микропроцессорной компонентной базе, их принцип действия остается прежним. То есть повышение селективности не может достичь значений, нужных для абсолютно достоверного срабатывания. Этому способствуют не только скачкообразные электрические параметры дуги, но и состояние схемы в момент замыкания. В ходе проведенного анализа было установлено, что существующие защиты от ОЗЗ позволяют уменьшить круг поиска

ОЗЗ, но до сих пор они не могут обеспечить абсолютной селективности. Конечно, это не относится к частным случаям, когда количество присоединений секции мало и схема электроснабжения в большинстве своем находится в нормальном оперативном состоянии. Но в сетях, которые включают в себя большое количество отходящих присоединений, где линии выполнены кабелями, проложенными рядом друг с другом, где схемы электроснабжения часто меняются, защиты от ОЗЗ не справляются полностью со своей прямой задачей.

### Заключение

В настоящий момент проблема определения поврежденного отходящего присоединения во время однофазного замыкания на землю остается актуальной. В ходе анализа установлено, что городские электрические сети, характеризующиеся большой протяженностью линий и их массовостью, могут использовать в качестве достоверной защиты только трансформаторы напряжения с измерительной обмоткой контроля изоляции. Так как этот способ абсолютно неселективен по отношению к отходящим присоединениям данной секции, то его применение происходит в сочетании с другими защитами. Наиболее подходящими при этом для городских электрических сетей являются защиты на высших гармониках. Хотя подобные комбинации и не обеспечивают абсолютно достоверного срабатывания, но их применение заметно уменьшает время поиска ОЗЗ. Поэтому объединение и централизация данных видов защит могут быть перспективными при решении проблемы селективности защит от ОЗЗ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кашеваров С.Г.* Повреждение линий электропередачи и обзор новых технических и организационных решений по их ограничению // Современное состояние и перспективы развития технических наук: Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: РИО МЦИИ Омега Сайнс, 2015. – С. 58.
2. *Шалин А.И.* Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3 (33).
3. *Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Данилин А.Н. и др.* Исследования опасности однофазных замыканий в сети 35 кВ Мурманского региона // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2016. – Вып. 12. – С. 7–15.
4. *Шалин А.И., Целебровский Ю.В., Щеглов А.М.* Особенности резистивного заземления в городских сетях 10 кВ // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ: Труды Второй всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2002. – С. 63–68.
5. *Обабков В.К.* Многокритериальность показателя эффективности функционирования сетей 6–35 кВ и проблема оптимизации режимов заземления нейтрали // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ: Доклады научно-технической конференции. – Новосибирск, 2000. – С. 33–41.
6. *Zhang H.A.* Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582–1588.
7. *Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N. et al.* The Short-term Isolated Star Point Grounding to Detect Earth Faults in Compensated Networks. The Concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1–5.
8. *Назарычев А.Н., Тутенков С.С., Пугачев А.А.* Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6–35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 3(36). – С. 40–46.
9. *Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V.* Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth // Thermal Engineering. 2019. V. 66(12), pp. 869–880.
10. *Абдуллин Л.И., Ваганов Г.В., Чернова Н.В. и др.* Влияние параллельно работающих фидеров на резонансные частоты воздушной линии при однофазном замыкании на землю // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 1–2. – С. 54–61.

11. Куликова Н.А., Титоренко О.М., Тяпкина В.А. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работ электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 2.
12. Рыжкова Е.Н., Кудрин Б.И., Фомин М.А. Экономическая эффективность перевода сетей электроснабжения 6–35 кВ в режим управляемого резистивного заземления // Вестник МЭИ. – 201. – № 3.
13. Целебровский Ю.В. Нормативное обеспечение режима нейтрали в электрических сетях // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ: Доклады научно-технической конференции. – Новосибирск, 2000. – С. 3–6.
14. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20–22.
15. Федотов А.И., Ваганов Г.В., Абдулзянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – № 23(1). – С. 146–155.
16. Мышкина Л.С. Малая генерация – средство повышения живучести энергосистемы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 1–2. – С. 23–30.
17. Bouziane B., Elmaouhab A. et al. Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar's Isolated Network of Algeria // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26–27 august 2019. – IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.
18. Guillen D., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. et al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // Measurement. 2019. V. 141. pp. 24–36.
19. Mejia-Barron A., Valtierra-Rodriguez M., Granados-Lieberman D. et al. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents // Measurement. 2018. V. 117. pp. 371–379.
20. Манилов А.М. Способ обеспечения чувствительности защит от однофазных замыканий на землю в сети 6–10 кВ // Энергоэксперт. – 2011. – № 4.
21. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Случаи неправильных действий защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 2 (32).
22. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. – 2010. – № 2.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 19 (11–12). – С. 12–20.
24. Лыкин А.В., Уткин Е.А. Распределительные электрические сети 10/0,4 кВ с максимальным приближением трансформаторных подстанций к потребителям // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – № 21 (3). – С. 46–54.
25. Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow. RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.
26. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A. Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6-10 Kv Distribution Circuits by a Location Method. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411–415.
27. Горюнов В.А. Однофазное замыкание на землю. Можно ли решить проблему? // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 2 (104).

*Статья поступила в редакцию 11 октября 2021 г.*

# ANALYSIS OF EXISTING TYPES OF PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE EARTH FAULTS AND THEIR APPLICATION CONDITIONS

*A.A. Andreev*\*

Togliatti State University  
14, Belorusskaya st., Tolyatti, 445020, Russian Federation  
E-mail: bikurina@yandex.ru

**Abstract.** *Currently, the problem of determining a single-phase earth fault in networks with isolated and compensated neutral mode is still relevant. According to the existing data, according to the time of elimination of these technological violations, the conclusion arises, according to which the effectiveness of existing protections is called into question. This issue is particularly acute for electric grid companies that serve urban electric networks, since the mass of lines laid next to each other and the heterogeneous nature of the load makes the network mode not suitable for the use of modern protections. Therefore, as a definition of damage, the method of sequential disconnection and the method of dividing the network into sections, which were used half a century ago, are used. Therefore, the analysis of the existing earth fault protection will help to identify the existing problem more clearly, as well as set the direction for further scientific research in this area. The methodological basis, in this article, is the analysis. The information for this method is taken from the theoretical and empirical information of previously published works. In particular, the existing types of protection against single-phase earth faults are considered. Their analysis and conditions of applicability for the electric economy of urban electric networks are made. In the course of the analysis, it was found that the existing protection against single-phase earth faults can reduce the search range of OZZ, but, so far, they can not provide absolute selectivity for the conditions of urban electrical networks made by cable lines. Since such electrical networks are typical for densely populated areas, the above problem is relevant and requires a quick solution.*

**Keywords:** *single-phase earth faults, power supply, isolated neutral, compensated neutral, cable lines.*

## REFERENCES

1. *Kashevarov S.G.* Damage to power transmission lines and review of new technical and organizational solutions for their limitation // The current state and prospects for the development of technical sciences: A collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Ufa: RIO MTII Omega Sciences, 2015. p. 58
2. *Shalin A.I.* Earth closures in 6–35 kV networks. Advantages and disadvantages of various protections // News of Electrical Engineering, 2005. № 3 (33).
3. *Nevretdinov Yu.M., Fasti G.P., Danilin A.N., et al.* Studies of the danger of single-phase short circuits in the 35 kV network of the Murmansk region // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Power engineering, 2016. Issue 12. p. 7–15.
4. *Shalin A.I., Tselebrovsky Yu.V., Shcheglov A.M.* Features of resistive grounding in urban networks of 10 kV // Limiting overvoltage and modes of grounding neutral networks of 6–35 kV: Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Technical Conference. Novosibirsk, 2002. p. 63–68.
5. *Obabkov V.K.* Multicriteriality of the indicator of the efficiency of the functioning of networks of 6–35 kV and the problem of optimizing the modes of neutral grounding // Modes of neutral grounding of 3–6–10–35 kV networks: Reports of the scientific and technical conference. Novosibirsk, 2000. pp. 33–41.

---

\* *Anton A. Andreev, Postgraduate Student*

6. *Zhang H.A.* Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582–1588.
7. *Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N., et al.* The Short-term Isolated Star Point Grounding to Detect Earth Faults in Compensated Networks. The Concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1–5.
8. *Nazarychev A.N., Titenkov S.S., Pugachev A.A.* Complex innovative solutions for neutral grounding in networks of 6–35 kV // *Electric Power. Transmission and distribution.* 2016. No. 3(36). pp. 40–46.
9. *Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V.* Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth // *Thermal Engineering.* 2019. V. 66 (12), pp. 869–880.
10. *Abdullin L.L., Vagapov G.V., Chernova N.V., et al.* Effect of parallel feeders on the resonant frequencies of the overhead line during a single-phase ground fault // *News of higher educational institutions. Energy problems.* 2018. Vol. 20. no. 1–2. pp. 54–61.
11. *Kulikova N.A., Titorenko O.M., Tyapkina V.A.* Resistive neutral grounding – a method for improving the reliability of electrical networks of 6–35 kV // *Power plants and Technologies.* 2018. vol. 4. No. 2.
12. *Ryzhkova E.N., Kudrin B.I., Fomin M.A.* Economic efficiency of transferring 6–35 kV power supply networks to the controlled resistive grounding mode. *Bulletin of the MEI.* No. 3. 2013.
13. *Tselebrovsky Yu.V.* Normative support of the neutral mode in electric networks // *Modes of grounding of the neutral of networks 3–6–10–35 kV: Reports of the scientific and technical conference.* Novosibirsk, 2000. p. 3–6.
14. *Borukhman V.A.* On the operation of selective earth fault protection in 6–10 kV networks and measures for their improvement // *Energetik.* 2000. No. 1. pp. 20–22.
15. *Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., Sharipov A.M.* Digital system for monitoring damage on power transmission lines // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy.* Energy problems. 2021. No. 23(1). P. 146–155.
16. *Myshkina L.S.* Malaya generatsiya – a means of increasing the survivability of the energy system. *Izvestiya vysshnykh uchebnykh zavedeniy.* Energy problems. 2017. Vol. 19, no. 1–2. p. 23–30.
17. *Bouziane B., Elmaouhab A., et al.* Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar’s Isolated Network of Algeria // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26–27 august 2019. IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.
18. *Guillen D., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. et al.* Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // *Measurement.* 2019. V. 141. pp. 24–36.
19. *Mejia-Barron A., Valtierra-Rodriguez M., Granados-Lieberman D. et al.* The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents // *Measurement.* 2018. V. 117. pp. 371–379.
20. *Manilov A.M.* A method for ensuring the sensitivity of protections against single-phase earth faults in a 6–10 kV network // *Energoexpert.* 2011. No. 4.
21. *Shalin A.I.* Earth closures in 6–35 kV networks. Cases of incorrect actions of protection // *News of Electrical Engineering.* 2005. № 2 (32).
22. *Titenkov S.S., Pugachev A.A.* Neutral grounding modes in 6–35 kV networks and the organization of relay protection against single-phase earth faults // *Energoexpert.* 2010. No. 2.
23. *Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Alekseenko E.A.* Analysis of the applicability of simplified models of the external network for determining short-circuit currents in traction power supply systems of railways. *Energy problems.* 2017. No. 19 (11–12). P. 12–20.
24. *Lykin A.V., Utkin E.A.* Distribution electric networks of 10/0. 4 kV with the maximum approximation of transformer substations to consumers // *News of higher educational institutions. Energy problems.* 2019. No. 21(3). P. 46–54.
25. *Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow.* RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.
26. *Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A.* Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv Distribution Circuits by a Location Method. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411–415.
27. *Goryunov V.A.* Single-phase earth fault. Is it possible to solve the problem? // *Electrical Engineering News.* 2017. No. 2 (104).