



Журнал 2(104)-3(105) 2017 год

## **Релейная защита**

Возникновение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и причины неправильного действия защит от ОЗЗ неоднократно обсуждались в специальных изданиях. Публикации А.И. Шалина и К.П. Кадомской, Р.А. Вайнштейна и С.И. Головки, С.Л. Кужекова и В.А. Шуина, Ю. В. Целебровского, Г.А. Евдокунина и многих других исследователей задали высокую планку для дальнейшего изучения этой темы.

Процесс создания оптимальной системы для своевременной ликвидации ОЗЗ продолжается, появляются новые идеи, технологии, устройства. Вячеслав Александрович Горюнов предлагает еще раз остановиться на проблемах этих замыканий и проанализировать существующие методы защиты.

# **ОДНОФАЗНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ**

## **Можно ли решить проблему?**

**Вячеслав Горюнов,**

к.т.н., рук. отдела разработок РЗА, ООО «НПП Микропроцессорные технологии»,  
г. Новосибирск

Замыкание фазы на землю создает ненормальный режим и представляет опасность по ряду причин:

- возможность появления перенапряжения, 2,4–3,5-кратного по сравнению с фазным [1, 2, 3], что может привести к пробое изоляции неповрежденных фаз и переходу ОЗЗ в «двухместное» или двойное замыкание на землю, близкое по своим характеристикам к двухфазным коротким замыканиям (КЗ). Риск возникновения таких двойных замыканий заметно вырос в последнее время в связи со старением изоляции электрических машин и аппаратов на многих энергообъектах и отсутствием средств на их модернизацию и замену;
- возникает опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала и потребителей;
- при длительном наличии ОЗЗ в сети происходит ускоренное старение изоляции и повреждение электрооборудования;
- возможны явления феррорезонанса (особенно при поочередном отключении потребителей), от которых чаще всего выходят из строя трансформаторы напряжения.

По перечисленным причинам замыкания на землю необходимо отключать. В сетях, работающих в условиях повышенной опасности для обслуживающего персонала, защита от замыканий на землю выполняет функции защитного отключения и по условиям техники безопасности должна работать без выдержки времени на отключение. Для защиты электродвигателей от замыканий на корпус необходимо применять специальные защиты, обладающие высокой чувствительностью, поскольку токи замыкания на корпус менее 5 А могут представлять для изоляции опасность [4].

### **Индивидуальные защиты присоединений**

Любое развитие техники идет методом от простого к сложному. Наиболее простыми защитами от замыканий на землю являются защиты по току и напряжению нулевой последовательности НП промышленной частоты. Для реализации таких защит достаточно устройства, реагирующего на действующее значение тока или напряжения соответственно. Однако простота таких устройств сказывается на их возможностях. Общая неселективная защита по напряжению нулевой последовательности только сигнализирует о появлении замыкания на землю на любом присоединении секции. Среди недостатков токовых

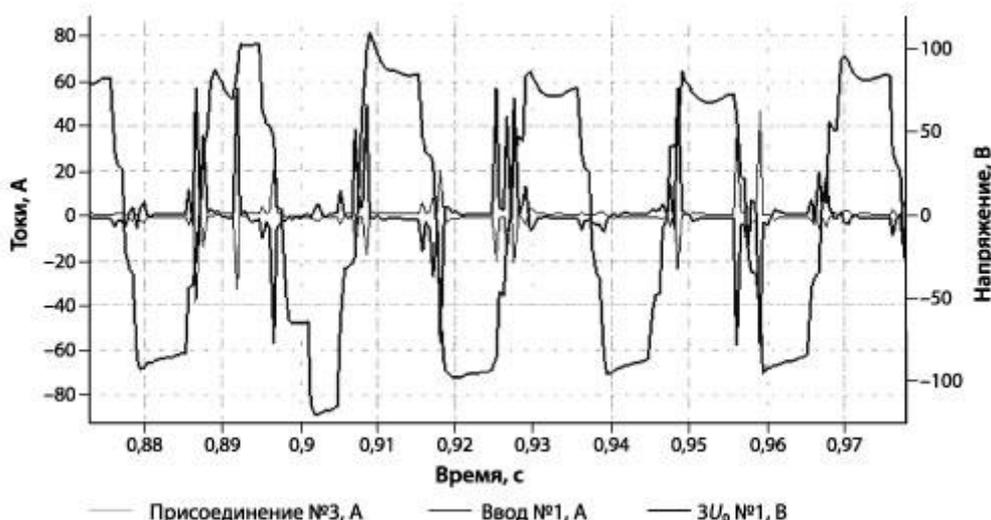
защит НП можно отметить следующие: фиксированная уставка, отстройка тока срабатывания от суммы тока небаланса нулевой последовательности и собственного емкостного тока линии, отказ в срабатывании при перемежающихся замыканиях при защите как кабельных линий (КЛ), так и воздушных (ВЛ) [5]. Для защит на токовых реле РТ 40/0,2 и РТЗ-50 возможны излишние срабатывания при внешних ОЗЗ из-за резкого увеличения токов нулевой последовательности при дуговых замыканиях за счет высокочастотных составляющих [6, 7]. А для защит на реле РТЗ-51 при питании от сети постоянного тока 110 или 220 В возможны ложные срабатывания в моменты коммутации в сети, возникающие по различным причинам [8].

При реализации токовых защит НП на микропроцессорных (МП) терминалах появилась возможность использовать сложные характеристики зависимости тока срабатывания от времени. Поэтому появились защиты с обратозависимой времятоковой характеристикой, для них [9] не требуется отстройка от собственного емкостного тока присоединения. Однако такой принцип действия защит имеет ряд существенных недостатков. Основной недостаток заключается в том, что селективность срабатывания обеспечивается выдержкой времени, в связи с этим создание зависимых систем с различными выдержками времени становится практически невозможным. Работа таких защит возможна только на отключение, иначе по истечении некоторого времени все защиты начнут сигнализировать о наличии замыкания на землю. При отказе выключателя поврежденного присоединения произойдет неселективное отключение присоединения со вторым по величине током.

Защиты, использующие только один сигнал тока НП, несмотря на свою простоту имеют существенные недостатки, которые будут приводить к их неселективным действиям. В ходе дальнейшего усовершенствования таких защит стали использовать два сигнала – ток и напряжение НП для определения направления. Большое число направленных защит реагируют на направление мощности нулевой последовательности в установившемся режиме. Чувствительность таких защит выше, чем ненаправленных, так как их ток срабатывания отстраивается [6, 7] только от тока небаланса в «максимальном рабочем режиме», а отстройка защиты от собственного емкостного тока линии не требуется, поскольку от этого тока она отстроена «по направлению». Общим недостатком защит такого типа являются их неселективные действия или отказ в срабатывании при перемежающихся дуговых ОЗЗ. Эта неселективность не связана с программной или аппаратной реализацией. Направленные защиты – это такие защиты, которые определяют разность фаз между сигналами и в зависимости от полученного угла принимают решение. Однако разность фаз можно определить только для гармонических сигналов, т. е. сигналов одной частоты. Если рассмотреть осциллограмму замыкания на землю в

кабельной сети 10 кВ на рис. 1, то можно сделать вывод, что понятие угла между кривыми тока и напряжения отсутствует, так как сигналы не гармонические.

**Рис. 1. Осциллограмма дугового замыкания на землю в кабельной сети 10 кВ**



Другим методом определения поврежденного присоединения с использованием сигналов тока и напряжения НП является расчет активной мощности нулевой последовательности в установившемся режиме [10, 11]. Защиты, реализованные на этом принципе, обладают более высокой устойчивостью функционирования в режимах с перемежающейся дугой в месте ОЗЗ и отстроены в большей мере от бросков емкостных токов в переходных процессах. Обеспечить стабильное функционирование таких защит возможно в основном в сетях с резистивным заземлением нейтрали.

Для устранения недостатков защит, использующих токи и напряжения НП промышленной частоты, были разработаны защиты от ОЗЗ, реагирующие на высшие гармоники электрических величин [1]. При возникновении дуговых ОЗЗ содержание высших гармонических составляющих в сети резко увеличивается, причем содержание высших гармонических в токе нулевой последовательности поврежденной линии значительно больше, чем в токах нулевой последовательности неповрежденных линий. Эти процессы наблюдаются в сетях всех видов заземления нейтрали. Общие недостатки устройств, выполненных с использованием высших гармоник:

- вероятность отказа в срабатывании при ОЗЗ через переходные сопротивления [12, 13];
- нестабильность состава и уровня высших гармоник в токе НП. Условия селективности несрабатывания при внешних ОЗЗ и устойчивости срабатывания при внутренних повреждениях для

устройств абсолютного замера высших гармоник обеспечиваются в основном на крупных подстанциях и электростанциях с большим числом присоединений.

Другая категория защит – это защиты от ОЗЗ, реагирующие на электрические величины переходного процесса [1, 14]. Среди достоинств таких защит можно отметить возможность фиксации всех разновидностей ОЗЗ, независимость действия от режима заземления нейтрали, большую чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление, большие значения амплитуд переходных токов, упрощающие отстройку от токов небаланса фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) и обеспечение высокой помехоустойчивости и чувствительности защиты.

Но и такие защиты обладают недостатками. Всем защитами присущи единые недостатки, такие как отсутствие непрерывного действия защиты, искажение фазовых соотношений между током и напряжением, возникающее в момент ОЗЗ в отраженной от конца защищаемой линии волне [15], возможные ложные срабатывания от помех, возникающих одновременно в цепях тока и напряжения при отсутствии ОЗЗ, например возможна ложная работа таких защит в сетях с компенсированной нейтралью при отключении трехфазных КЗ. В защитах КЗЗП и ПЗЗМ применен принцип отдельной фиксации начальных знаков переходного тока и напряжения нулевой последовательности с последующим их сравнением, который менее эффективен из-за возможности излишних срабатываний при малых значениях подведенных величин [1].

И последняя группа защит от ОЗЗ, которые следует рассмотреть, это защиты, реагирующие на наложенный ток [1]. Наложный ток может быть частотой как выше промышленной, так и ниже. Для создания тока повышенной частоты возможно использование нелинейного сопротивления, включенного между нейтралью сети и землей. Однако данное устройство значительно повышает стоимость таких защит и может снизить надежность функционирования защиты. Также можно отметить тот факт, что значительная высокочастотная составляющая может присутствовать в токах присоединений и в нормальном режиме. Это в первую очередь относится к сетям, связанным с производствами, имеющими нелинейную нагрузку. В таких случаях описанный способ защиты непригоден. Кроме того, как показывают проведенные исследования [16], гармоники с частотой 100 Гц появляются почти в 2 раза чаще, чем, например, с частотой 25 Гц, и амплитуды их намного больше.

Поэтому ряд разработчиков создали защиты, реагирующие на наложенный ток частотой ниже промышленной. Различие по частоте тока небаланса ФТНП (50 Гц и гармоники, кратные трем) и воздействующей величины (25 Гц) позволяет упростить отстройку

защиты от небаланса и избежать загробления защиты по первичному току. Сам наложенный ток частотой ниже промышленной получить проще, и требуется меньшая мощность генерирующего источника. В результате такие защиты обеспечивают возможность замера больших значений активного сопротивления фазовой изоляции, имеют меньшую зависимость чувствительности от переходного сопротивления в месте замыкания и лучшую помехозащищенность от тока промышленной частоты [17].

К основным недостаткам защит, реагирующих на наложенный ток частотой ниже промышленной, можно отнести необходимость подключения в нейтраль сети специального устройства для создания контрольного тока, влияние на устойчивость функционирования защиты погрешностей ТНП, возрастающих при уменьшении рабочей частоты, усложнение схемы первичной коммутации из-за необходимости подключения источника наложенного тока и трудности подключения источника вспомогательного тока при использовании в сети нескольких ДГР, установленных на разных объектах. Не исключены также сложности отстройки от естественных гармонических составляющих при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ, при которых спектр тока зависит от параметров сети и режима заземления ее нейтрали, положения точки ОЗЗ в сети. Кроме того, при замыканиях через большие переходные сопротивления происходит снижение контрольного тока [18].

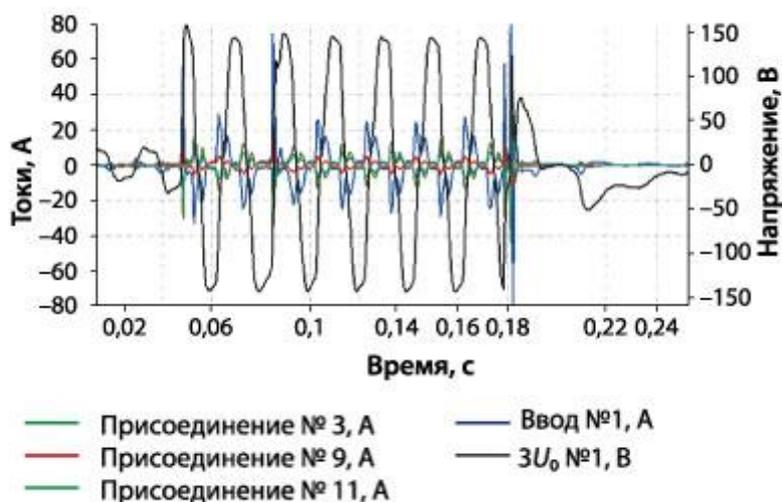
В целом все индивидуальные защиты имеют общие недостатки, связанные либо с принципом действия, либо с непосредственной реализацией устройств защиты. При этом появление микропроцессорных устройств защиты не сдвинуло решение проблемы выявления поврежденного присоединения в позитивную область, так как сами алгоритмы определения замыкания на землю остались прежними.

Обобщая, можно выдвинуть следующие основные требования к защитам: использование уставки, зависящей от параметров замыкания, выявление замыканий через большие переходные сопротивления и дугу, возможность создания системы ступенчатых защит от замыканий на землю. Именно невозможность учесть эти требования приводит к низкой эффективности устройств индивидуального типа.

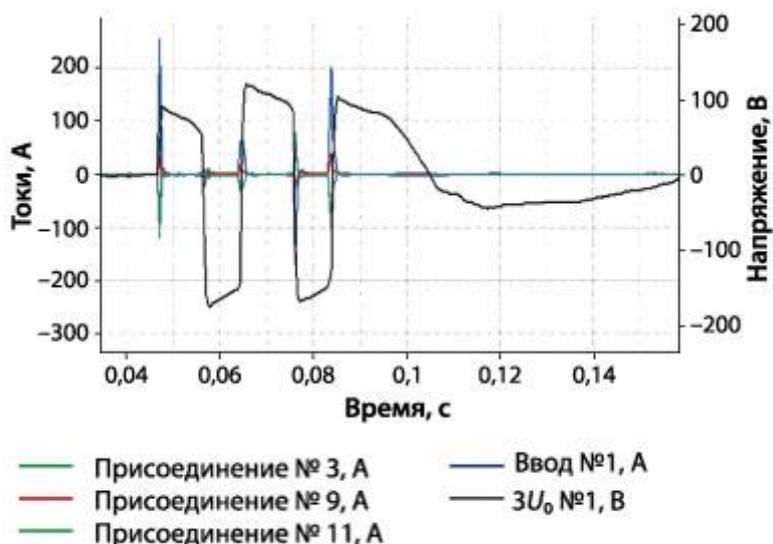
## Виды ОЗЗ

Чтобы понять, в чем сложность выявления ОЗЗ, рассмотрим процессы, происходящие в сети. Можно выделить два основных вида однофазного замыкания на землю: металлическое (рис. 2, 3) и дуговое (рис. 4, 5). Металлическое и дуговое замыкание может происходить через повышенное сопротивление в месте контакта с землей, что приведет к снижению как токов однофазных замыканий, так и напряжения нулевой последовательности.

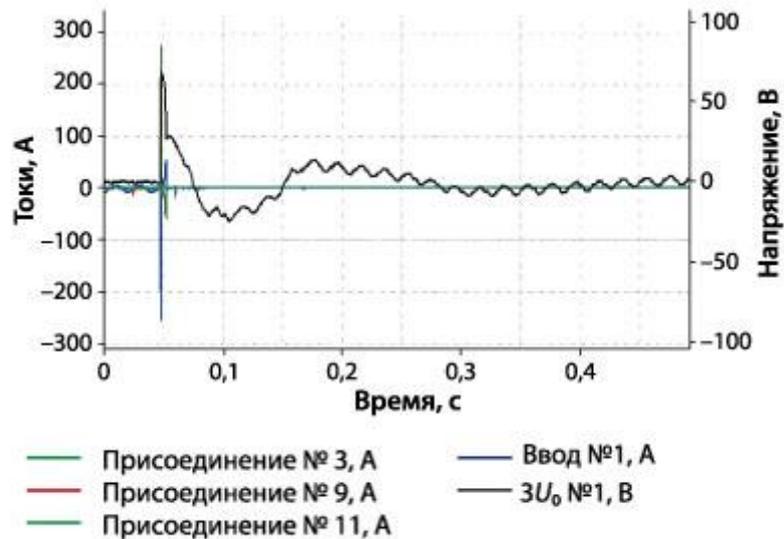
**Рис. 2. Осциллограмма самоустранившегося ОЗЗ в кабельной сети 10 кВ**



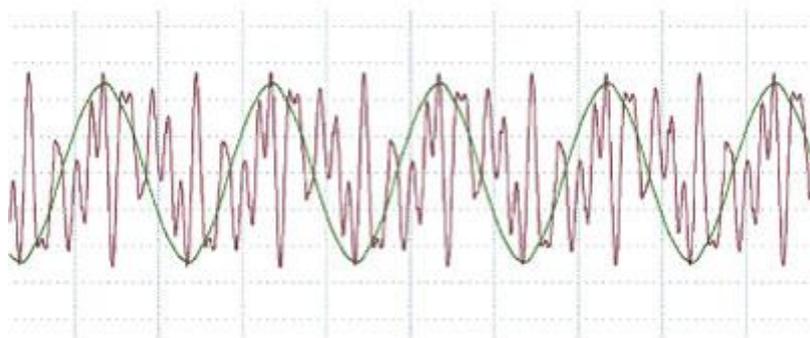
**Рис. 3. Осциллограмма дугового самоустранившегося ОЗЗ в кабельной сети 10 кВ**



**Рис. 4. Осциллограмма токов и напряжений НП при включении присоединения с разновременностью включения полюсов выключателя**



**Рис. 5. Осциллограмма тока и напряжения нулевой последовательности при металлическом ОЗЗ в сети с компенсацией емкостного тока**



Наиболее часто переходное сопротивление оказывает влияние на ВЛ, где происходит контакт с деревьями или падение провода на землю. Для наглядности приведем статистику по ОЗЗ в городской кабельной сети 10 кВ (поиск ОЗЗ в сети осуществлялся путем поочередного отключения, соответственно ОЗЗ существовало длительное время):

- 3% замыканий самоустранились до действий персонала;
- 38% замыканий перешли в двойные замыкания с работой токовых защит;
- 59% ОЗЗ были выявлены и ликвидированы персоналом.

При этом все эти замыкания можно разделить по типам:

- 44% – металлические замыкания;
- 26,5% – дуговые замыкания на землю;
- 29,5% – самоустранившиеся замыкания.

В сетях с ВЛ процент дуговых замыканий достигает 80%.

Самоустранившиеся замыкания – это, по сути, нерешенная проблема. По результатам мониторинга, все самоустранившиеся замыкания в течение 1–7 дней приводили к устойчивым замыканиям (рис. 2, 3). При этом «клевков земли» наблюдалось несколько за сутки, в основном в ночное время, когда фазное напряжение несколько возрастает из-за снижения нагрузки. Поэтому важно иметь быстродействующие защиты от замыканий на землю. В совокупности с построением системы защиты от ОЗЗ, основанной на ступенчатом принципе обеспечения селективности, поврежденное присоединение будет отключаться с минимальной выдержкой времени. И «клевки земли» не будут нарушать нормальную работу сети.

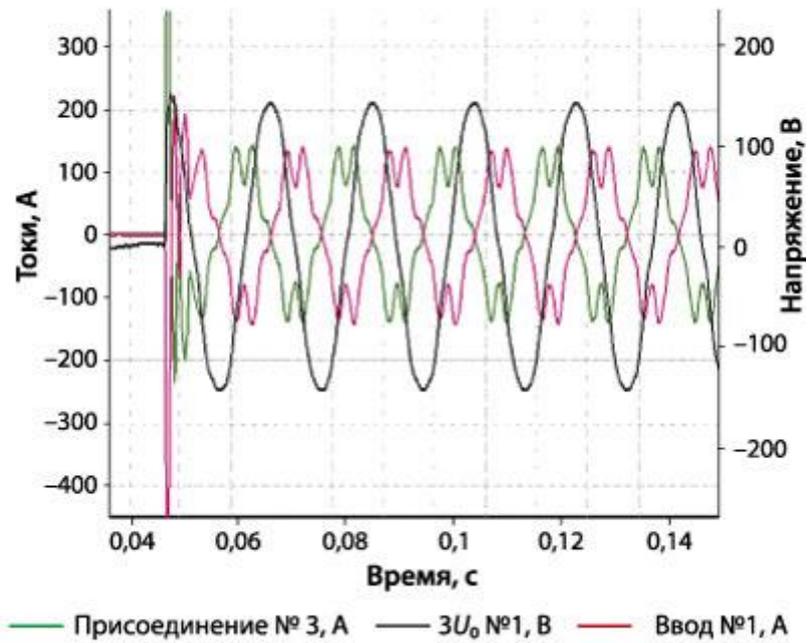
Кроме самоустранившихся ОЗЗ, в сети в моменты коммутаций из-за одновременности включения полюсов выключателя возникают несимметрии, приводящие к подбросу напряжения нулевой последовательности и появлению токов НП. Для защит, действующих без выдержки времени или реагирующих на составляющие переходного процесса в момент ОЗЗ, такой режим может привести к неселективным действиям (рис. 4).

Наиболее простым режимом является металлическое ОЗЗ, когда токи представляют собой четкий периодический сигнал и нет непрерывного переходного процесса. На рис. 5 представлена осциллограмма тока и напряжения в поврежденном присоединении при компенсации основной гармоники емкостного тока практически в «ноль». Как видно из осциллограммы, применение направленных защит для сетей с компенсированной нейтралью невозможно, так как нет возможности определить направление – частота тока и напряжения отличаются.

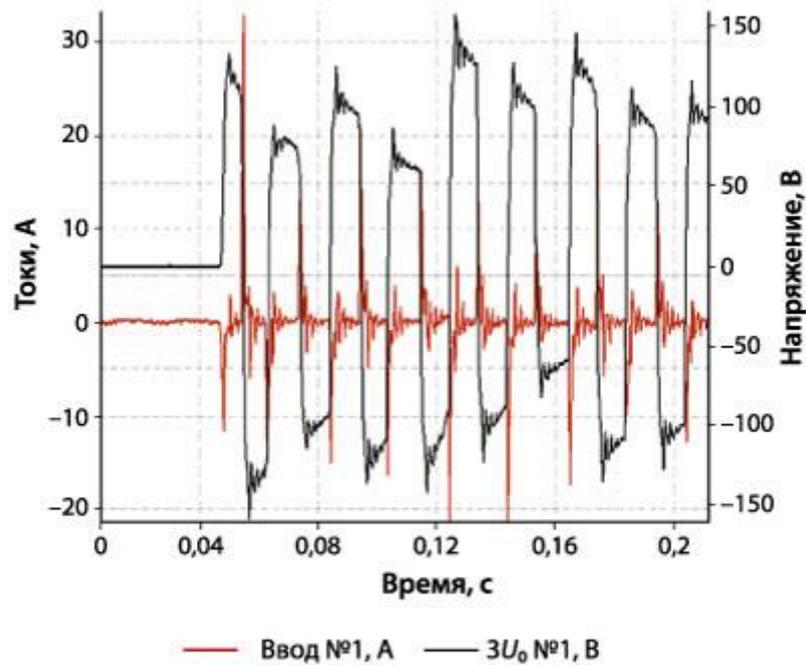
В сетях с изолированной нейтралью основная гармоника превышает все остальные в 5–10 раз. При металлическом ОЗЗ (рис. 6) можно определить направление на установившемся участке осциллограммы. Поэтому при металлических ОЗЗ большинство защит будет работать корректно.

Совершенно иная картина складывается при возникновении дугового замыкания на землю. В графике преобладают броски тока в моменты перезаряда емкостей через дугу. При этом такие броски тока достигают 4–8-кратной величины тока основной гармоники (рис. 7, 8). Дуга горит нестабильно – меняется частота перезажиганий (рис. 8), замыкание может начать перемежаться, т. е. зажигаться с периодичностью реже чем 2–4 раза за период, что приводит к сбросу таймера выдержки времени ряда защит от ОЗЗ.

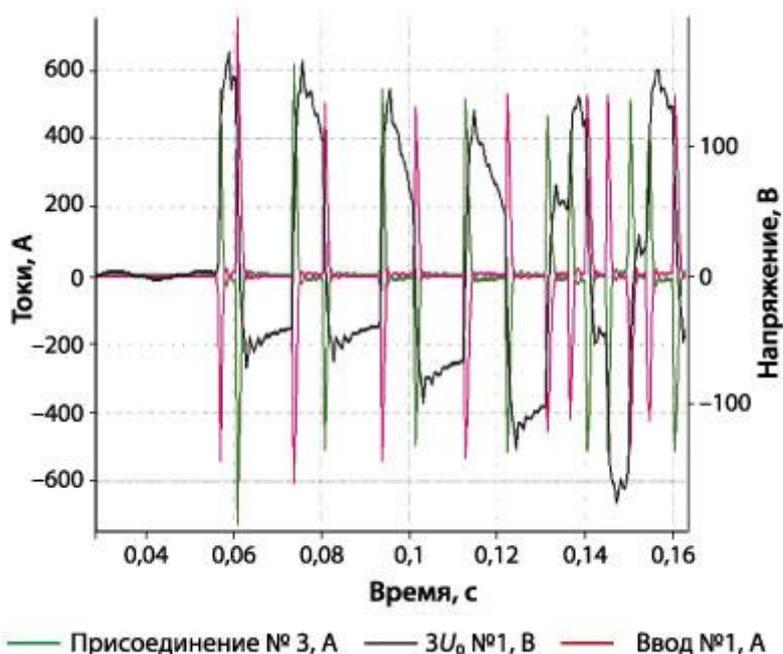
**Рис. 6. Осциллограмма металлического ОЗЗ в сети без компенсации токов замыкания на землю**



**Рис. 7. Осциллограмма дугового ОЗЗ во внешней сети**



**Рис. 8. Осциллограмма дугового ОЗЗ на отходящем присоединении без компенсации токов замыкания на землю**



### Централизованные защиты от ОЗЗ

Как было показано, большинство индивидуальных защит имеет различные недостатки. Это сказывается на работе сети. Если защиты отказывают в действии либо отсутствуют, то замыкания на землю могут привести к крупным авариям, сопровождающимся значительным ущербом, а также к старению изоляции всей сети, накопительный эффект от которого оценить не представляется возможным.

Сам принцип функционирования централизованных защит обеспечивает более высокое качество защиты [7, 19], используя информацию о токах НП не только своего присоединения или секции сборных шин, но и информацию с других объектов, например, поступающую от трансформаторов тока, измеряющих ток высоковольтного заземляющего резистора, а также ТНП другой секции.

Централизованный принцип построения защиты предполагает сравнение токов нулевой последовательности присоединений. В основном применяют сравнение амплитудных или действующих значений токов нулевой последовательности. Расчет этих значений может проводиться как в начальный момент времени, то есть основываясь на переходных величинах замыкания, так и в установившемся режиме. Кроме того, возможно применение высших гармонических составляющих токов нулевой последовательности либо тока, наложенного с частотой, отличной от промышленной. Для расширения области применения для подстанций с большим числом присоединений, возможно введение в такие защиты дополнительной информации, которая позволяет произвести отстройку от действия в

некоторых сложных режимах. Например, получение информации о напряжении нулевой последовательности с другой секции шин подстанции может повысить чувствительность [19]. Это требуется в некоторых случаях в сетях 35 кВ, состоящих преимущественно из двухцепных ВЛ. Централизованные защиты (ЦЗ) могут применяться во всех сетях среднего напряжения, это могут быть как сети с изолированной и компенсированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через резистор.

Существует два метода определения максимального значения сигнала – это методы последовательного и параллельного сравнения. Метод параллельного сравнения можно выполнить на основе специальных физических элементов. Последовательное сравнение идет значительно медленнее, и до появления быстродействующих микропроцессорных защит считалось, что защиты, выполненные на основании метода последовательного сравнения, имеют недостаточное быстродействие. Именно появление микропроцессорных устройств релейной защиты обеспечило толчок к реализации централизованных защит от замыканий на землю. Микропроцессорные устройства позволяют обрабатывать до 48 каналов одновременно, с разницей измерения токов по каналам не более 100 мкс. При быстродействиях меньше 100 мкс применение централизованного принципа теряет всю целесообразность, так как защита превращается в индивидуальные устройства внутри одного блока защиты. По принципу последовательного сравнения ранее выпускались защиты, где дежурный персонал методом поочередного измерения напряжения на клеммах реле измерял протекающие токи и делал вывод о поврежденном присоединении самостоятельно.

Одна из особенностей централизованной защиты от замыканий на землю – возможность выявления ОЗЗ на шинах, что означает, по сути, ОЗЗ в любом присоединении, не имеющем ТТНП, на ТН, в обмотках ТСН и силовых трансформаторов. Для выявления таких повреждений централизованная защита должна работать как дифференциальная защита шин от ОЗЗ. Этот подход стал классическим и используется в большинстве современных МП-устройств защиты от замыканий на землю [20].

В отличие от индивидуальных защит, имеющих проблемы с постоянно изменяющимся уровнем емкостного тока, ЦЗ обеспечивают селективность действия в подавляющем большинстве случаев, так как емкостные токи суммируются в поврежденном присоединении независимо от их абсолютных уровней, конкретных параметров и состояния сети, а также от вида заземления нейтрали.

Признаки, на которых основаны централизованные защиты:

- сравнение активной мощности нулевой последовательности;
- выявление наложенного тока;
- сравнение действующих значений сигналов токов нулевой последовательности;
- сравнение сумм действующих значений токов высших гармоник;
- сравнение направлений токов.

Недостатки имеются и у указанных принципов действия.

Сравнение активной мощности нулевой последовательности стабильно работает только в сетях с большой составляющей активной утечки и в сетях с резистивным заземлением нейтрали. Поэтому такой принцип нельзя назвать универсальным. Принцип наложения тока с использованием централизованных защит – один из самых надежных вариантов реализации защит, особенно при использовании наложенного тока специальной формы. Однако сложности реализации именно устройств генерации наложенного тока, особенно в разветвленных сетях, при возможности переключения питания на разные источники ограничивает применение этого признака. Оставшиеся три признака – наиболее распространенные и эффективные.

Кроме того, можно выделить и недостатки самой реализации централизованных защит, связанных с аппаратной архитектурой и принципом действия:

- сложность монтажа на подстанции, так как требуется собрать информацию со всех ячеек в одном месте;
- отказ одного устройства приводит к отказу защит от ОЗЗ на всей подстанции;
- необходимо не менее трех присоединений, по которым протекает ток ОЗЗ, для работы защиты;
- невозможно отличить соразмерные токи большой величины по причине погрешности ТТНП до 10%.

### **Система защиты «ГЕУМ»**

Централизованная система защиты «Геум» позволяет построить систему защиты от замыканий на землю без указанных недостатков. Устройства серии «Геум» имеют до 16 аналоговых входов по току и напряжению, что позволяет реализовать защиту до 16 отходящих присоединений от ОЗЗ. Но для того чтобы увеличить гибкость системы, было предложено распределенное решение с горизонтальным обменом данными между устройствами. Таким образом решается сразу несколько проблем: уменьшается размер одного блока защиты, уменьшается длина токовых цепей до устройства централизованной защиты. Всего можно подключить до 8 блоков одновременно, что обеспечивает защиту 128 присоединений от замыканий на землю.

Сама реализация системы предложена в трех видах:

- для существующих РП и подстанций: «Геум» устанавливается в ячейку секционного разъединителя, а устройства сопряжения (УСО) устанавливаются в ячейки отходящих присоединений. При этом минимизируются токовые цепи от ТНП до УСО;
- при реконструкции подстанций и РП в шкаф секционного разъединителя устанавливаются все элементы системы – «Геум» и УСО;
- при новом строительстве – шкафовое решение на 1 и 2 блока «Геум», что позволяет защитить одним шкафом до 32 присоединений.

Ввиду существенных отличий сетей с компенсацией емкостных токов от сетей с изолированной нейтралью, были разработаны две разновидности устройства – «Геум-К» и «Геум-И». При этом работа «Геум-К» гарантируется и при потере компенсации. Отличия между блоками состоят в разном диапазоне частот токов. Поставки устройств серии «Геум» начались в 2013 г. За прошедшие годы на объектах электроэнергетики установлено и эксплуатируется 91 устройство. Максимальное количество защищаемых присоединений системой «Геум» на практике на данный момент – 90. Общая наработка комплексов уже составила более 370 000 часов. В 2015 г. устройство серии «Геум» прошло испытания в АО «НТЦ ФСК ЕЭС», где оно корректно сработало в 100% тестовых осциллограмм.

Основные сложности в работе с устройствами серии «Геум» возникают на стадии наладки в основном из-за отсутствия опыта работы с цифровой связью и нестандартным оборудованием РЗА.

В заключение отметим, что централизованная система «Геум» обеспечивает защиту от ОЗЗ в сетях с любым типом нейтрали, во всех возможных режимах работы, включая дуговые замыкания, работу на два отходящих присоединения.

## Литература

1. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с. (Библиотечка электротехника. Вып. 11(35)).
2. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 368 с.
3. Качесов В.Е., Ларионов В.Н., Овсянников А.Г. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях // Электрические станции. 2002. № 8. С. 38–45.
4. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 248 с.: ил.
5. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
6. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
7. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. М.: Недра, 1986. 184 с.
8. Захаркин И.В. Об опыте наладки реле тока РТЗ-51 // Промышленная энергетика. 1989. № 3. С. 24–25.
9. Нудельман Г.С., Шевелев В.С. Избирательная защита от замыканий на землю для распределительных сетей 6–35 кВ // Энергетик. 2001. № 3. С. 32–33.
10. Олейник С.И., Сафарбаков А.А. Защита от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ с компенсированной нейтралью, реагирующая на активную составляющую // Электрические станции. 2002. № 3. С. 60–62.
11. Шалин А.И., Политов Е.Н. Защита от замыканий на землю, реагирующая на сопротивление и проводимость цепей нулевой последовательности // Электроэнергетика: Сб. науч. трудов. Часть 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. С. 74–84.
12. Централизованная сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях с использованием наложенного тока второй гармоники // И.М. Сирота, А.Е. Богаченко, А.П. Шаповал и др. Автоматизация и релейная защита энергетических систем. Киев, 1981.
13. Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986. 151 с.
14. О параметрических методах локализации однофазных замыканий в распределительных сетях / Л. В. Богдашева, В. Е. Качесов // Научный Вестник НГТУ. 2006. № 3(24).

15. 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.
16. Вайнштейн Р.А., Головки С.И. О гармоническом составе токов нулевой последовательности в сетях с компенсацией емкостных токов при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу // Известия вузов. Энергетика. 1978. № 12. С. 14–19.
17. Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Григорьев В.С. и др. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Электрические станции. 1998. № 7. С. 26–30.
18. Головки С.И., Вайнштейн Р.А., Юдин С.М. Селективная сигнализация однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 30, 35 кВ // Электрические станции. 2000. № 7. С. 33–36.
19. Шалин А.И., Щеглов А.И. Концепция релейной защиты от замыканий на землю в сетях 35 кВ с резистивно-заземленной нейтралью // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ: Доклады научно-технической конференции. Новосибирск: ГЦРО, 2000. С. 149–160.
20. Булычев А.В., Соловьев И.В., Агельский А.В. Способ централизованной селективной защиты от замыканий на землю в распределительной электрической сети. Патент на изобретение № 2565060, H02H 3/16 (10.09.2013) // Бюлл. № 29. Оpubл. 20.10.2015.