

УДК 621.316, 621.316.8

Шифр специальности ВАК 2.4.3.

# РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6–35 кВ

Представлены нормативные требования, методы и средства измерения тока замыкания на землю, определения его активной и реактивной, а также высших гармонических составляющих посредством цифровой регистрации переходных и установившихся процессов, сопровождающих однофазные повреждения в электрических сетях 6–35 кВ различного назначения. Акцент сделан на методику и результаты практического применения способов с созданием искусственного управляемого замыкания на землю и асимметрированием фазы с помощью дополнительной емкости. Приведены примеры с описанием схемы подключения, состава и характеристик измерительного оборудования и визуализацией результатов натурных испытаний в действующих электроустановках. В качестве альтернативного способа регистрации электромагнитных процессов, который не предусматривает запись тока в месте повреждения и предназначен для исследования перенапряжений, а также оценки эффективности первичного оборудования в нейтрали и проверки действия релейной защиты от однофазных замыканий, предложен мониторинг перенапряжений в распределительной сети на основе широкополосных преобразователей.



Источник: фотобанк ООО «Болид»

АВТОРЫ:

А.И. Ширковец, к. т. н.,  
ORCID ID 0009-0003-5145-9700,  
shirkovets@pnpbolid.com,  
доцент ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический  
университет»,  
заместитель директора  
ООО «Болид», Новосибирск,  
Россия

А.В. Егошин, главный инженер  
«Восточные электрические сети»  
филиал «Россети Новосибирск»  
(АО «Региональные электрические  
сети»), Новосибирск, Россия

А.А. Челазнов, д. т. н.,  
руководитель проекта  
АО «Объединенная энергетическая  
компания», Москва, Россия

А.Г. Лиске, ведущий инженер  
ООО «Болид», Новосибирск,  
Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

#электромагнитный процесс;  
#однофазное замыкание  
на землю; #методы натурального  
измерения; #емкостный ток;  
#режим заземления нейтрали;  
#осциллографирование  
сигналов; #делители напряжения;  
#гармонический анализ;  
#мониторинг перенапряжений

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Ширковец А.И., Егошин А.В.,  
Челазнов А.А., Лиске А.Г.  
Регистрация электромагнитных  
процессов в широкой полосе  
частот при однофазном замыкании  
в электрической сети 6–35 кВ //  
Энергия единой сети. 2026. № 1 (80)  
С. 20–33.

©

## ВВЕДЕНИЕ

Измерения емкостного тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в электрической сети напряжением до 35 кВ включительно регламентируются действующими Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [1, п. 571, п. 621]. Согласно указанным Правилам, в электрических сетях 6–35 кВ не реже чем один раз в 6 лет необходимо проводить измерение емкостных токов, токов дугогасящих реакторов, токов замыкания на землю и напряжения смещения нейтрали. При этом допускается определение емкостных токов выполнять расчетным путем «для сети с простой конфигурацией или сети, не подвергавшейся значительным изменениям конфигурации». Однако большинство кабельных и кабельно-воздушных распределительных сетей с дугогасящими реакторами (ДГР) имеет разветвленную структуру, в связи с чем необходимо проводить рассматриваемые измерения как минимум при вводе в эксплуатацию новых реакторов или при замене ранее установленных устройств компенсации, исчерпавших свой ресурс, например, аппаратов ступенчатого типа.

Следует отметить, что для сетей сложной конфигурации получить достоверные результаты по величине емкостного тока ОЗЗ расчетным путем крайне затруднительно. Для протяженных электрических сетей 6–35 кВ промышленных предприятий и городов с линиями электропередачи на основе кабелей и проводов различных типов, разного сечения и длины, технологическими электродвигателями, распределительными и трансформаторными подстанциями (РП и ТП) характерна ситуация с нормальным и резервным электроснабжением от разных центров питания. Как правило, прилегающие сети таких центров, к которым относятся шины среднего напряжения электросетевых подстанций 110–220 кВ и схемы выдачи мощности электростанций, принадлежат или находятся в оперативном управлении нескольких независимых собственников. Ввиду этого, а также из-за отсутствия информации о фактических параметрах линий сети, которая может быть утеряна или не актуализирована, провести корректный расчет емкостного тока в ряде случаев становится невозможно. Нормативное требование [1, п. 621] в части периодичности выполнения измерений не реже 1 раза в 6 лет зачастую не соблюдается из-за отсутствия у эксплуатирующего персонала опыта таких испытаний (либо наличием негативного опыта с аварийными отключениями при измерениях), подробной методики и необходимой измерительной аппаратуры.

В современных условиях использования систем компенсации емкостного тока (КЕТ) на основе разных видов и конструкций ДГР, а также принципов их автоматического управления, внедрения новых схем резистивного и комбинированного заземления нейтрали актуальной задачей становится контроль правильности их работы (в том числе точности настройки) с проведением искусственных управляемых ОЗЗ с глухим «металлическим» замыканием или при помощи искрового промежутка, моделирующего горение перемежающейся дуги. Существуют также способы определения емкостного тока методом инъекции тестового сигнала в контур нулевой последо-

вательности, которые реализованы в форм-факторе переносных защищенных кейсов [2]. Такие приборы не являются поверяемыми средствами измерения, внесенными в государственный реестр, и поэтому используются для определения некоторого «ожидаемого» значения емкостного тока с непрогнозируемой погрешностью.

В целом измерение емкостного тока и сопутствующих параметров сети с помощью натурального эксперимента нужно для выбора или проверки оборудования для заземления нейтрали. Так, это дает возможным оценить необходимость (достаточность) мощности существующих устройств КЕТ на предмет соответствия нормам [1], определить в количественных показателях точность настройки установленной системы КЕТ, а также проверить работоспособность и селективность штатных защит от замыканий на землю (включая фазировку вторичных цепей кабельных трансформаторов тока) либо шкафов автоматики определения поврежденного фидера.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Выбор способа и методики проведения испытаний выполняется исходя из объема ожидаемых результатов, с учетом требований бесперебойного электроснабжения потребителя, безопасности и информативности измерений. Основные методы измерения емкостного тока ОЗЗ представлены в РД 34.20.179 (ТИ 34–70–070–87) [3]. На сегодняшний день указанная типовая инструкция как нормативный документ не имеет четкого статуса, но формально не отменена. Следует отметить, что с 2015 г. указанный документ перерабатывается и актуализируется для нужд ПАО «Россети» силами сторонней организации, однако новая редакция документа до настоящего времени не утверждена и не опубликована.

На практике используются преимущественно следующие методы определения емкостного тока:

- создание несимметрии фазных напряжений с помощью подключения проводимости (обычно емкостной) к одной фазе сети;
- создание искусственного «металлического» ОЗЗ с помощью гибкого медного многожильного провода или шины, рассчитанных на ток двухфазного короткого замыкания (КЗ);
- введение в нейтраль сети тока непромышленной частоты 25 Гц или иной, с возбуждением свободных колебаний и регистрацией «отклика» в контуре нулевой последовательности;
- построение «резонансной» кривой зависимости напряжения смещения от тока ДГР — например, переключением ответвлений ступенчатого реактора или изменением положения плунжера от максимального до минимального значения индуктивности (в конструкциях с немагнитным зазором).

Каждый метод имеет свои особенности, определяющие оптимальную область его применения, информативность и безопасность. При проведении натурных измерений в большинстве случаев используется специальное оборудование, испытанное должным образом и удовлетворяющее следующим техническим требованиям:

- цифровые многоканальные осциллографы с разрешением АЦП 12 бит, полосой пропускания с максимальным значением не хуже 500 кГц (реже 1,0–10 МГц), с одновременным измерением не менее шести входных сигналов;
- емкостные и компенсированные делители напряжения с номинальным рабочим напряжением 10 и 35 кВ, диапазоном рабочих частот 0,02–500 кГц, погрешностью коэффициента деления на частоте 50 Гц в диапазоне  $(0,1-2,0)U$  не более 2,5 %;
- опорные трансформаторы тока с коэффициентом трансформации от 20/5 (1) до 2000/5 (1), со вторичной обмоткой классом точности не хуже 0,5;
- высоковольтные косинусные конденсаторы номинальным напряжением 10 кВ, позволяющие варьировать подключаемую асимметрирующую емкость;
- вспомогательное оборудование: активные сопротивления – безындуктивные мощные шунты для подключения во вторичные обмотки ТТ, измерительные коаксиальные провода, осциллографические щупы, токовые клещи и другие устройства.

Необходимость регистрации квазистационарных и переходных процессов, возникающих при ОЗЗ и характеризующихся колебаниями напряжения в широком частотном диапазоне с правильным отображением амплитуды перенапряжений и пиковых значений тока, диктует дополнительные требования к измерительной аппаратуре. Следует исключить применение трансформаторов тока нулевой последовательности, токовых клещей (в том числе от приборов контроля качества электроэнергии), серийных трансформаторов напряжения, не обладающих необходимыми амплитудно-частотными характеристиками для корректного преобразования сигналов.

Для полноценной реализации метода искусственного ОЗЗ требуется применить комплект измерительных приборов. Предположим, будут использоваться цифровые или стрелочные амперметры, вольтметры, ваттметры. При измерении тока ОЗЗ с помощью только амперметра, без применения других приборов, достоверный результат в части значения емкостного тока ОЗЗ можно получить лишь с допущениями о низком уровне активной проводимости сети на землю (1–2 % от емкостной) и малом гармоническом искажении от нагрузки (1–2 % от полного тока замыкания). При наличии в токе ОЗЗ значительного уровня высших гармоник, которые в эквиваленте могут достигать десятков процентов от составляющей промышленной частоты [4], действующие значения тока, полученные с помощью стрелочных и цифровых амперметров, ввиду геометрического сложения измеряемого сигнала частотой 50 Гц со всеми его гармониками, будут недостоверны. Следовательно, необходим иной методологический подход к измерению тока ОЗЗ.

Наличие высших гармоник в токе ОЗЗ можно установить при измерении тока специальным дорогостоящим анализатором либо путем осциллографирования сигнала тока с его дальнейшей математической обработкой и фильтрацией. Оптимальный вариант – цифровое осциллографирование исследуемых сигналов в достаточно широком частотном диапазоне. Для сигнала

тока в качестве верхней границы диапазона задается частота 5 кГц, соответствующая проверенной границе неискаженной передачи опорными трансформаторами тока и в 2,5 раза перекрывающая 40-ю гармонику (2 кГц) из стандартов качества электроэнергии. Для сигналов напряжения целесообразно использовать пределы частот переходных процессов при ОЗЗ, составляющие, как правило, от сотен герц до десятков килогерц. Учитывая потребность регистрации, в этом случае имеет смысл, помимо дуговых замыканий на землю, коммутационных переходных процессов в цепях с вакуумными выключателями, зафиксировать необходимые пределы регистрации по частоте для каналов напряжения: нижний – от 0 до 20 Гц, верхний – от 100 до 500 кГц или шире. Такие серьезные требования продиктованы необходимостью полноценной регистрации не только квазистационарных режимов при резонансных и феррорезонансных процессах, но и переходных процессов при коммутациях, а также всех видах замыканий в сетях среднего напряжения.

С учетом изложенного, специалистами из Новосибирска на основе положений РД 34.20.179 (ТИ 34–70–070–87) [3] разработаны и апробированы методики инструментальных измерений с цифровой регистрацией переходных процессов, созданы программы обработки сигналов, а также накоплен большой опыт изучения и обработки фиксируемых событий, который основан на детальном анализе натуральных осциллограмм [5]. Указанные методики измерений прямым и косвенным способами включены в состав заявленных видов испытаний и измерений электротехнической лаборатории ООО «Болид», зарегистрированной в Сибирском управлении Ростехнадзора.

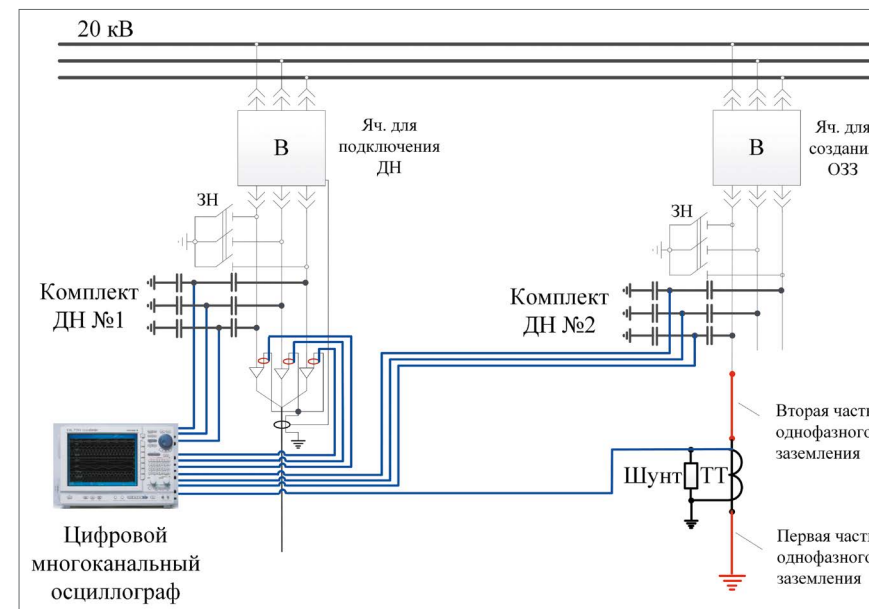
Для исследования и иных задач при подготовке и постановке экспериментальных измерений прорабатываются вопросы по анализу конфигурации сети, эксплуатационным режимам, порядку и схемам коммутации вводных и секционных выключателей, настройке релейной защиты задействованных в опытах присоединений и их ячеек, мер безопасного подключения измерительных датчиков, а также способов заземления нейтрали трансформаторов. Сборка схемы для измерений в высоковольтной сети выполняется по наряду-допуску на работы в электроустановках, на обесточенном и выведенном в ремонт оборудовании, по согласованной и утвержденной рабочей программе.

Квалификация специалистов, выполняющих измерения, должна быть подтверждена удостоверениями и протоколами, которые содержат сведения о группе допуска по электробезопасности до и выше 1000 В, разрешения на проведение высоковольтных испытаний, удостоверения по пожарной безопасности и т. д. Проведение необходимых инструктажей, допуск и работа на объекте выполняются по письму о командированном персонале с правами ответственного руководителя, производителя работ, членов бригады.

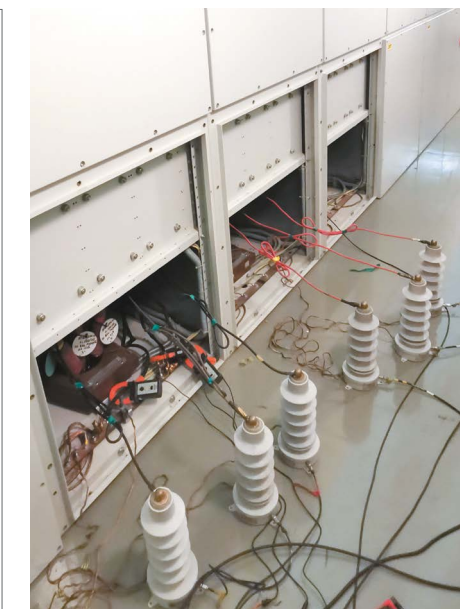
На практике наиболее простой схемой является подключение в одну ячейку КРУ или КСО 6–10 кВ специального устройства для создания управляемого ОЗЗ, состоящего из трехфазного комплекта широкополосных делителей напряжений, однополюсного вакуумного

выключателя с блоком управления, опорного трансформатора тока и элементов связи между ними. Еще одним распространенным вариантом схемы измерений является применение двух ячеек с трехполюсными силовыми выключателями для отдельного подключения делителей напряжения и устройств искусственного заземления фазы, чаще применяемое в сетях 20 и 35 кВ [6]. Пример схемы измерений и подключаемого испытательного оборудования в сети 20 кВ изображен на рис. 1.

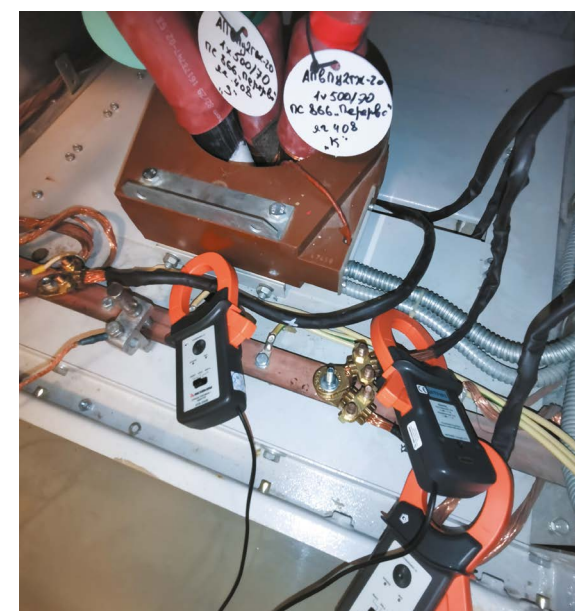
Для организации защиты от нештатного КЗ и автоматического отключения с заданной выдержкой времени в схеме испытательной установки дополнительно монтируется терминал релейной защиты, настраиваемый при наладке измерительного оборудования. Если в ходе опыта в сети по какой-либо причине произойдет пробой любой фазы на другой линии, устройство релейной защиты обеспечит мгновенное автоматическое отключение искусственного замыкания.



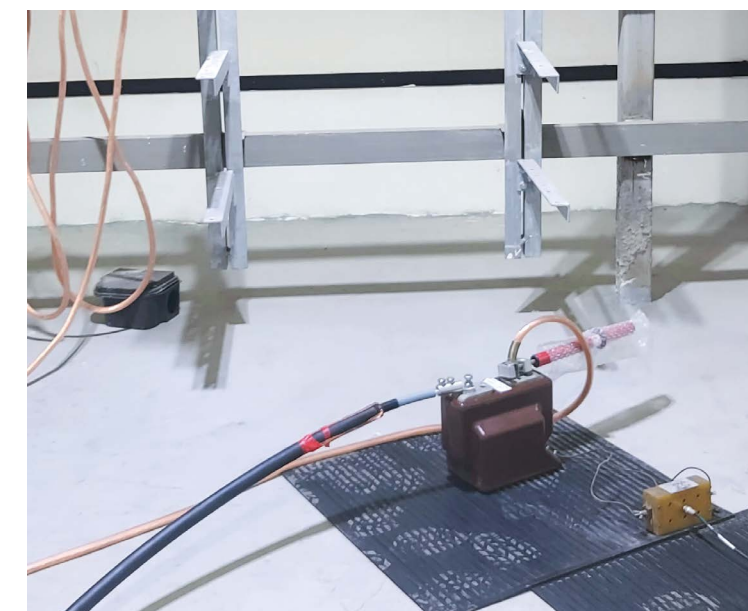
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Схема измерений (а) и внешнее подключение двух комплектов делителей напряжения (б), токовых клещей (в) и опорного трансформатора тока с активным шунтом в цепи управляемого замыкания на землю (г)

В сети с изолированной нейтралью оптимальная длительность искусственного замыкания составляет 0,5–1 с. В сети с КЕТ, в зависимости от вида ДГР и его текущей настройки, принципа работы автомата управления и ряда других условий, длительность контролируемого ОЗЗ обычно больше и составляет в среднем 1–5 с.

Применение метода искусственного контролируемого ОЗЗ ограничено условиями конкретной электрической сети предприятия. Несмотря на малую длительность замыкания (доли и единицы секунд), при увеличении напряжения на двух фазах в  $\sqrt{3}$  раз остается вероятность возникновения ОЗЗ на другой фазе и на другой линии, особенно в кабельных сетях 6–10 кВ с изношенной изоляцией, а также в сетях собственных нужд станций с электрическими машинами, которые обладают сниженным уровнем прочности статорной изоляции. Не выявленные вовремя дефекты, связанные с деградацией изоляции и нарушениями технологии ремонта и монтажа электрооборудования, способны привести к междуфазному пробое при развитии ОЗЗ. Вероятность нештатной ситуации при правильной организации опытов ОЗЗ достаточно мала и не превышает в среднем 0,05. Для кабельных сетей 20 кВ с резистивно-заземленной нейтралью, эксплуатируемых преимущественно в мегаполисах, указанный метод измерения является оптимальным, поскольку режим замыкания на землю здесь является штатным случаем отключения повреждения релейной защитой за время 0,5...5,0 с. За счет несработавшего еще ресурса изоляции оборудования, а также существенного ограничения любого ОЗЗ по времени, риск отказа при измерениях емкостного тока в таких сетях чрезвычайно мал. Возникновение двойного замыкания на землю или двухфазного КЗ в процессе испытаний с искусственным ОЗЗ можно считать редким событием, вероятность которого менее 0,01.

Кратковременное и управляемое однофазное замыкание по влиянию на изоляцию является крайне щадящим способом испытания, оказывая существенно меньшее воздействие, чем реальные дуговые замыкания на землю. Согласно отраслевым нормативным документам для сетей 6–35 кВ, ОЗЗ до настоящего времени не идентифицируется как аварийное событие и поэтому не требует быстрого отключения.

При этом, время удержания замыкания на землю в большинстве случаев, прежде всего в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостного тока, не должно превышать 2 часа. Это нельзя признать условием, отвечающим современным требованиям безопасности и должной эксплуатационной надежности, особенно для высоковольтного оборудования с твердой невосстанавливаемой изоляцией.

При эксплуатации по техническому состоянию важно не только своевременно проводить периодические испытания и диагностику силового оборудования неразрушающими методами, но и внедрять принцип селективного отключения всех однофазных повреждений — как это сделано, например, в опорных сетях 20 кВ Московской энергосистемы и сетях 6–20 кВ с резистивно-заземленной нейтралью в Санкт-Петербурге. Такое решение позволяет безаварийно и точно выполнить измерения емкостного тока с помощью искусственных ОЗЗ, которые могут

рассматриваться как допустимые воздействия при тестировании изоляции оборудования. Важно, что в этом случае можно создать измерительную схему необходимой конфигурации — это дает широкие возможности для проверки работоспособности и эффективности реализованных схемно-технических мероприятий по управлению режимом нейтрали.

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ С АСИММЕТРИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТЬЮ

Помимо риска повреждения оборудования с ослабленной изоляцией, опасность которого в целом можно считать преувеличенной, энергетики промышленных предприятий оценивают опасность потери питания технологических установок и недовыпуска товарной продукции. Для электросетевых предприятий негативным сценарием будет являться обесточивание ответственных потребителей и недоотпуск электроэнергии с соответствующими финансовыми потерями, для электрических станций — отключение генераторов и приводных электродвигателей сети собственных нужд, что приведет к упущенной выгоде от недопроизводства электроэнергии и потерям на балансирующем рынке из-за простоя энергоблоков.

Для предупреждения таких ситуаций, очевидно, в любой сети настроены и действуют устройства релейной защиты и автоматики. Тем не менее для определения емкостного тока путем контролируемого замыкания на землю требуется согласование эксплуатирующей организации. Если такое согласование по каким-либо причинам не выдано, предусматриваются измерения другими методами. Один из них — косвенный метод с посадкой напряжения на одной фазе сети, но не до нуля, как при ОЗЗ, а до уровня 0,85–0,90, что при длительности посадки в пределе 1–5 с практически незаметно для оборудования, не нагружает изоляцию и не «чувствуется» устройствами РЗА.

Подключение измерительной аппаратуры при измерении тока ОЗЗ косвенным методом показано на рис. 2. Схема отличается включением в цепь однополюсного коммутационного аппарата и заземляемого трансформатора тока, включаемого последовательно в цепь силовых конденсаторов. Эквивалентная емкость конденсаторов за счет их соединения последовательно или параллельно подбирается таким образом, чтобы обеспечить снижение напряжения на одной фазе в пределах 10–15%. В этом случае также необходимо зарегистрировать ток через емкость, что позволит получить минимальную ошибку при расчете емкостного тока 50 Гц с помощью измеренных параметров.

Измерения косвенным методом с дополнительной емкостью должны проводиться в сетях с изолированной нейтралью либо при временном выводе ДГР из работы при их наличии. Это связано с тем, что нарушение симметрии фазных напряжений с помощью включенного на короткое время конденсатора наложится на смещение нейтрали, обусловленное ростом несимметрии, пропорционально добротности реактора. Следовательно, пересчет емкостного тока, выполняемый на основе измеренных значений напряжений, будет неверным. Причем определить и компенсировать такую ошибку достаточно слож-



Рис. 2. Внешний вид цифрового осциллографа (а) и испытательной установки с однополюсным выключателем и комплектом асимметрирующих конденсаторов на фазе (б)

но — требуется специальный математический аппарат [7]. Как и в случае с искусственным ОЗЗ, для получения корректного результата целесообразно осциллографировать фазные напряжения и ток асимметрирующей емкости, подключаемой на фазу сети 6 (10) кВ. Преимущество метода: достаточно безопасное для оборудования и точное определение текущего значения емкостного тока однофазного замыкания в сети — при условии выделения гармоники 50 Гц в измеряемых величинах. До начала опыта требуется получить несколько относительно достоверных значений расчетного емкостного тока, чтобы правильно подобрать значение подключаемой емкости с помощью имеющихся конденсаторов. Ошибки в исходных данных, а точнее — их отсутствие в требуемом объеме, могут привести к установке избыточной асимметрирующей емкости на фазу сети, что, в свою очередь, может вызвать перекося фазных напряжений выше ожидаемого уровня и срабатывание сигнализации по  $3U_0$ . Чем менее достоверные сведения о параметрах сети представлены для подготовки опыта, тем большее число итераций с переключением конденсаторов потребуется для определения емкостного тока.

Объективный недостаток метода — отсутствие возможности определить гармонический состав тока ОЗЗ и выделить в нем активную составляющую, а также записать ток ДГР и проверить работу систему КЕТ. На основе измеренных значений можно лишь рассчитать емкостную составляющую тока ОЗЗ частотой 50 Гц. Опыт сравнительных испытаний показал, что при правильной постановке измерений косвенным методом разница в значении емкостного тока, измеренного путем искусственного замыкания и рассчитанного после включения асимметрирующей емкости в сети с изолированной нейтралью, не превышает 0,1 А.

Для сетей 6–20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали, в том числе для городских распределитель-

ных сетей крупных агломераций, применение метода с асимметрирующей емкостью может быть ограничено (помимо необходимости перевода на изолированный режим нейтрали на время измерений, что, например, для сетей 20 кВ Москвы неприемлемо) связанными между собой факторами: суммарной емкостью высоковольтной сети на землю и емкостью подключаемых в момент испытаний конденсаторов. Известно, что последние должны кратковременно обеспечить несимметрию со снижением рабочего фазного напряжения А, В или С на 10–15% от его номинального значения, что затруднительно для сети с большим емкостным током. Например, набор силовых конденсаторов единичной емкостью от 0,84 до 4,0 мкФ, имеющийся в настоящее время в распоряжении электролаборатории ООО «Болид», позволяет методически корректно провести измерения при емкостном токе участка (секции) сети: до 120 А на номинальном напряжении 6 кВ и до 200 А — на напряжении 10 кВ. Для развитых сетей 20 кВ с емкостным током в сотни ампер такие измерения невозможны: с одной стороны, из-за необходимости применения большого набора тяжелых и габаритных конденсаторов эквивалентной емкостью в десятки микрофарад (что означает сложность транспортировки и тем более ручного перемещения), а с другой — из-за очевидной проблемы согласования режима изолированной нейтрали на время испытаний (защиты от замыканий на землю, рассчитанные на большой ток от резистора в нейтрали, окажутся временно неработоспособны).

### ПРИМЕР НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ОРГАНИЗАЦИЕЙ ЗАМКЯНИЙ НА ЗЕМЛЮ

На построенной и введенной в эксплуатацию в 2023 г. ПС 110/10 кВ, предназначенной для питания крупного объекта транспортной инфраструктуры, во исполнение

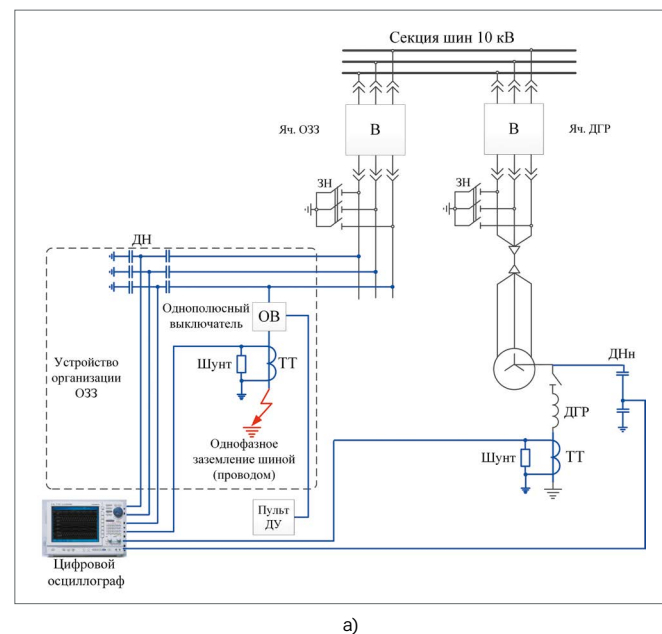


Рис. 3. Схема подключения измерительной аппаратуры при измерениях в сети 10 кВ (а) и внешний вид масляного дугогасящего агрегата с трансформатором тока в цепи искусственного замыкания и делителем напряжения в нейтрали (б)

требований ПТЭ ЭСС РФ [1, п. 571, п. 621] выполнен комплекс измерений по методике искусственного металлического ОЗЗ с регистрацией тока замыкания на землю, тока ДГР, фазных напряжений и напряжения на нейтрали.

ПС 110/10 кВ имеет две секции шин 10 кВ, каждая из которых запитана от двухобмоточного трансформатора мощностью 25 МВА. Обмотки высокого напряжения соединены в звезду с выведенной нейтралью, обмотки низкого напряжения — в треугольник. Кабельная сеть новая, линии на 100 % состоят из кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, в основном типа АпБВнг (А)-LS/HF-10 3х240/70, общая протяженность линий — 9,7 км, прокладка подземная. От секций 10 кВ запитаны трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ. Расчетный емкостный ток обследуемого участка сети составляет 20,8 А. Компенсация емкостного тока на обеих секциях выполнена с помощью дугогасящих масляных агрегатов мощностью 500 кВА. Агрегат представляет собой нейтралеобразующий фильтр «зигзаг» и пилонный ДГР в едином корпусе, пределы регулирования индуктивного тока — от 8 до 80 А. Регулирование индуктивного тока каждого агрегата выполняется с помощью системы автоматического управления (САУ).

Для регистрации тока однофазного замыкания и тока ДГР в цепях заземления устанавливались трансформаторы тока ТЛН-10 с коэффициентами 150/5 А и 100/5 А, сигналы со вторичных обмоток класса 0,5S, которые шунтировались сопротивлением 0,6 Ом и 0,49 Ом соответственно, подавались на цифровой осциллограф-регистратор DL-850 Score Corder (Япония). Последний представляет собой многоканальную компьютеризированную систему сбора, обработки и хранения данных (рис. 2 а): 16 аналоговых каналов, мак-

симальная частота выборки до 100 МГц, с памятью 25 миллионов точек на канал, вертикальное разрешение в 12 бит, интерфейсы PC Card, USB, GPIB, RS-232, SCSI, Ethernet.

Фазные напряжения и напряжение на нейтрали регистрировались с помощью высоковольтных компенсированных делителей напряжения типа ДНК-10/5000 с номинальным напряжением 10 кВ, коэффициентом преобразования 5000, диапазоном рабочих частот 0÷2500 кГц и допускаемой относительной основной погрешностью в этом диапазоне не хуже 1,5 %. Делители подключались к шинам исследуемой сети с помощью высоковольтных проводов. С низковольтного плеча делителей напряжения, через измерительный кабель, сигналы также поступали на осциллограф. Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры приведена на рис. 3а, фотография агрегата с подключенными первичными датчиками тока и напряжения на рис. 3б. Во время опыта фиксировались показания САУ ДГР, внешний вид которого приведен на рис. 4.

По итогам измерений, с учетом коэффициентов преобразования и сопротивления шунтов, полученные осциллограммы приводились к фактическим значениям токов и напряжений. С помощью программно-вычислительного комплекса выполнялась математическая обработка сигналов. В установленном режиме (доли и единицы секунд) для этого используется дискретное преобразование Фурье. После обработки осциллограмм определялся гармонический состав установившегося тока ОЗЗ, количественные величины гармонических составляющих, включая основную, выделялись активная и реактивные составляющие тока с частотой 50 Гц;



Рис. 4. Автоматика управления дугогасящего агрегата 10 кВ в обследуемой сети

определялся уровень перенапряжений при металлическом замыкании на землю.

Значения напряжения несимметрии ( $U_{НС}$ ) при изолированной нейтрали и напряжения смещения нейтрали ( $U_{СМ}$ ) в сети с компенсацией емкостного тока представлены в таблице 1.

На основании результатов измерений для сети с изолированной нейтралью был определен коэффициент успокоения сети  $d$ , характеризующий активные утечки и потери в сети:

$$d = \frac{I_R}{I_C} = 0,0145,$$

где  $I_R$  — активная составляющая тока ОЗЗ;

$I_C$  — емкостная составляющая тока ОЗЗ.

По итогам спектрального анализа был выделен ряд гармоник, наиболее выраженных в токе ОЗЗ с превышением условного уровня в 0,5 А для участка сети 10 кВ — это гармоники № 5, 7, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 (рис. 5). Также следует обратить внимание на наличие 2-й гармоники в токе ДГР (2,24 А). Ток гармонического искажения для участка сети 10 кВ в опыте с изолированной нейтралью составил 2,9 А, в опыте с компенсацией — 3,2 А в  $I_{ОЗЗост}$  и 2,5 А в  $I_{ДГР}$ . Активная составляющая в полном токе  $I_{ОЗЗ} = 19,3$  А невелика — всего  $I_R = 0,28$  А.

В соответствии с [1, п. 624], «в сетях, работающих с компенсацией емкостного тока, напряжение несимметрии должно быть не выше 0,75 % фазного напряжения, напряжение смещения нейтрали допускается не выше 15 % фазного напряжения длительно». В рассматриваемой сети 10 кВ напряжение несимметрии составляет 0,22 % и не превышает норму. А вот при включенном источнике возбуждения нейтрали напряжение смещения достигает 21,2 %, что превышает нормативное значение.

Значительную часть напряжения смещения нейтрали (настройка в резонанс ДГР без блока возбуждения нейтрали —  $U_{СМ} = 73,7$  В, с блоком —  $U_{СМ} = 743,6$  В) в сети 10 кВ вносит источник возбуждения нейтрали ИВН, который входит в состав устройства автоматического регулирования компенсации с условным наименованием САУ. ИВН обеспечивает ввод тока возбуждения через обмотку управления ДГР в нормальном режиме работы электрической сети. Для регулировки тока возбуждения используется батарея конденсаторов общей емкостью 30 мкФ, разбитая на пять групп. Коммутация групп осуществляется вручную — переключателем «Регулировка

Таблица 1. Значения напряжения несимметрии и напряжения смещения нейтрали

$U_{НС}$ В	$U_{НС}$ %	$U_{СМ}$ В	$U_{СМ}$ %
12,5	0,22	1221,3	21,2

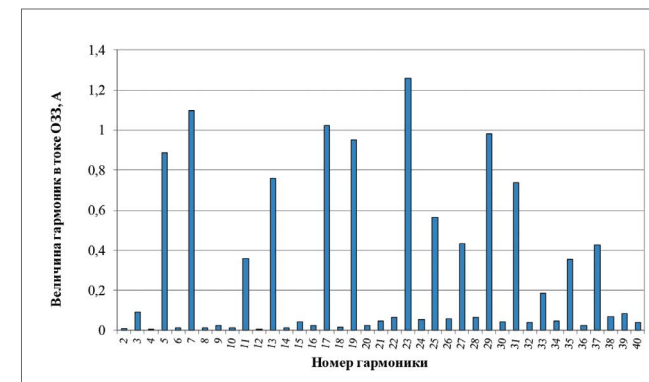


Рис. 5. Действующие значения гармоник тока ОЗЗ для участка сети 10 кВ

тока» на приборной панели. В ходе экспериментальных исследований в сети 10 кВ выполнить автоматическую настройку ДГР оказалось невозможно, так как при минимальной уставке тока возбуждения величина напряжения смещения нейтрали по показаниям прибора САУ превышала значение 30 В и прибор сигнализировал об ошибке.

Осциллограммы измерений представлены на рис. 6а, 6б, даны значения 50 Гц тока замыкания  $I_{ОЗЗ}$  для опыта с изолированной нейтралью, остаточного тока  $I_{ОЗЗост}$  и тока  $I_{ДГР}$  для опыта с компенсацией. На осциллограммах кривые синего цвета — напряжение фазы А; зеленого цвета — напряжение фазы В; красного — напряжение фазы С; черного — ток ОЗЗ или остаточный ток ОЗЗ; фиолетового цвета — ток ДГР; голубого — напряжение на нейтрали.

Таблица 2. Степень расстройки компенсации емкостных токов ОЗЗ и погрешность определения емкостного тока

Наименование	Измеренный ток ОЗЗ и ДГР на момент эксперимента, А			Степень расстройки компенсации (у)	Ток компенсации, определяемый устройством автоматического регулирования ДГР, А	Погрешность определения емкостного тока (б)
	Полный	Активный	Реактивный			
$I_{ОЗЗост}$	2,83	1,34	2,43	15,6%	29,2 А	86,9%
$I_{ДГР}$	14,05	4,60	13,19			

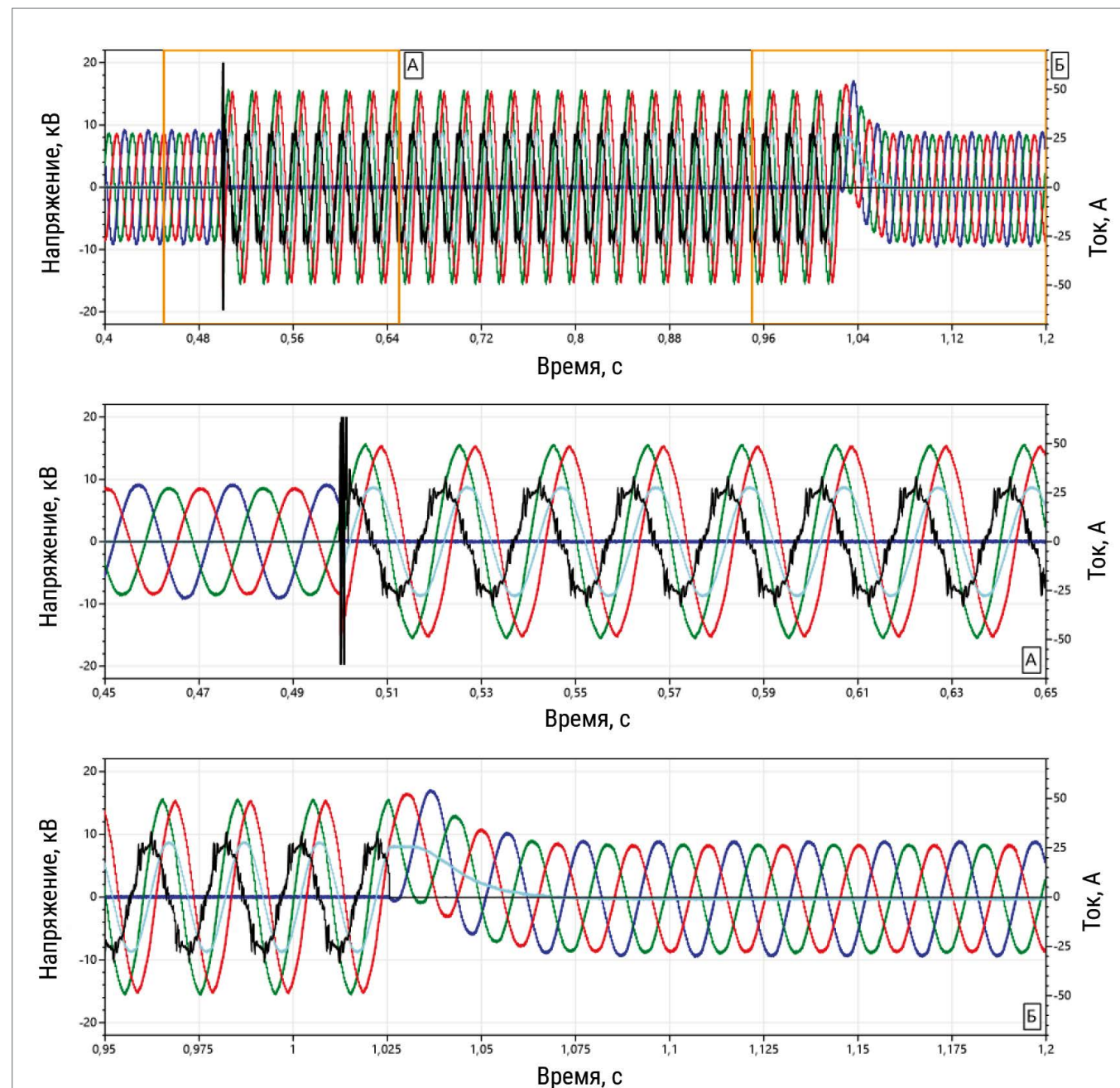


Рис. 6а. Натурные осциллограммы фазных напряжений, тока ОЗЗ, тока реактора и напряжения на нейтрали при ОЗЗ на секции 10 кВ с изолированной нейтралью  $I_{O33} = 19,3$  А

Степень расстройки компенсации ( $\nu$ , %) рассчитана на основании сопоставления реактивной составляющей основной гармоники остаточного тока в месте замыкания и суммы реактивной составляющей тока ДГР основной гармоники:

$$\nu = \left(1 - \frac{I_{ДГР}}{I_{ДГР} + I_{O33ост}}\right) \cdot 100 = \frac{100 \cdot I_{O33ост}}{I_{ДГР} + I_{O33ост}} \quad (1)$$

Погрешность ( $\delta$ , %) определения емкостного тока сети с помощью устройства автоматического регулирования токов компенсации рассчитывалась по следующей формуле:

$$\delta = \left| \frac{I_C - (I_{ДГР} + I_{O33ост})}{I_{ДГР} + I_{O33ост}} \right| \cdot 100, \quad (2)$$

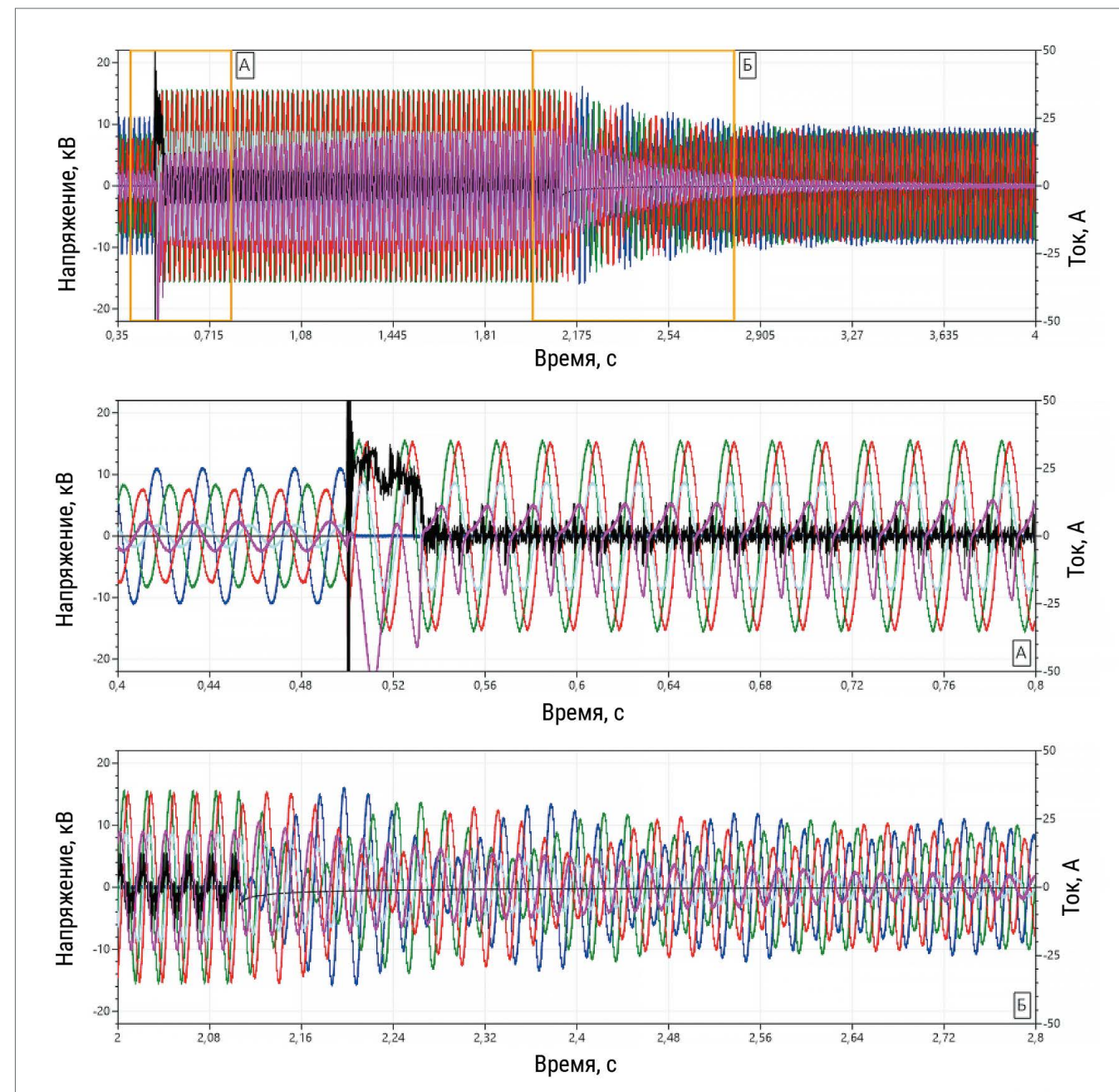


Рис. 6б. Натурные осциллограммы фазных напряжений, тока ОЗЗ, тока реактора и напряжения на нейтрали при ОЗЗ на секции 10 кВ с компенсацией емкостного тока  $I_{O33ост} = 2,8$  А,  $I_{ДГР} = 14,1$  А

где  $I_C$  — значение емкостного тока сети, определяемое устройством автоматического регулирования ДГР.

В таблице 2 приведены измеренные значения остаточного тока ОЗЗ, тока ДГР, зафиксированные показания автоматаки управления ДГР, а также рассчитанные по результатам измерений значения расстройки компенсации и погрешность определения емкостного тока автоматикой при «металлических» ОЗЗ в сети 10 кВ.

Важно отметить: степень расстройки компенсации в сети 10 кВ составила 15,6 %, что нарушает требования [1, п. 623] — не более 5 %. Более того, зафиксировано, что сеть работает с недокомпенсацией — это тоже недопустимо из-за возможности возникновения резонанса, вплоть до появления «ложной земли» в нормальном режиме при отключении части присоединений сети в рамках перевода питания или работы релейной защиты и автоматики [8].

Очевидно, используемое устройство автоматического регулирования компенсации емкостных токов САУ неверно определяет ожидаемый емкостный ток секции шин 10 кВ: погрешность измерения автоматикой составила более 86 %, что неприемлемо и затрудняет принудительную настройку реактора в режим, близкий к резонансу по нормам [1]. Это приведет к резкому снижению эффективности дугогашения при всех видах однофазных повреждений. Сверхнормативная расстройка компенсации, в свою очередь, вызывает значительные перенапряжения и повреждения высоковольтного оборудования [9].

### КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НЕЙТРАЛИ

В ходе натурных измерений целесообразно производить осциллографирование полного процесса ОЗЗ, в том числе электромагнитных процессов при возникновении и устранении замыкания посредством принудительной коммутации, стационарного процесса — устойчивого замыкания, а также возвращения к нормальному эксплуатационному режиму после отключения искусственного замыкания. Для переходного процесса, который сопровождает ОЗЗ, определяется уровень перенапряжений в исследуемой сети, анализируется характер и время выхода тока установленных ДГР на установившийся режим (единицы и десятки секунд и минут) и фиксируются максимальные значения тока замыкания и тока реактора в переходном режиме (доли и единицы секунд). Изучив переходный процесс после отключения замыкания, по характеру восстановления фазных напряжений можно понять, насколько степень расстройки компенсации соответствует допустимым значениям, оценить риск развития резонансных процессов в обследуемой сети.

При натурных измерениях можно реализовать ряд исследовательских задач. Так, в случае с изолированной нейтралью опытным путем можно оценить подверженность участков сети с малыми емкостными токами и электромагнитным ТН возникновению феррорезонансных явлений. Это можно осуществить на основе анализа характера изменения фазных напряжений после отключения однофазного замыкания. При эксплуатации современных ДГР с плавным регулированием, оснащенных автоматикой настройки тока компенсации, максимальный объем проверки предусматривает изучение следующих параметров:

- точность настройки компенсации в режим резонанса и общая оценка корректности работы автоматики (по значению остаточного тока ОЗЗ в сравнении с зарегистрированным в предыдущем опыте полным током замыкания на землю);
- соответствие показаний автоматики — фактическому току реактора с трансформатора тока в цепи его заземления (сравнение основной гармоники индуктивного тока по осциллограмме и значения тока ДГР, определяемого алгоритмами терминала автоматики реактора);
- соответствие показаний автоматики в части ожидаемого емкостного тока — фактическому току

ОЗЗ с трансформатора тока в цепи искусственного заземления одной фазы (сравнение основной гармоники емкостной составляющей тока замыкания по осциллограмме и значения емкостного тока, определяемого алгоритмами терминала автоматики реактора);

- соответствие тока ДГР паспортным данным — току реактора по осциллограммам в положениях механической плунжерной системы или емкостной системы регулирования со вторичной обмотки, соответствующих минимальному и максимальному индуктивному токам.

Необходимый объем данных (помимо фазных напряжений, первичных сигналов тока в цепях заземления ДГР и резистора) удастся получить при натурных исследованиях с созданием замыканий на землю в сети с резистивным и комбинированным заземлением нейтрали при регистрации. В ходе опытов с любым режимом нейтрали, кроме изолированного, можно подтвердить отсутствие резонансных явлений, которые выражаются в биениях и характерном искажении фазных напряжений после отключения ОЗЗ.

Обследование систем компенсации с помощью серий искусственных «металлических» и дуговых ОЗЗ нужно, прежде всего, для проверки соответствия оборудования требованиям нормативных документов [10] — в первую очередь СТО 34.01–3.2–008–2017. Это связано с перенасыщением рынка устройств КЕТ предложениями от большого числа производителей ДГР (плунжерных, с подмагничиванием, с конденсаторным регулированием) и автоматики их управления на разных принципах (амплитудно-фазовый, наложением сигнала непромышленной частоты, по частоте собственных колебаний). Обоснование правильности того или иного технического решения по фактам выполняется на основе анализа натурных осциллограмм и вывода о сохранении или изменении режима нейтрали в соответствии с нормами [1]. Для эксплуатации важно получить справедливое заключение о работоспособности оборудования заземления нейтрали и достоверности показаний автоматики, точности настройки компенсации емкостного тока в исследованных условиях (при разной конфигурации сети, различных настройках ДГР и его автоматики). Также необходимо учитывать сведения о демпфирующем коэффициенте, добротность и другие параметры.

### МОНИТОРИНГ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В ряде случаев техническое задание заказчика предусматривает определение уровней перенапряжений при замыканиях на землю путем создания искусственных металлических и дуговых ОЗЗ в сети 6–35 кВ. По объективным причинам указанные измерения не всегда можно выполнить ввиду требований по обеспечению бесперебойного энергоснабжения технологических потребителей и предупреждению риска отключения. Это особенно актуально для сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с непрерывным циклом производства.

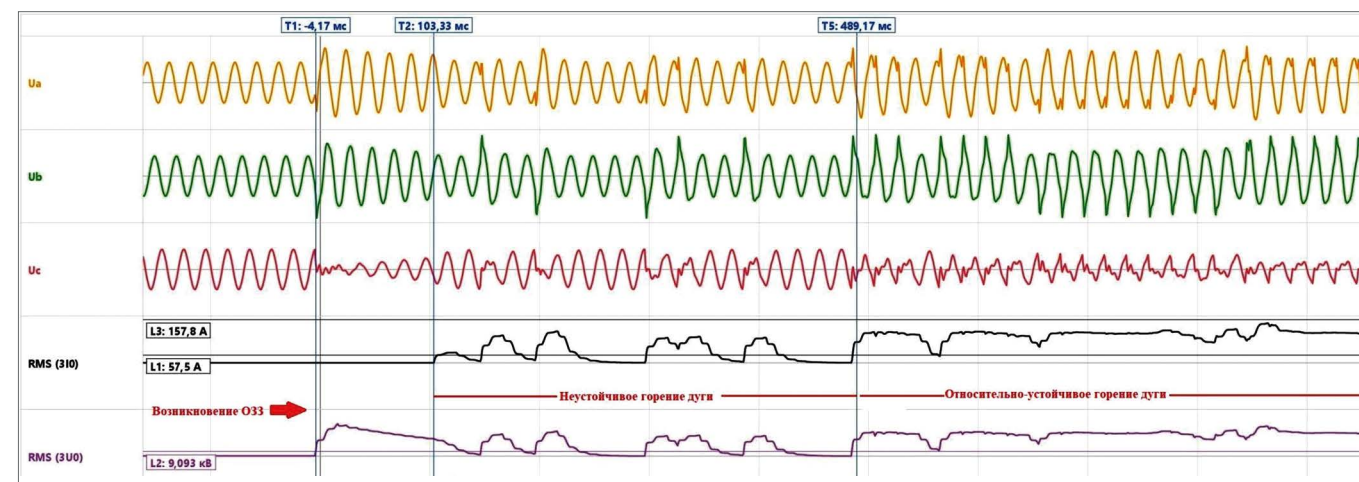


Рис. 7. Осциллограмма однофазного замыкания с микропроцессорного терминала РЗА на поврежденной линии

Для электросетевых объектов проблема может быть связана с отсутствием или недостаточной мощностью резерва, особенно в схемах с односторонним питанием. Очевидно, натурные измерения с искусственными замыканиями на землю несут риски нештатного отключения в сети, хотя их вероятность, за счет управления длительностью замыкания и дополнительной релейной защиты схемы измерения, как было показано, мала. Из опыта сотен подобных измерений в сетях до 35 кВ можно сделать вывод: незапланированное замыкание на другой фазе, в зависимости от состояния изоляции отдельного оборудования, возникает с вероятностью не более 5 %. Несмотря на это, в качестве альтернативы и для накопления более репрезентативной выборки данных, эксплуатирующие организации иногда отдают предпочтение непрерывному мониторингу перенапряжений. Задача такого мониторинга: детальный анализ и, при необходимости, исследование статистических параметров электромагнитных процессов в электрической сети за период от нескольких дней до нескольких месяцев, либо на постоянной основе — в случае установки стационарных систем мониторинга перенапряжений. Известно, что ограниченная полоса пропускания по частоте электромагнитных, емкостных и оптических трансформаторов напряжения, вместе с небольшой частотой дискретизации большинства серийных регистраторов аварийных событий и терминалов релейной защиты и автоматики (1–2 кГц), а также насыщение электромагнитных ТТ при КЗ не позволяют записывать электромагнитный переходный процесс в том качестве и объеме, который необходим для корректного определения амплитудно-частотных параметров перенапряжений и аварийных токов. Пример типовой осциллограммы, зарегистрированной штатными микропроцессорными терминалами РЗА в сети 35 кВ, приведен на рис. 7. Из-за недостаточной частоты дискретизации встроенных осциллографов

терминалов РЗА (обычно не более 3,6 кГц) и полосы пропускания серийных электромагнитных ТН, которая обычно не превышает по верхнему пределу 5 кГц, корректно оценить уровни перенапряжений при замыканиях на землю и их развитие в КЗ не представляется возможным.

Поэтому в некоторых случаях затруднительно точно идентифицировать причину повреждения электрооборудования при разборе и активировании технологических нарушений и аварийных ситуаций в сетях 6–35 кВ. Это усложняет разработку мероприятий по защите оборудования и предупреждению подобных инцидентов в будущем.

Мониторинг, как правило, выполняется тем же составом измерительных приборов и аппаратуры, что используется для регистрации электромагнитных процессов при искусственных ОЗЗ. Могут применяться и отдельные функциональные блоки высокочастотных регистраторов с возможностью записи напряжений на каждом участке (секции) распределительной сети в широкой полосе частот, соответствующей предельным частотам свободной составляющей переходного процесса. Отличие заключается в том, что в этом случае записаны и проанализированы могут быть только фазные напряжения и, при возможности подключения, токи в цепях однофазных устройств заземления нейтрали при «естественных» замыканиях в сети 6–35 кВ.

Недостатком такой методики является отсутствие натурных осциллограмм тока замыкания на землю, так как фиксировать сигналы с трансформаторов тока нулевой последовательности физически затруднительно и, более того, некорректно из-за непрогнозируемой погрешности по углу и амплитуде таких датчиков тока. Тем не менее, мониторинг позволяет выполнить проверку работоспособности оборудования в нейтрали сети. Также станет доступной оценка эффективности принятой схемы нейтрали, поскольку кроме настроек силового оборудования можно проанализировать

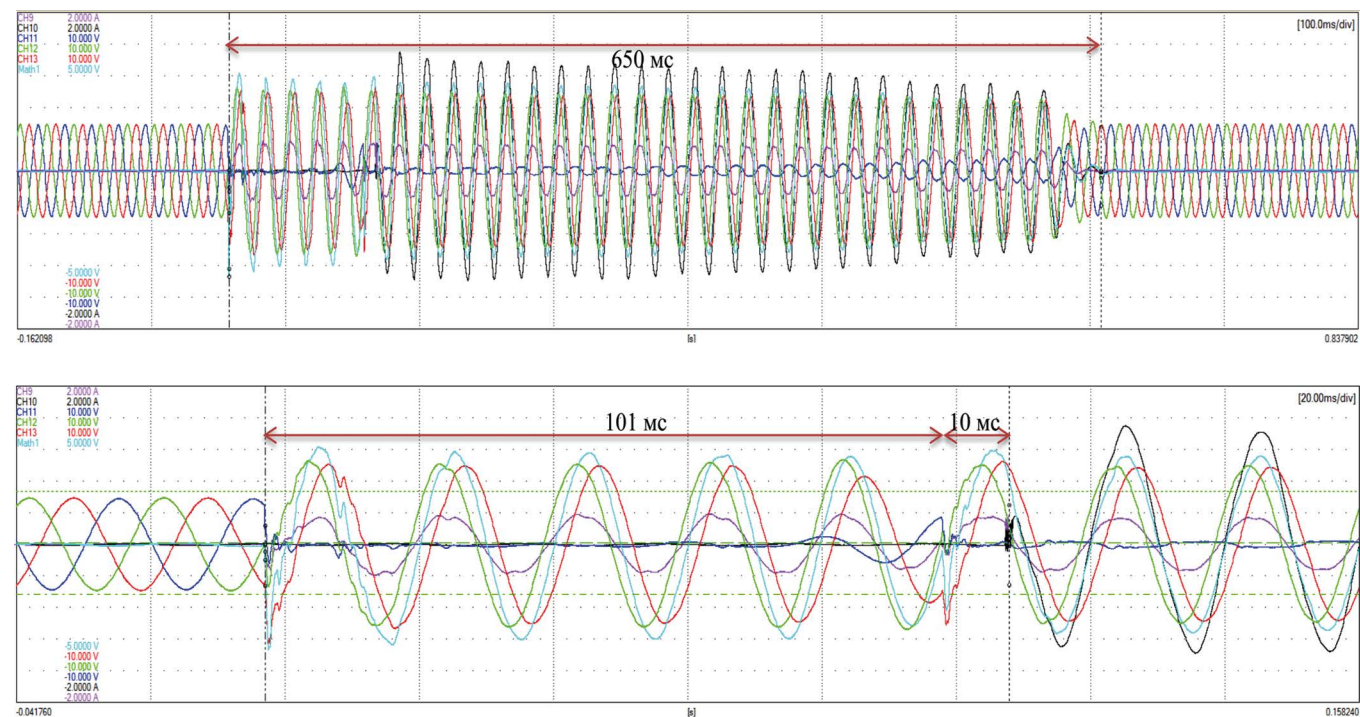


Рис. 8. Осциллограмма однофазного замыкания в кабельной сети 35 кВ с временно установленной системой мониторинга перенапряжений

результаты срабатывания устройств определения поврежденного фидера и комплектов релейной защиты (реализованных алгоритмов защиты от замыканий на землю в микропроцессорных терминалах РЗА). Это достигается благодаря периодическому сравнительному анализу данных цифрового осциллографа-регистратора и количества, видов и причин замыканий и аварийных отключений, записанных в оперативном журнале и журнале срабатываний РЗА. Пример полученной в ходе мониторинга в сети 35 кВ осциллограммы с определением длительности различных этапов процесса замыканий и максимального уровня перенапряжений при ОЗЗ (62,8 кВ) приведен на рис. 8.

Очевидно, получаемые при такой технологии измерений данные являются более информативными благодаря применению делителей напряжения и доступа к инструментарию гармонического и статистического анализа сигналов с помощью внешнего программного обеспечения, например MATLAB.

Приведенные аргументы подтверждают актуальность разработки и внедрения в распределительных сетях 6–35 кВ современных устройств цифрового осциллографирования на основе отечественных электронных узлов и комплексов с применением емкостных или компенсированных делителей напряжения для контроля, регистрации и первичного анализа переходных

электромагнитных процессов в широкой полосе частот [11, поз. 28].

Это позволит получить объективную и своевременную информацию о переходном электромагнитном процессе, его развитии и параметрах, а также последовательности действий по оперативным переключениям, выполненным автоматически или по команде диспетчера. Применение устройств цифрового осциллографирования обеспечит возможность полноценного анализа технологических нарушений и аварийных событий согласно требованиям Приказа Минэнерго России [12].

Такой анализ оптимально выполнять по зарегистрированным осциллограммам, отличающимся от типовых записей регистраторов аварийных событий [13] высокой детализацией, необходимой для контроля переходного процесса не только в течение периода его существования, но и определенных периодов времени до его возникновения и после его устранения.

Это позволяет обеспечить высокую степень наблюдаемости сети за счет цифровой регистрации фазных напряжений на стороне 6–35 кВ питающих силовых трансформаторов подстанции посредством осциллографирования и первичного анализа параметров переходных процессов в режимах однофазных повреждений и коротких замыканий, с передачей информации во внутреннем информационном контуре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод измерения с созданием искусственного управляемого ОЗЗ позволяет в необходимом объеме обеспечить требования ПТЭ электрических станций и сетей РФ [1, пп. 571, 621]. По итогам таких измерений эксплуатирующая организация получает исчерпывающую информацию для собственного использования, перспективного проектирования режимов нейтрали, а также для представления в территориальный орган Ростехнадзора во исполнение соответствующих предписаний.
2. Альтернативным и надежным способом измерения емкостного тока 50 Гц является создание кратковременной несимметрии с помощью высоковольтных конденсаторов в фазе сети при условии изолированной нейтрали. Метод находит широкое применение в сетях, где проведение опытов искусственного замыкания на землю по каким-либо причинам невозможно.
3. Регистрация электромагнитных процессов при замыканиях на землю с максимальной информативностью служит для определения емкостного тока частоты 50 Гц и его гармонического состава (тока искажения), исследования характера изменения фазных напряжений, уровней перенапряжений, оценки риска развития в исследуемой сети феррорезонанса, измерения токов ДГР и резисторов в нейтрали, проверки соответствия степени расстройки компенсации нормативу.
4. Современные цифровые многоканальные осциллографы позволяют реализовать задачи регистрации, сохранения и последующей обработки измеряемых сигналов токов и напряжений в широком диапазоне частот с помощью встроенного программного обеспечения или в отдельных математических программах. Важную роль играют характеристики применяемых первичных датчиков тока и напряжения, которые должны обеспечить преобразование первичных аналоговых сигналов тока на частотах до 5 кГц, а напряжения — в требуемом диапазоне частот переходного процесса замыкания на землю.
5. С целью снижения рисков аварийных отключений эксплуатирующая организация может предусмотреть замену опытов искусственных ОЗЗ на непрерывный мониторинг переходных процессов с осциллографированием фазных напряжений и токов в цепи нейтрали. В этом случае контролируются замыкания на землю и КЗ, возникающие из-за пробоя или механического повреждения изоляции оборудования, что позволяет на новом уровне обеспечить наблюдаемость сети и исполнение Приказа Министерства энергетики РФ [12]. Однако при таком способе регистрации отсутствует возможность получить достоверную информацию о действительных значениях тока замыкания на землю в рамках выполнения нормативных требований ПТЭ электрических станций и сетей РФ.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

## ↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утв. Приказом Министерства энергетики РФ №1070 от 04.10.2022: введ. в действие 06.03.2023.
2. Ширковец А.И., Чашин О.А., Лиске А.Г. Опыт измерения емкостного тока в сетях 6–10 кВ промышленного предприятия методом инъекции тестового сигнала // Энергоэксперт. 2025. № 4. С. 68–73.
3. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) Типовая инструкция по компенсации емкостного тока в сетях 6–35 кВ.
4. Кутумов Ю.Д. Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих: автореф. дис. к. т. н. Иваново, 2022. 20 с.
5. Определение тока однофазного замыкания на землю на основе натурного эксперимента с осциллографированием / Валов В.Н., Ширковец А.И., Ильиных М.В. [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 03. С. 104–113.
6. Майоров А.В., Челазнов А.А., Ильиных М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 6. С. 23–29.
7. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Усовершенствованный способ измерения емкостной и активной составляющих токов однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ // Промышленная энергетика. 2012. №2. С. 23–27.
8. Кадомская К.П., Лаптев О.А. Предотвращение самопроизвольного смещения нейтрали — задача для разработчиков ТН // Новости Электротехники: электронный журнал. URL: <http://news.elteh.ru/arh/2009/58/08.php> Дата публикации: 2009. №4(58).
9. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
10. Брыкин В.П., Дроздов Н.В., Корчмарик Ю.Г. Системы компенсации емкостного тока замыкания на землю. Соответствие требованиям нормативных документов // Новости ЭлектроТехники. 2018. №3 (111); №4 (112). С.38–41; С.42–47.
11. «Россети» определили новые тематики НИОКР на 2025–2027 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://eepir.ru/new/rosseti-opredelili-novye-tematiki-niokr-na-2025-2027/> (Дата обращения 20.11.2025).
12. Об утверждении Порядка передачи оперативной информации об авариях в электроэнергетике и инцидентах в электроэнергетике, форм актов по результатам расследования причин аварий и инцидентов в электроэнергетике и требований к их заполнению, форм отчетов об авариях и инцидентах в электроэнергетике и требований к их заполнению и о внесении изменений в приказ Минэнерго России от 2 марта 2010 г. № 90: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30 сентября 2025 № 1214 (Зарегистрирован 01.10.2025 № 83716) [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202510020002> (Дата обращения 07.12.2025).
13. СТО 34.01–4.1–002–2017. Регистраторы аварийных событий. Технические требования. Дата введения: 15.08.2017 № 427р. ПАО «Россети».