

по заземлению нейтрали сетей 6 – 35 кВ, неоспоримо является крайне важным шагом для повышения надёжности работы и безопасности эксплуатации электросетевых объектов и предприятий.

2. Пункт 621 главы 42 «XLII. Требования к эксплуатации защиты от перенапряжений» требует определённой корректировки и согласования содержания.

3. Комплексное использование требований актуализированных ПТЭ ЭЭС РФ [9], современных стандартов предприятий по режимам заземления нейтрали и других нормативных документов позволит эффективно применять современные технические решения по заземлению нейтрали (новые разработки оборудования заземления нейтрали, схемы с применением высокоомных и низкоомных резисторов заземления).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила* технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. приказом Минэнерго России от 19.06.03 г. № 229.

2. *Правила* устройства электроустановок. — 7-е изд.: утв. приказом Минэнерго России от 08 июля 2002 г. № 204. — М.: НЦ ЭНАС, 2004.

3. *РД 34.20.179* (ТИ 34-70-070–87). Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ. <https://docs.cntd.ru/document/1200037129>.

4. *РД 153-34.3-35.125–99*. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/rd_153-34_3-35_125-99.pdf.

5. *Правила* технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утв. приказом Минэнерго России от 13.01.2003 г. № 6. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&document-Id=427086&cw=40>.

6. *Правила* технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. Утв. приказом Минэнерго РФ от 12.08.2022 г. № 811 и зарегистрированы в Минюсте РФ 07.10.2022 г. (рег. № 70433). <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&document-Id=433499>.

7. *Емельянов Н. И., Ширковец А. И.* Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6 – 35 кВ // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 44 – 50.

8. *Сазонов В. Н.* Комбинированное заземление нейтрали сетей 6 – 35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 1 (40). С. 44 – 47.

9. *Правила* технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. приказом Минэнерго России от 04.11.22 г. № 1070. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=438327>.

DOI: 10.34831/EP.2023.74.83.002

УДК 621.311

Измерение ёмкостных токов, токов дугогасящих реакторов, напряжений на фазах и нейтрали в опыте контролируемого замыкания на землю

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук

ИЛЬИНЫХ М. В., ЛИСКЕ А. Г.

ООО «Болид»

630015, г. Новосибирск, Электrozаводской пр., 1

eng@pnpbold.com



А. И. Ширковец



М. В. Ильиных



А. Г. Лиске

Приведены методические основы определения тока однофазного замыкания на землю, тока дугогасящих реакторов, напряжений фаз и напряжения смещения (несимметрии) экспериментальным путём. Значения этих токов и напряжений необходимы для расчётов и выбора способа заземления нейтрали электрической сети напряжением от 6 до 35 кВ и параметров необходимого силового оборудования. Подобные измерения регламентированы Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ и должны проводиться не реже 1 раза в 6 лет. Отмечено, что максимальный объём информации при правильной постановке измерений можно получить, создавая кратковременные искусственные замыкания на землю, которые являются контролируруемыми и относительно безопасными. Показано, что современная цифровая аппаратура, применяемая в комплексе с широкополосными датчиками тока и напряжения, позволяет получить необходимый объём данных для решения любых задач по выбору и реализации оптимального режима нейтрали сети, а также проверить работоспособность уже установленного оборудования в нейтрали.

В качестве примера измерений параметров сети по описанной методике представлены результаты исследований в электрической сети 6 кВ одного из центров питания 220 кВ нефтеперерабатывающего завода. К особенностям сети можно отнести большое число электродвигателей мощностью до 4400 кВт, исключительное использование кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и поливинилхлорида, а также применение сложной схемы комбинированного заземления нейтрали сети 6 кВ на основе комплекта оборудования полностью китайского производства компании Sieyuan Electric.

Ключевые слова: методика измерений, натурные испытания, цифровой осциллограф, частота дискретизации, ёмкостный ток, однофазное замыкание на землю, контролируемое замыкание, дугогасящий реактор, фазное напряжение, напряжение на нейтрали, электрическая сеть 6 кВ, система компенсации, комбинированное заземление, сухой дугогасящий реактор, контроллер настройки.

Однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) представляет собой специфический электромагнитный процесс, сопровождающийся снижением напряжения на повреждённой фазе до значений, определяемых переходным сопротивлением в месте пробоя изоляции относительно «земли» и повышением напряжения на двух других фазах до уровня, который определяется видом замыкания и параметрами сети [1]. Изучению переходных и установившихся режимов замыкания на землю в электрических сетях напряжением до 35 кВ посвящены многочисленные исследо-

вания. Измерения ёмкостного тока, в значительной мере характеризующего режим ОЗЗ и дающего основание для выбора того или иного режима заземления нейтральной точки, регламентированы в Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ ЭЭС РФ) [2, п. 571, п. 621], где указано: «Измерение ёмкостных токов, токов дугогасящих реакторов, токов замыкания на землю и напряжений смещения нейтрали в сетях с компенсацией ёмкостного тока должно производиться при вводе в эксплуатацию дугогасящих реакторов

и значительных изменениях режимов сети, но не реже 1 раза в 6 лет». Основные методы измерения ёмкостного тока, включая метод с созданием искусственного «металлического» замыкания на землю, представлены в РД 34.20.179 [3]. На принципе инъекции тестового сигнала в контур нулевой последовательности разработаны способы определения ёмкостного тока, которые реализованы в виде переносных приборов [4, 5]. Эти устройства, изначально созданные для автоматического управления и наладки дугогасящих реакторов, не внесены в Государственный реестр средств измерений. Следовательно, с их помощью возможно получить значения ёмкостного тока, которые равновероятно близки к реальным токам замыкания или же не соответствуют им с неизвестным отклонением. Поскольку достоверность измерений тока ОЗЗ с помощью таких приборов не подтверждена, в статье они не рассматриваются. Серийно выпускаемые регистраторы аварийных событий (РАС) также не предназначены для измерения ёмкостного тока замыкания на землю.

К настоящему времени на основе натурных измерений показателей режимов ОЗЗ в ООО «Болид» накоплен значительный объём подтверждённых данных, создана пополняемая база цифровых осциллограмм, которые позволяют выполнить полноценный частотный анализ сигналов тока и напряжения в различных электрических сетях. Если говорить о стационарных периодических процессах, например искусственных «металлических» замыканиях на землю, анализ спектра высших гармоник в сигналах тока и напряжения можно выполнить с помощью дискретного преобразования Фурье. Для исследования спектрального состава сигналов при дуговых ОЗЗ используются другие способы, включая вейвлет-анализ. Применение современных осциллографов-регистраторов даёт возможность выбора требуемого числа входных каналов, частоты дискретизации АЦП¹ по отдельным каналам, длительности записи, зависящей только от объёма памяти при заданном числе выборок в секунду, условий автоматического срабатывания (запуск по триггеру) и пр. Важно отметить следующее: согласно теореме Котельникова частота дискретизации АЦП регистрирующего устройства должна быть не менее чем в два раза выше максимальной частоты регистрируемых сигналов тока и напряжения электромагнитного процесса. Применение цифровых осциллографов, какими бы характеристиками они не обладали, не решает вопрос достоверной записи сигналов. Для этого необходимо использовать датчики тока и напряжения

¹ АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

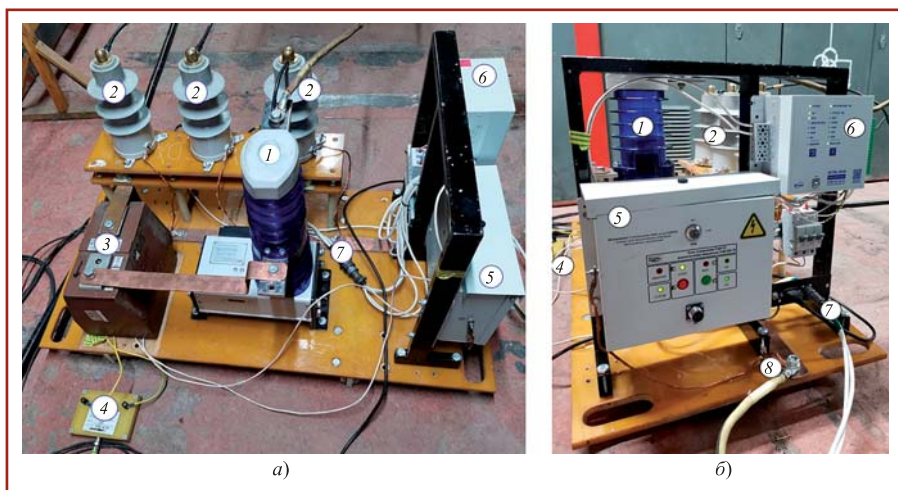


Рис. 1. Комплектная установка для измерения тока ОЗЗ в сетях 6(10) кВ методом искусственного замыкания на землю (а) и вид блока управления с устройством РЗА (б):

1 — однополюсный вакуумный выключатель (ВВ); 2 — делители напряжения активно-ёмкостные; 3 — трансформатор тока серии ТОЛ-10; 4 — активный шунт; 5 — блок управления однополюсным ВВ; 6 — микропроцессорное устройство релейной защиты; 7 — провод выносного пульта управления с однополюсным ВВ; 8 — узел заземления, присоединяемый к заземляющему контуру на объекте

с широкой полосой пропускания по частоте и малыми погрешностями, а также правильно применять математический аппарат для обработки зарегистрированных сигналов.

Методика измерений

Как показывают опыт и результаты обследования действующих электрических сетей напряжением до 35 кВ включительно, полноценным способом измерения токов ОЗЗ, токов ДГР², напряжений смещения при разной настройке ДГР и других параметров сети является создание в первичной сети искусственного контролируемого замыкания фазы на землю с использованием поверенных приборов и калиброванных датчиков, имеющих малую погрешность. Для проведения безопасным и технологичным образом измерений сигналов ёмкостных токов и фазных напряжений, векторное сложение которых определяет напряжение на нейтрали, специалистами ООО «Болид» была разработана специальная установка, позволяющая управлять искусственным ОЗЗ (рис. 1). Установка подсоединяется шинами или высоковольтными проводами непосредственно к фазным проводникам сети.

Датчики напряжения, представляющие собой широкополосные делители напряжения, имеющие погрешность не более 1,5 % в диапазоне частот 20 Гц — 500 кГц, включаются под напряжение коммутацией трёхполюсного выключателя ячейки, где в кабельном отсеке к первичным шинам подключена измерительная установка. Натурные измерения предусматривают создание кратковременного, на время 0,5 — 1,0 с, искусственного и контролируемого «металлического» замыкания на землю

² ДГР — дугогасящий реактор.

с включением однополюсного вакуумного выключателя (ВВ) и созданием цепи протекания тока ОЗЗ через трансформатор тока ТОЛ-10 (с подтверждённой в лаборатории полосой пропускания по частоте не хуже 50 Гц — 10 кГц). Сигнал с трансформатора тока, наряду с вторичными сигналами с делителей напряжения, поступает на цифровой осциллограф-регистратор, позволяющий выполнять запись с частотой дискретизации от 100 кГц до 100 МГц.

Для минимизации рисков отказа в настоящее время выполнена защита установки с помощью серийного устройства релейной защиты и автоматики. Это позволяет предусмотреть автоматическое отключение однополюсного ВВ с заданными выдержками по времени и по току, настроить токовую отсечку для защиты от коротких замыканий. В качестве первичных датчиков нецелесообразно применять трансформаторы тока нулевой последовательности (ТННП), токовые клещи от приборов контроля качества электроэнергии и штатные заземляемые трансформаторы напряжения. Указанные устройства не обладают пригодным для неискажённой передачи сигналов частотным диапазоном, поэтому их включение в измерительную схему не позволит выполнить корректную запись переходных процессов при ОЗЗ, как минимум в части амплитуд перенапряжений и пиковых значений токов.

Таким образом, ключевые особенности методики выполняемых натурных испытаний с созданием контролируемого ОЗЗ (в качестве наиболее полного ниже приведён случай для схемы с ДГР, где регистрируется наибольшее число сигналов) можно сформулировать следующим образом.

Безопасность измерений с искусственными ОЗЗ обеспечивается комплексом мероприятий. Подключение

и отключение измерительной аппаратуры, сборка схемы измерений выполняется строго по наряду-допуску на обесточенном и выведенном в ремонт оборудовании электростанции или подстанции. Поэтому персонал, выполняющий испытания, должен иметь необходимую квалификацию, подтвержденную удостоверениями и протоколами (группа допуска по электробезопасности, разрешение на право проведения высоковольтных испытаний, удостоверение по пожарной безопасности и пр.).

С позиции минимального воздействия на оборудование и защиты от вероятного возникновения второго ОЗЗ на другой фазе сети — выполняются мероприятия по настройке РЗА в ячейке комплектного распределительного устройства (КРУ) или стационарной камере одностороннего обслуживания (КСО), где в кабельном отсеке подключается устройство организации ОЗЗ. Также следует подчеркнуть, что наличие в составе измерительной установки однополюсного ВВ номинальным током 1000 А и током отключения 20 кА и устройства микропроцессорной защиты обеспечивает дополнительную защиту, чтобы устранить имитируемое однофазное замыкание первым, если в прилегающей сети из-за ослабленной изоляции возникнет вторая «земля».

Информативность измерений с искусственными ОЗЗ является максимальной и достигается осциллографиче-

ским роением всего процесса, от предзаписи нормального режима по напряжению, далее с включением на 0,5 – 5,0 с «металлического» ОЗЗ с регистрацией изменения напряжений по фазам, остаточного тока в месте замыкания, индуктивного тока ДГР (при его наличии), фиксации показаний автоматики каждого ДГР. В этой же осциллограмме записывается отключение ОЗЗ. В сети с изолированной нейтралью необходимым и достаточным является время замыкания 0,5 – 1,0 с, в сети с компенсацией ёмкостного тока в зависимости от вида ДГР, его текущей настройки, принципа работы автоматики управления и ряда других условий, длительность контролируемого ОЗЗ принимается большей и составляет в среднем 1,0 – 5,0 с.

Результат обследования систем компенсации с помощью серии искусственных ОЗЗ представляет собой технический отчет либо протокол с полным анализом натуральных осциллограмм, значениями ёмкостных токов и заключениями о сохранении или изменении режима нейтрали в соответствии с нормами ПТЭ электрических станций и сетей [2]; о работоспособности нейтрализующего трансформатора, ДГР и его автоматики управления; достоверности показаний этой автоматики; фактической точности настройки компенсации ёмкостного тока в исследованных режимах; добротности КНП; качестве ста-

ли реактора и сборки магнитопровода. В зависимости от глубины обследования перед каждой серией опытов может быть измерен действительный ток ОЗЗ, его активная и реактивная составляющие, гармонический ток искажения. В зависимости от уровня гармоник это позволяет оценить целесообразность компенсации ёмкостного тока частотой 50 Гц в конкретной сети и дать соответствующие предложения.

Границы применения метода искусственного контролируемого ОЗЗ связаны с естественными ограничениями эксплуатирующей организации по созданию таких режимов в действующей электрической сети. Очевидно, для искусственных дуговых ОЗЗ с фиксируемым наибольшим уровнем перенапряжений $U_{пер}$ в пределах $(2,5 \dots 2,8)U_{Фмакс}$ (где $U_{Фмакс}$ — амплитуда фазного напряжения сети) вероятность вторичных пробоев больше, чем для «металлических» замыканий. Во втором случае, несмотря на малую длительность замыкания, при удлинении напряжения на двух фазах в $\sqrt{3}$ раз остаётся риск возникновения второй «земли», особенно в старых кабельных сетях 6 – 10 кВ с изношенной изоляцией.

Нередки случаи, когда кабельные линии, ввиду неудовлетворительного состояния и значительного превышения срока службы, не испытываются полным шестикратным напряжением по нормам [6, 7], так как высок риск их ава-

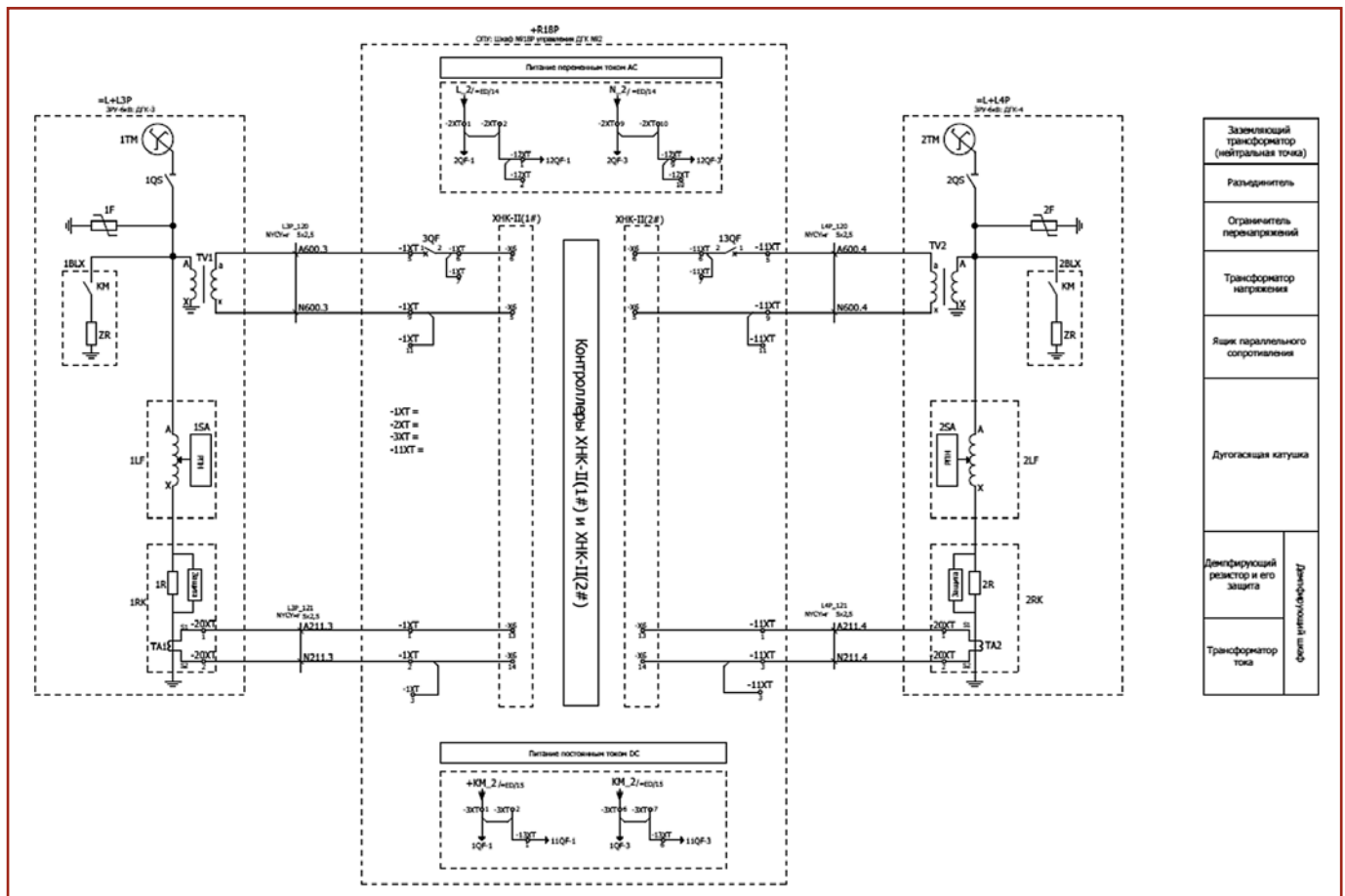


Рис. 2. Принципиальная схема подключения и управления оборудованием в нейтрали сети 6 кВ НПС

рийного отказа. Для сбережения ресурса таких линий на предприятии могут быть установлены облегчённые нормы испытаний. В относительно новых электрических сетях, полностью или частично выполненных на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), электрически ослабленным местом являются, как правило, муфты. Вследствие не выявленных вовремя нарушений технологии прокладки линии и монтажа кабельной арматуры замыкания на землю малой длительности способны привести к междуфазному пробую с отключением линии защитами от КЗ. С другой стороны, периодические испытания оборудования щадящими и неразрушающими методами, а также своевременные восстановительные работы, с высокой вероятностью позволяют безаварийно и надёжно выполнить измерения ёмкостного тока ОЗЗ прямым методом.

Помимо риска повреждения оборудования, технические руководители-энергетики промышленных предприятий оценивают опасность потери питания технологических установок и недовыпуска товарной продукции, электросетевых предприятий — обеспечения ответственных потребителей и недоотпуска электроэнергии, электрических станций — отключения генераторов и приводных электродвигателей сети собственных нужд. Единого подхода для решения вопроса с рисками нештатных ситуаций при измерениях не существует, но для ликвидации таких ситуаций существуют устройства релейной защиты и автоматики. В любом случае для определения ёмкостного тока путём контролируемого замыкания на землю требуется получить согласование эксплуатирующей организации либо предусмотреть измерения другими методами. Однако следует иметь в виду, что только результаты прямого измерения с созданием ОЗЗ позволяют полностью обеспечить требования

п. 621 ПТЭ электрических станций и сетей РФ [2] и предоставить эксплуатирующей организации исчерпывающий ответ на выданное предписание Федеральной службы по технологическому, экологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), которое зачастую и является основанием для выполнения измерений.

Обследование сети 6 кВ нефтеперерабатывающего завода

В 2014 г. на крупном нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) для электропитания новой группы технологического оборудования была введена в эксплуатацию очередная центральная распределительная подстанция (ЦРП) 220/6 кВ, имеющая на отходящих фидерах протяжённые кабельные линии 6 кВ на основе кабелей с изоляцией из поливинилхлорида и СПЭ сечением жил до 240 мм². Сеть 6 кВ ЦРП состоит из четырёх секций шин, которые в нормальном режиме работают раздельно, каждая пара секций получает питание через токоограничивающие реакторы типа от трансформатора 63 МВА с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

На отходящих присоединениях секций 6 кВ установлены вакуумные выключатели типа VD4, для обеспечения питания цепей защит и сигнализации замыкания на землю применены заземляемые трансформаторы напряжения, по два на каждую секцию. От секции IV, которая и рассматривается далее, осуществляется электроснабжение шести цеховых и распределительных подстанций, которые, в свою очередь, обеспечивают питание двигателей мощностью 200 – 4200 кВт. Релейная защита от ОЗЗ на присоединениях выполнена с использованием устройств REF615, введена функция ненаправленной защиты,

первичный ток уставки 10 А, действие защиты на сигнал.

Режим заземления нейтрали сети 6 кВ ЦРП — комбинированный, через параллельно включённые ДГР (с двумя штатными резисторами) и высокоомный резистор сопротивлением 500 Ом. Для компенсации ёмкостного тока в сети каждой секций шин 6 кВ ЦРП установлены комплекты оборудования для заземления нейтрали производства компании «Sieyuan Electric», Китай. Расчётный ёмкостный ток в сети IV секции 6 кВ ЦРП составляет 17,9 А.

В состав комплекта оборудования, установленного в отдельной камере ЗРУ 6 кВ, входят сухой трансформатор заземления DKSC-300/6, сухой дугогасящий реактор ХНDCZ-300/6 (мощность 300 кВА, диапазон регулирования индуктивного тока 15 – 86 А) с устройством регулирования под нагрузкой (РПН) типа MFKI-120/10J для переключения ступеней реактора (шаг примерно 5 А), шкаф демпфирующего сопротивления RNK-6, шкаф параллельного резистора BLX-6. Управление настройкой ДГР осуществляется с помощью контроллера ХНК-II. Схема подключения и управления оборудованием в нейтрали приведена на рис. 2, фотографии оборудования — на рис. 3 – 5.

Демпфирующее сопротивление RNK-6, предназначенное для ограничения напряжения смещения нейтрали до величины не более 15 % фазного напряжения, обеспечивает нормальную работу сети при резонансной настройке ДГР и включается последовательно в цепь реактора. Сопротивление BLX-6, которое обеспечивает ток 39,4 А и может кратковременно включаться параллельно силовой обмотке ДГР с помощью высоковольтного контактора, служит для селективного выявления повреждённого присоединения. В текущем режиме работы контроллера ХНК-II для всех секций 6 кВ ЦРП выставлен автоматический режим настройки компенсации, пример показаний автоматики приведён на рис. 6.

Для проведения натурных измерений совместно со специалистами НПЗ разработана рабочая программа проведения искусственного замыкания на «землю» в сети 6 кВ, утверждённая главным инженером и согласованная главным энергетиком. На специально выделенном присоединении 6 кВ секции IV с целью создания металлического однофазного замыкания на землю для замыкания одной из фаз на «землю» использовалась установка для организации ОЗЗ, состав и характеристики которого представлены ранее.

Для измерения тока ОЗЗ в цепь однофазной «закоротки» на землю устанавливался ТТ типа ТОЛ-10-11 200/5 А, сигнал со вторичной обмотки которого подавался на цифровой осциллограф. Вторичная обмотка ТТ шунтировалась

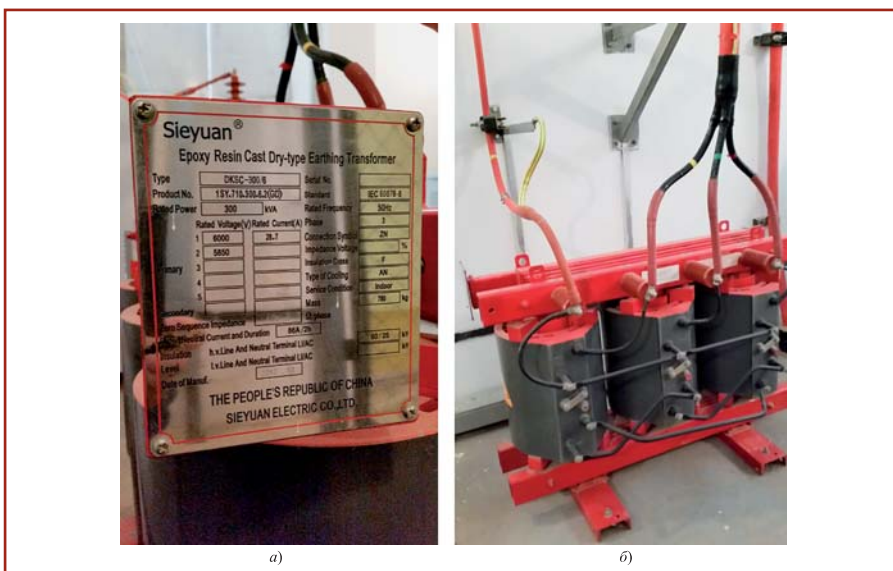


Рис. 3. Паспортная табличка (а) и внешний вид (б) присоединительного сухого трансформатора DKSC-300/6

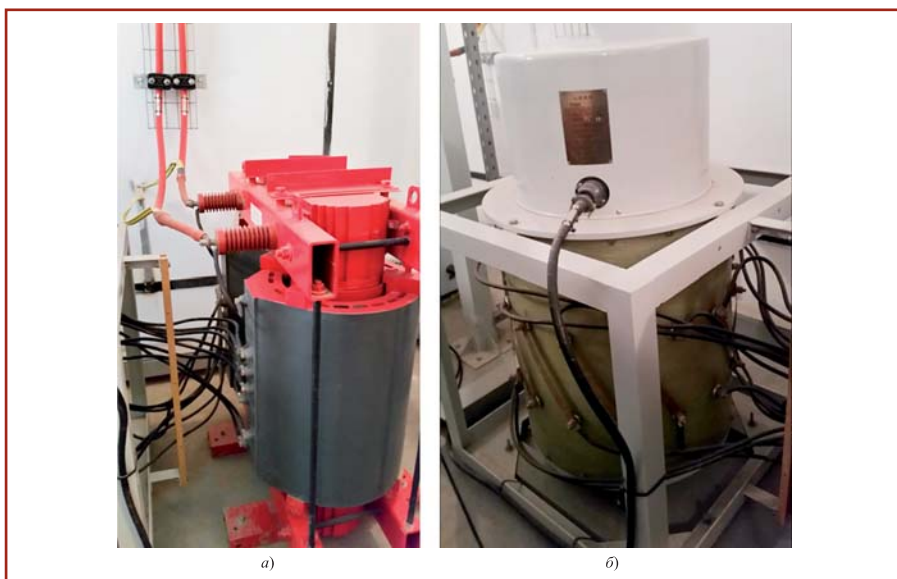


Рис. 4. Сухой реактор XHDCZ–300/6 (а) и устройство РПН (б) для его регулирования



Рис. 5. Шкафы демпфирующего резистора RNK-6 (а) параллельного резистора BLX-6 (б)

сопротивлением 0,72 Ом. Для измерения тока компенсации использовался установленный в цепь заземления ДГР трансформатор тока ТТ2 типа ТЛК-10-5 100/5. К выводам вторичной обмотки ТТ2, зашунтированной нагрузочным сопротивлением 0,49 Ом, через измерительный кабель подключался цифровой осциллограф. Для измерения тока через высокоомный резистор был установлен трансформатор тока ТТ3 типа ТОЛ-10 150/5 в цепь заземления резистора. К выводам вторичной обмотки ТТ3, зашунтированной нагрузочным сопротивлением 0,49 Ом, через измерительный кабель подключался цифровой запоминающий осциллограф для регистрации тока, протекающего через резистор.

Регистрация фазных напряжений проводилась с помощью высоковольтных делителей напряжения ДНЕ-10 с коэффициентом преобразования 4250 и классом точности 1,5, которые подключались к шинам в ячейки. С низковольтного плеча делителей напряжения через измерительный кабель на осциллограф записывались сигналы фазных напряжений.

Схема подключения измерительной аппаратуры для регистрации тока ОЗЗ, остаточного тока, тока ДГР, тока резистора и фазных напряжений при металлическом замыкании на землю в сети 6 кВ секции ЦРП приведена на рис. 6.

Для определения работоспособности установленного в нейтраль сети 6 кВ ЦРП оборудования была проведена серия экспериментов с созданием искус-

ственного «металлического» замыкания на землю, осциллографированием переходных процессов при ОЗЗ и определением тока ОЗЗ, остаточного тока ОЗЗ, тока ДГР, тока высокоомного резистора. Во всех опытах на землю замыкалась фаза А. Величина линейных напряжений на секциях шин 6 кВ при проведении измерений составляла около 6,3 кВ, длительность контролируемого «металлического» ОЗЗ — от 2 до 4 с.

Натурные осциллограммы нескольких опытов приведены на рис. 6 – 7, цвет линий сигналов: синий — напряжение фазы А, зелёный — напряжение фазы В, красный — напряжение фазы С, чёрный — ток ОЗЗ, сиреневый — ток ДГР.

Для сети с изолированной нейтралью после отключения ОЗЗ зарегистрированы процессы восстановления фазных напряжений, имеющие колебательный феррорезонансный затухающий характер (рис. 8), обусловленный наличием нелинейных сопротивлений — трансформаторов напряжения электромагнитного типа. После отключения ОЗЗ в ряде случаев наблюдается увеличение напряжения с частотой, близкой к 50 Гц, до значений выше линейных. Восстановление фазных напряжений до нормальной величины происходит за время 0,25 – 0,40 с после отключения ОЗЗ.

Для режима заземления нейтрали через ДГР со значительной расстройкой компенсации после отключения ОЗЗ процесс возврата напряжений к фазным значениям носит характер биений (рис. 9). Максимальные амплитуды напряжения в этом случае зависят от расстройки компенсации и добротности колебательного контура.

В табл. 1 приведены результаты гармонического анализа тока ОЗЗ, остаточного тока ОЗЗ, тока ДГР для нескольких характерных измерений в исследуемой сети 6 кВ, соответствующих осциллограммам рис. 8–9. Указаны значения кратных 50 Гц гармоник тока ОЗЗ в амперах и в процентах, выделены значения, превышающие условный уровень 0,2 А, а также рассчитаны действующие значения тока искажения, вычисленные как корень из суммы квадратов токов высших гармоник со 2-й по 40-ю.

Анализ всей серии измерений, которые не приведены для экономии объёма статьи, показал, что в целом суммарное содержание гармоник в токе ОЗЗ разных секций 6 кВ ЦРП составляет от 0,5 до 1,3 А (3,0 – 44,4 % от уровня тока частотой 50 Гц, в токах ДГР — от 0,17 до 0,9 А, в токах резистора — не превышает 0,07 А. В остаточном токе ОЗЗ также содержатся высшие гармоники до 1,6 А, поскольку ДГР компенсирует лишь ёмкостную составляющую тока ОЗЗ промышленной частоты. Следовательно, для точного определения действительного тока ОЗЗ, остаточного тока ОЗЗ и фактической степени расстройки компенсации необходимо проводить осциллографирование сигналов с после-

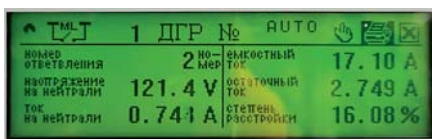


Рис. 6. Панель контроллера ХНК-II, меню «Режим работы»

дующим гармоническим анализом, выделением гармоник частотой 50 Гц и вычислением её значения.

В табл. 2 приведены действующие значения полного тока ОЗЗ, остаточного тока в месте замыкания, тока ДГР и резистора, их активная и реактивная составляющие, полученные по результатам спектрального анализа осциллограмм. Действующее значение полного тока ОЗЗ в обследуемой сети 6 кВ по результатам измерений — 16,2 А.

В табл. 3 сведены показания с дисплея контроллера управления ХНК-II, зафиксированные при измерениях. В последнем столбце также указан характер реактивного тока — ёмкостный или индуктивный.

В табл. 4 приведено сравнение значений ёмкостного тока ОЗЗ, остаточного тока ОЗЗ, тока ДГР, степени расстройки компенсации по показаниям на экране контроллера ХНК-II и полученных в ходе измерений их действительных значений.

Фактическая степень расстройки компенсации определялась по результатам экспериментальных измерений и рассчитывалась по известной формуле:

$$v = (I_C - I_L) / I_C \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_C — ёмкостная составляющая тока замыкания на «землю», А; I_L — индуктивная составляющая тока замыкания на «землю», А.

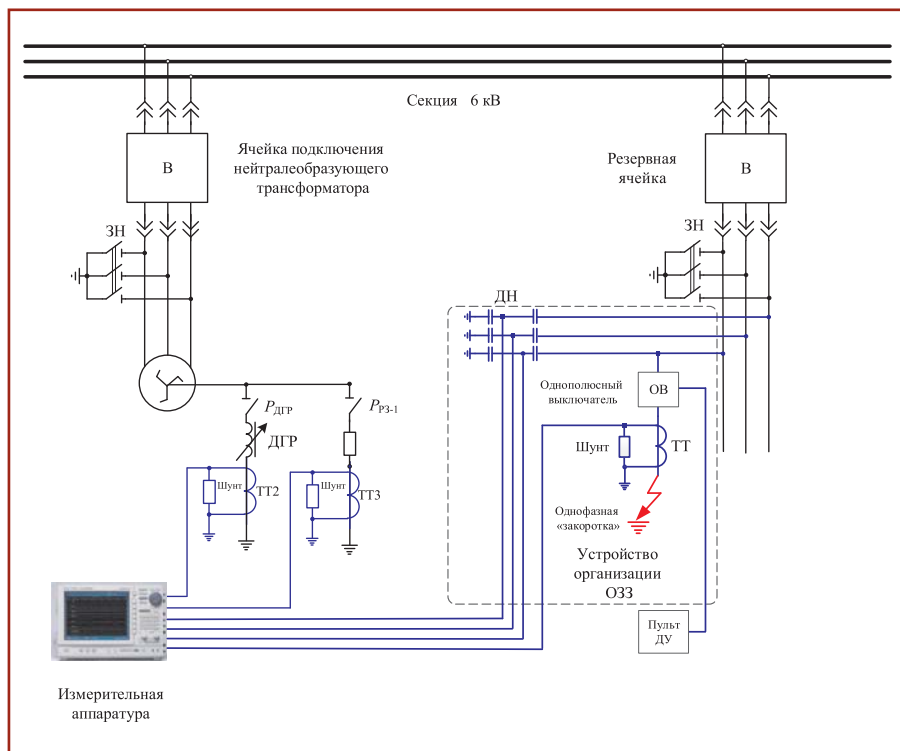


Рис. 7. Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при проведении опытов ОЗЗ в сети 6 кВ НПЗ

Следует отметить, что показания степени расстройки компенсации на экране панели управления ХНК-II имеют противоположный знак по отношению к значению v , определяемому по формуле (1). Точность определения ёмкостного тока ОЗЗ системой управления ДГР ($\delta_{I_C \text{ ёмк}}$) вычислялась как разность между значениями ёмкостного тока на экране панели управления контроллера ХНК-II и ёмкостного тока ОЗЗ, полученного при экспериментальном измерении. Точность определения $\delta_{I_C \text{ ёмк}}$ в процентном соотношении определялась по

отношению к величине ёмкостного тока ОЗЗ, полученного при экспериментальном измерении.

Для определения работоспособности оборудования заземления нейтрали в сети 6 кВ ЦРП проанализированы полученные при проведении измерений данные — натурные осциллограммы процессов ОЗЗ, файлы событий автоматике управления реакторами и другие сведения. Отмечено, что в целом нейтралеобразующие трансформаторы и ДГР, введённые в эксплуатацию в 2014 г., находятся в удовлетворительном состоянии. Поскольку протоколы (акты) их периодических осмотров, испытаний и ремонтов отсутствуют, рекомендовано провести профилактическое обслуживание, включая периодические испытания для комплекса оборудования заземления нейтрали 6 кВ ЦРП.

Установленный в нейтраль параллельно силовой обмотке ДГР постоянно включённый резистор заземления нейтрали сопротивлением 500 Ом успешно выдержал приложение фазного напряжения в рамках серии опытов ОЗЗ в сети 6 кВ ЦРП. На основании результатов измерений определено его фактическое сопротивление по измеренному напряжению на нейтрали 3580 В и протекающему в цепи току 7,12 А. Отклонение от номинального сопротивления составило 0,7 %.

Анализ полученных результатов измерений в сети 6 кВ НПЗ (табл. 4) показал, что в автоматическом режиме настройки компенсации не обеспечивают нормативно допустимую степень расстройки 5 % по требованиям [2, п. 623]. Автоматикой управления ДГР

Таблица 1

Действующие значения тока замыкания, тока ДГР и выраженные токи высших гармоник в опытах ОЗЗ

№ гармоники	Изолированная нейтраль		Компенсированная нейтраль, автоматический режим управления ДГР			
	Ток ОЗЗ		Остаточный ток ОЗЗ		Ток ДГР	
	А	%	А	%	А	%
1	16,29	100	48,09	100	64,14	100
2	0,026	0,163	0,156	0,323	0,312	0,487
3	0,063	0,390	0,434	0,902	0,492	0,767
7	0,229	1,405	0,178	0,370	0,067	0,105
11	0,195	1,197	0,229	0,477	0,018	0,027
19	0,218	1,338	0,299	0,622	0,012	0,019
23	0,248	1,523	0,318	0,662	0,008	0,012
25	0,248	1,523	0,360	0,748	0,004	0,006
29	0,287	1,761	0,371	0,771	0,003	0,004
31	0,215	1,319	0,326	0,678	0,003	0,005
34	0,212	1,304	0,171	0,357	0,003	0,005
35	1,034	6,348	1,133	2,356	0,005	0,008
37	0,227	1,391	0,227	0,471	0,002	0,004
$I_{\text{действ.2-40}}$	1,302	7,992	1,554	3,231	0,591	0,921

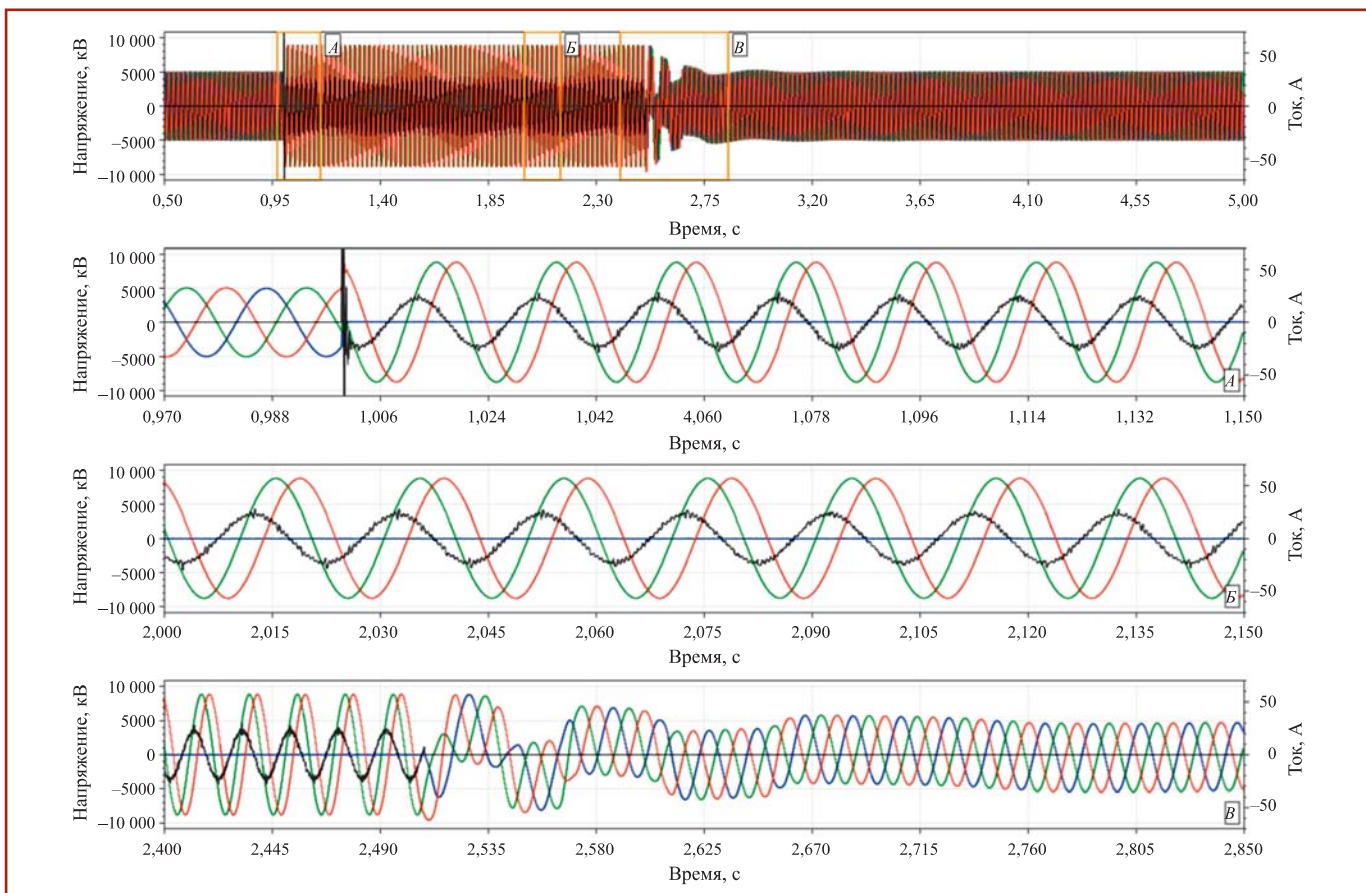


Рис. 8. Натурные осциллограммы фазных напряжений и тока замыкания на землю в сети 6 кВ, изолированная нейтраль

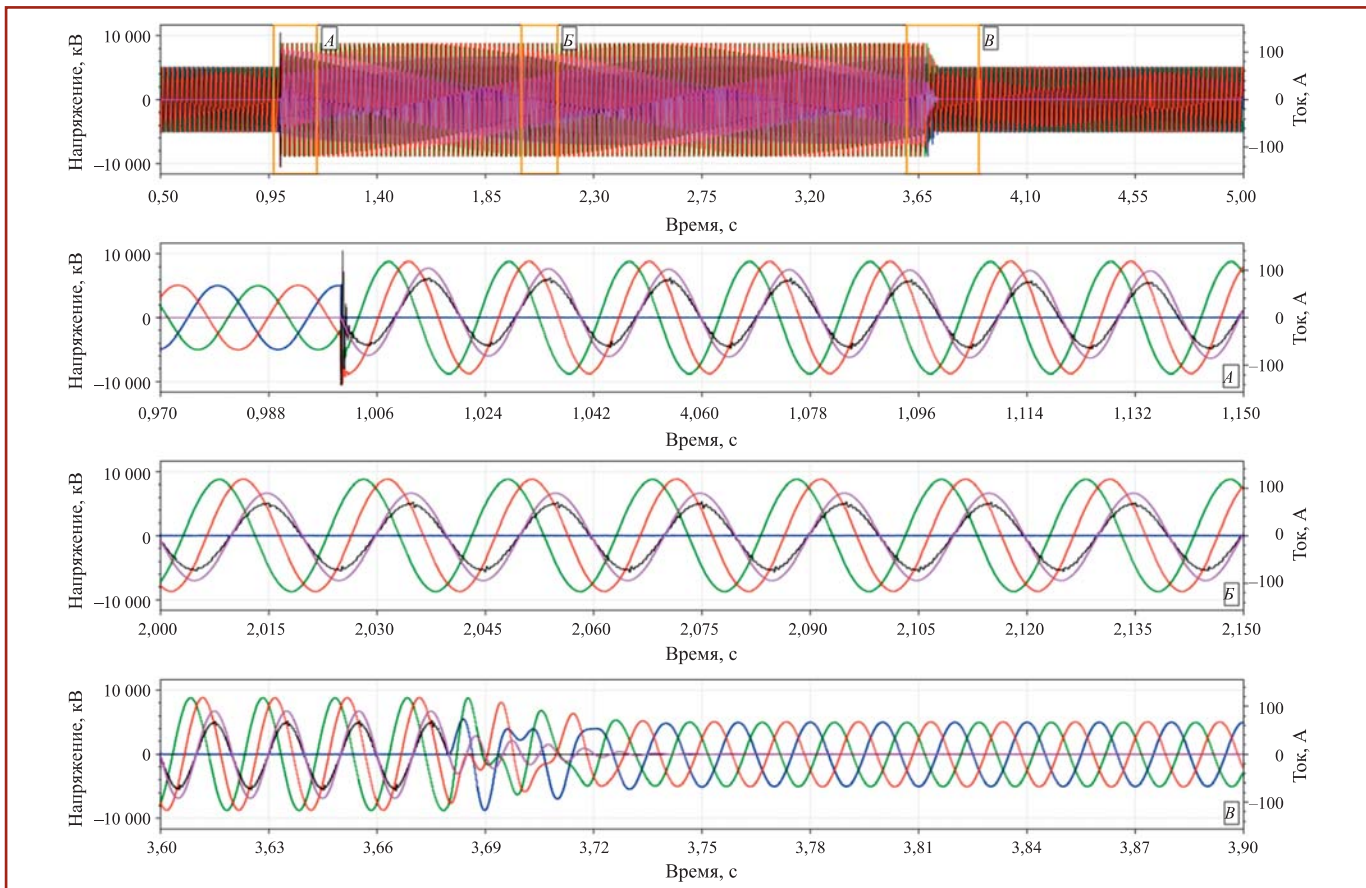


Рис. 9. Натурные осциллограммы фазных напряжений и тока замыкания на землю в сети 6 кВ, включена компенсация ёмкостного тока (автоматический режим управления ДТР)

Результаты измерений параметров ОЗЗ при различных режимах нейтрали в сети 6 кВ НПС

Режим нейтрали	Параметр	Измеренный ток ОЗЗ и ДГР на момент эксперимента, А		
		Полный	Активный	Реактивный
Изолированная нейтраль	$I_{\text{ОЗЗ}}$	-16,287	1,337	-16,232 ёмкостный
Нейтраль заземлена через ДГР, автоматический режим настройки компенсации	$I_{\text{ОЗЗ ост.}}$	48,092	2,856	48,008 индуктивный
	$I_{\text{ДГР}}$	64,143	2,298	64,101
	Расчётное значение $I_{\text{ОЗЗ ёмк.}}$	$-I_{\text{ОЗЗ ост.}} + I_{\text{ДГР}}$		16,093 ёмкостный
Нейтраль заземлена через ДГР, ручной режим настройки компенсации, РПН в положении 2	$I_{\text{ОЗЗ ост.}}$	3,104	2,818	1,301 индуктивный
	$I_{\text{ДГР}}$	17,707	5,328	16,886
	Расчётное значение $I_{\text{ОЗЗ ёмк.}}$	$-I_{\text{ОЗЗ ост.}} + I_{\text{ДГР}}$		15,585 ёмкостный
Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и резистор 500 Ом, автоматический режим настройки компенсации	$I_{\text{ОЗЗ ост.}}$	12,422	8,778	8,791 индуктивный
	$I_{\text{ДГР}}$	24,892	2,995	24,871
	$I_{\text{Р}}$	7,121	7,121	-0,035
	Расчётное значение $I_{\text{ОЗЗ ёмк.}}$	$-I_{\text{ОЗЗ ост.}} + I_{\text{ДГР}}$		16,115 ёмкостный

ёмкостный ток ОЗЗ определяется с крайне большим отклонением, в одном из опытов разница достигла 263 % фактического значения тока. Ввиду большого шага регулирования тока ДГР, определённого опытным путём как 5 А, а также из-за неправильного определения штатным контроллером ёмкостного тока ОЗЗ, в режиме автоматического регулирования фактическая степень перекompенсации составила в данной схеме 295 %. Перевод автоматики управления ДГР в режим ручной настройки и выставление положения ДГР в режим, близкий к резонансной настройке по максимуму напряжения на нейтрали, позволил обеспечить перекompенса-

цию около 8,0 %. При этом на контроллере управления ХНК-II фиксировалось значение степени настройки компенсации 25,9%.

Показано, что для правильной работы автоматики управления ДГР в данной сети 6 кВ необходимо, помимо запланированной повторной наладки, использовать классический способ настройки реактора. В ручном режиме его ток принудительно устанавливается близким к требуемой резонансной настройке, что контролируется по уровню напряжения на нейтрали до момента, когда U_0 достигнет наибольшего значения.

Заключение

1. Натурные измерения с регистрацией ёмкостного тока, тока ОЗЗ, тока ДГР, напряжения несимметрии и смещения нейтрали регламентированы действующими ПТЭ электрических станций и сетей РФ. Измерения необходимо выполнять при развитии сети, изменении её конфигурации, увеличении ёмкостного тока, замене старых или установке новых устройств его компенсации. Известное требование о периодичности выполнения измерений не реже 1 раза в 6 лет зачастую не соблюдается в эксплуатации опыта таких испытаний, методики и необходимой аппаратуры.

2. Для безопасной реализации метода измерений с созданием на 0,5 – 5,0 с искусственного ОЗЗ в ООО «Болид» разработано и применяется специальное устройство с комплектом необходимых датчиков тока и напряжения, коммутационным аппаратом, устройством релейной защиты и системой заземления. Современная методика предусматривает точную регистрацию аналоговых сигналов тока ОЗЗ и напряжений на фазах и нейтрали первичной сети с записью их вторичных мгновенных значений на многоканальный цифровой осциллограф, обладающий высокой частотой дискретизации. В качестве датчиков тока следует использовать опорные трансформаторы тока датчиков напряжения — специальные ёмкостные или компенсированные делители. В переходных процессах такие трансформаторы тока обеспечивают полосу пропускания не хуже 50 Гц –

Таблица 3

Показания контроллера управления ХНК-II

Режим нейтрали	Параметр		Режим сети	
			нормальный режим	режим ОЗЗ
Нейтраль заземлена через ДГР, автоматический режим настройки	Остаточный ток, А	I_g	5,3	5,3
	Ток нейтрали (ток ДГР), А	I_0	0,135	59,41
	Ёмкостный ток, А	I_c	58,92	58,91
	Расстройка, %		8,994	
	Напряжение на нейтрали, В	U_0	6,508	3364
Нейтраль заземлена через ДГР, ручной режим настройки	Положение ДГР		11	11
	Остаточный ток, А	I_g	4,086	
	Ток нейтрали (ток ДГР), А	I_0	0,326	
	Ёмкостный ток, А	I_c	15,75	
	Расстройка, %		25,93	
Комбинированное заземление нейтрали через ДГР и резистор 500 Ом, автоматический режим настройки	Напряжение на нейтрали, В	U_0	52,76	
	Положение ДГР		2	2
	Остаточный ток, А	I_g	6,4	6,3
	Ток нейтрали (ток ДГР), А	I_0	0,155	23,76
	Ёмкостный ток, А	I_c	18,84	18,94
	Расстройка, %		33,95	
	Напряжение на нейтрали, В	U_0	19,42	3554
	Положение ДГР		3	3

Сравнение значений ёмкостного тока ОЗЗ, тока ДГР, остаточного тока ОЗЗ по показаниям контроллера управления ХНК-II и их действительных значений

Режим нейтрали	Режим настройки ДГР	Параметр	Значения на контроллере управления ХНК-II	Значения по измерениям	Точность определения ёмкостного тока $\delta I_{с\ ёмк}$
Компенсированная нейтраль	Автоматический режим, положение 11 ДГР	$I_{ост.}$	5,30	48,01	
			индуктивный	индуктивный	
		$I_{ДГР}$ при ОЗЗ	59,41	64,10	42,69 А
		$I_{с\ ёмк.}$	58,92	-16,23	-263 %
		$v = (I_C - I_D) / I_C \cdot 100 \%$	9,00 %	-295,76 %	
	Ручной режим, близкий к резонансу по максимуму $3U_0$, положение 2 ДГР	$I_{ост.}$	4,09	1,30	
			индуктивный	индуктивный	
		$I_{ДГР}$ при ОЗЗ	20,00	16,89	-0,48 А
		$I_{с\ ёмк.}$	15,75	-16,23	2,97 %
		$v = (I_C - I_D) / I_C \cdot 100 \%$	25,94 %	-8,02 %	
Комбинированная нейтраль	Автоматический режим, положение 3 ДГР	$I_{ост.}$	6,30	8,79	
			индуктивный	индуктивный	
		$I_{ДГР}$ при ОЗЗ	23,76	24,87	2,61 А
		$I_{с\ ёмк.}$	18,84	-16,23	-16,07 %
		$v = (I_C - I_D) / I_C \cdot 100 \%$	33,44 %	-54,16 %	
		перекомпенсация	перекомпенсация		

20 кГц, делители напряжения — 20 Гц – 500 кГц.

3. Важные достоинства метода с применением специального оборудования — максимальная информативность и универсальность для широкого класса сетей 6 – 35 кВ. Объектами обследования могут быть электросетевые подстанции городских и сельских районов, схемы ГРУ и системы собственных нужд электростанций, центры питания промышленных предприятий, отдельных цехов и производств.

4. Получаемые в ходе натурных измерений ёмкостного тока сведения — основа для дальнейшего проектирования, например, технического перевооружения систем заземления нейтрали. Они активно применяются в рамках прикладных исследований, включая верификацию компьютерных моделей для изучения электромагнитных процессов, расчёты релейной защиты и дуговых перенапряжений. Важным аспектом выполнения полноценных испытаний с созданием искусственного ОЗЗ является возможность полного выполнения предписаний Ростехнадзора по соблюдению норм ПТЭ электрических станций и сетей РФ, п. 621.

5. Комплексные измерения токов ОЗЗ, токов ДГР, фазных напряжений и напряжения на нейтрали с организацией контролируемых замыканий на землю при непосредственном участии авторов работы выполнены более чем на 100 действующих предприятиях различных отраслей промышленности

и электроэнергетики. В качестве примера представлены результаты обследования кабельной сети 6 кВ центра питания 220 кВ крупного нефтеперерабатывающего завода, где эксплуатируются нестандартные системы заземления нейтрали производства Sieyuan Electric, Китай.

6. Проверка работоспособности систем китайского производителя, включающих сухие присоединительные трансформаторы, ступенчатые ДГР, регулируемые автоматически с помощью устройств РПН, комплект специальных резисторов и контроллеры управления, выявила ряд проблем. Зарегистрированная степень расстройки компенсации при работе устройства управления реактора в автоматическом режиме в пределе достигала почти 300 %, что на два порядка превышает нормативную точность настройки в резонанс. Величина ожидаемого ёмкостного тока автоматикой определялась неверно, в разных сериях опытов ошибка составила от единиц процентов до более чем 2,5-кратной разницы с фактическим значением ёмкостного тока промышленной частоты. Для обеспечения правильной работы системы компенсации рекомендовано выполнить проверку и настройку автоматики управления в различных режимах сети 6 кВ с привлечением производителя оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью

и с компенсацией ёмкостных токов. — М.: Энергия, 1971. — 152 с.

2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. Приказом Минэнерго России от 04.10.2022 г. № 1070. Введ. в действие с 06.03.2023 г. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212060056>.

3. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070–87). Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока в сетях 6 – 35 кВ. URL: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4294817/4294817285.htm>.

4. Патент Ru 2723898 С1 МПК G01R 27/26; H02J 3/18. Способ и устройство измерения ёмкостного тока электрической сети с плавнорегулируемым дугогасящим реактором: № 2019129907; заявл. 24.09.2019; опубл. 18.06.2020. Бюл. № 17 / А. А. Кузьмин, В. Г. Медведев, В. С. Нигметзянов, М. И. Петров, А. В. Сентябрев; заявитель и правообладатель ООО «НИР Энерго». — 10 с.

5. Переносной прибор настройки дугогасящих реакторов и контроля изоляции. «Бреслер-0107.065». URL: <https://www.bresler.ru/oborudovanie-zazemleniya-nejtrali/perenosnoj-pribor-nastrojki-dugogasyashchikh-reaktorov-i-kontrolya-izolyatsii>.

6. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300–97. СО 34.45-51.300–97. — 6-е изд. с изм. и доп. — М.: НЦ ЭНАС, 2014. — 256 с.

7. СТО 34.01-23.1-001–2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Стандарт организации ПАО «Россети». Введ. 29.05.2017 г. URL: https://old.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/34.01-23.1-001-2017.pdf.