

## Авторы:

Валов В.Н.,

к.т.н. Ширковец А.И.,

Ильиных М.В.,

ООО «Болид»,

г. Новосибирск, Россия,

Хадыев И.Г.,

АО «ОЭМК

им. А.А. Угарова»,

г. Старый Оскол, Россия,

Макарьев А.О.,

ЗФ ПАО «ГМК

«Норильский никель»,

г. Норильск, Россия.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕМ

Аннотация: в статье рассмотрены методы и средства натурального определения тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с осциллографированием сигналов, приведено нормативное обоснование измерений, проанализированы особенности их выполнения в действующих электрических сетях. Представлены реальные примеры анализа результатов и обработки осциллограмм. Рассмотрены варианты схемы подключения первичных датчиков и даны технические требования к измерительному оборудованию. Отмечено, что правильная постановка и выполнение испытаний минимизирует риск возникновения нештатных ситуаций в процессе работ, а отработанная технология измерений дает точный результат. На основании полученных при натурных измерениях данных становится возможным проверить работоспособность и настройку дугогасящего реактора (ДГР), выполнить уточненные расчеты и выбрать оборудование для заземления нейтрали обследованной электрической сети.

Ключевые слова: электрические сети 6-35 кВ, режим заземления нейтрали, определение тока замыкания на землю, «прямой» и «косвенный» методы измерения, делители напряжения, однополюсный выключатель, гармонический анализ



Валов

Владимир Николаевич

Дата рождения: 05.02.1993.

В 2010 г. окончил Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), кафедра «Электрические станции».

Инженер РЗА отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болид».

### Введение

Для определения компенсации емкостного тока, проверки ее эффективности, выбора режима заземления нейтрали и соответствующего оборудования, настройки релейной защиты (РЗ) от ОЗЗ в распределительной сети нужно знать фактическое значение емкостного тока. Это значение определяется либо расчетным путем, либо с помощью натурального измерения. Расчетный способ может иметь большие погрешности из-за недостатка или неточности исходных данных по ряду причин, например, отсутствуют сведения по сечениям и длинам некоторых кабельных и воздушных линий в сети, имеются существенные расхождения заявленных и фактических параметров линий, произошло изменение схемы электроснабжения, из-за подключения новых потребителей наблюдается прирост протяженности кабельной сети и т.д.

Расчет емкостного тока выполняется для составляющей тока промышленной частоты и не учитывает присутствующие в сети высшие гармонические составляющие, которые могут составлять значительную

долю от первой гармоники [1]. Гармоники тока и напряжения, которые следует учитывать при последующих расчетах и выборе способа заземления нейтрали, можно корректно оценить при натурных измерениях для текущего режима эксплуатации.

Согласно Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [2, п. 5.11.8] и Правилам электроустановок потребителей [3, п. 2.8.13] «измерения емкостных токов, токов дугогасящих реакторов, токов замыкания на землю и напряжений смещения нейтрали должны производиться при вводе в эксплуатацию дугогасящих реакторов и при значительных изменениях режимов работы сети, но не реже 1 раза в 6 лет». В отличие от расчета, натурное измерение ряда параметров сети позволяет получить фактическое значение емкостного тока ОЗЗ. Самые точные и полные результаты дает измерение «прямым» методом, т.е. с созданием искусственного замыкания на землю, менее информативны «косвенные» методы [4]. В зависимости от применяемой методики и аппаратуры, результаты изме-

рений могут включать данные по активной и реактивной составляющим тока замыкания на землю, токов ДГР и резисторов, высшим гармоникам тока и питающего напряжения. Осциллографирование фазных напряжений и напряжения на нейтрали позволяет оценить «реакцию» сети на возмущение и отклонения по качеству электроэнергии в части искажения симметричности и гармонического состава и сопоставить их с нормами ГОСТ 32144-2013 [5]. Разумеется, получить в кратковременных испытаниях с регистрацией фазных напряжений «недельные» значения затруднительно, но диагностировать проблему со сверхнормативными гармоническими искажениями вполне возможно.

Выбор того или иного способа измерения и методики проведения испытаний осуществляется на основании требований заказчика в части объема необходимых результатов с учетом условий безопасности и сохранения бесперебойного электропитания (последнее критично для промышленных предприятий непрерывного цикла). Сборка схемы подключения, размещение и настройка измерительной аппаратуры выполняются по наряду-допуску на работы в электроустановках в строгом соответствии с утвержденной Программой работ. При подготовке и постановке натурального эксперимента прорабатывается комплекс вопросов по анализу конфигурации сети, режимам электроустановки и схемам коммутации вводных и секционных выключателей, настройке РЗ задействованных присоединений, изменению способа заземления нейтрали трансформаторов в ходе измерений, безопасные точки подключения первичных датчиков и другие.

Наиболее сложными в организации натурных измерений являются работы, связанные с проверкой эффективности установленного оборудования для заземления нейтрали. Полнота полученных в таких измерениях данных должна быть исчерпывающей, поскольку правильный выбор, монтаж и настройка комплекса «нейтралеобразующее устройство – дугогасящий реактор/резистор – автоматика управления» в значительной мере определяют эффективность защиты всей сети от замыканий на землю, самого распространенного вида повреждений в сетях напряжением 6-35 кВ.

### Способы определения емкостного тока с натурными измерениями

Способы натурального определения емкостного тока, сформулированные в 1970-80-е гг. с учетом имеющейся на то время аппаратуры и приборов, приведены в Типовой инструкции по компенсации [4]. Однако современный уровень развития науки и техники вносит корректировки, и в настоящее время на практике применяются следующие методы определения тока ОЗЗ:

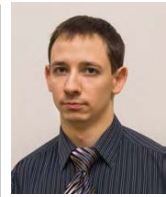
- создание искусственного «металлического» ОЗЗ;
- создание несимметрии фазных напряжений посредством подключения дополнительной проводимости (как правило, емкостной) к фазе сети;
- по «резонансной» кривой зависимости напряжения смещения от тока ДГР;
- переключением ответвлений ступенчатого ДГР;
- введение в нейтраль сети тока промышленной частоты с возбуждением колебаний контура нулевой последовательности, регистрацией частоты этих колебаний и расчета на основе снимаемых данных реальной емкости сети относительно земли.

Наиболее информативными являются способы измерения, основанные на цифровом осциллографировании сигналов, что позволяет отфильтровать шумовые компоненты, увидеть постоянные составляющие, определить значения тока и напряжения на основной частоте и оценить их гармонические искажения. Современная техника позволяет адаптировать предложенные в Типовой инструкции [4] приемы и методы определения емкостного тока для решения широкого круга задач по цифровой регистрации переходных и установившихся электромагнитных процессов [6].

### Измерительное оборудование и аппаратура

Для натурального определения параметров тока ОЗЗ и фазных напряжений (при необходимости также токов реакторов и резисторов в нейтрали сети) при проведении натурных измерений используется специальное оборудование, испытанное должным образом и удовлетворяющее следующим техническим требованиям:

- цифровые многоканальные осциллографы-регистраторы с разрешением АЦП



**Ширковец**

**Андрей Игоревич**

Дата рождения: 06.09.1983.

В 2006 г. окончил факультет энергетики Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). В 2013 г. в НГТУ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и моделирование электромагнитных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях с неэффективным заземлением нейтрали».

Начальник отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болид».



**Ильиных**

**Михаил Владимирович**

Дата рождения: 01.10.1960.

В 1982 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (НЭТИ) по специальности «Электрические станции».

Ведущий научный сотрудник ООО «Болид».



**Хадыев**  
**Ирек Гайнуллинович**

Дата рождения: 20.05.1960.  
В 1982 г. окончил Челябинский политехнический институт, кафедра «Электрические станции». Начальник лаборатории высоковольтных испытаний АО «ОЭМК им. А.А. Угарова».



**Макарьев**  
**Александр Олегович**

Дата рождения: 10.12.1980.  
В 2004 г. окончил Красноярский государственный технический университет по специальности «Автоматическое управление электроэнергетическими системами». Главный специалист ЭТО, Управление главного энергетика ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

12 бит, полосой пропускания до 20 МГц, одновременным измерением от 4 до 16 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<sub>ном</sub> не более 1 %;
- опорные трансформаторы тока (ТТ) с коэффициентом трансформации 20/5-2000/5, наличием вторичной обмотки с классом точности не хуже 0,5S;
- высоковольтные косинусные конденсаторы класса 10 кВ различной емкости;
- вспомогательное оборудование: активные сопротивления – безиндуктивные мощные шунты для подключения во вторичные обмотки ТТ, измерительные коаксиальные провода, осциллографические щупы и токовые клещи и пр.

**Метод измерения с созданием искусственного замыкания на землю**

Сотрудниками ООО «Болид» разработана и апробирована методика инструментальных измерений с цифровым осциллографированием переходных процессов, созданы программы обработки сигналов и накоплен большой опыт анализа регистрируемых событий.

Для проведения измерения емкостного тока путем создания искусственного «металлического» ОЗЗ используются одна или две высоковольтные ячейки, выведенные в ремонтное положение на время подключения и, в последующем, снятия измерительных приборов и аппаратуры. В одной из яче-

ек фазная шина с помощью гибкого провода достаточного сечения через ТТ присоединяется к контуру заземления электрооборудования (рис. 1 а), в другой – делители напряжения подключаются в кабельный отсек ячейки гибкими высоковольтными проводами (рис. 1 б), обычно на шины под болт или струбцину. При необходимости регистрации тока ДТР и резистора заземления нейтрали в их цепи заземления устанавливаются дополнительные ТТ, сигналы с которых также заводятся на осциллограф. Уставки защит в ячейках с подключенным оборудованием снижаются как по времени, так и по току, что позволяет в случае возникновения двухместного замыкания на землю отключить ячейки с делителями и ТТ максимально быстро и без повреждения. Собранная схема тщательно проверяется на наличие контакта и последовательность соединения всех элементов измерительных цепей.

Последовательность коммутаций следующая. Сначала вводится в работу, с включением трехполюсного выключателя, ячейка с делителями напряжения - для контроля и регистрации фазных напряжений. Затем, по команде ответственного за измерения, производится кратковременное дистанционное включение трехполюсного выключателя ячейки с ТТ и шунтом – для регистрации тока по замыкаемой фазе, равного полному току замыкания на землю на обследуемом участке сети.

Во время проведения измерений выполняется синхронизированное цифровое осциллографирование сигналов фазных напряжений (при наличии сигнала также и напряжения на нейтрали) и тока ОЗЗ



(а)



(б)

Рис. 1. Подключение делителей напряжения (а) и однофазной закоротки (б) в кабельный отсек ячейки 10 кВ



(рис. 2 а). Дополнительно для оценки эффективности работы оборудования заземления нейтрали возможна запись осциллограмм тока ДГР и/или резистора. Недостатком данной схемы является необходимость использования двух резервных или выделенных на время испытаний рабочих, опробованных ячеек для подключения измерительного оборудования. Позднее схема измерений была модернизирована за счет применения однополюсного вакуумного выключателя (обозначен как ОВ, тип ВВО-10) с номинальным током 1000 А и возможностью отключения емкостных токов до 450 А (рис. 2 б).

В разработанном устройстве ОЗЗ размещение измерительных датчиков напряжения и тока, а также коммутационного аппарата и блока управления конструктивно выполнено на единой передвижной платформе (рис. 3). В качестве датчиков напряжения используются широкополосные емкостные делители напряжения (ДН) собственной разработки ООО «Болид», имеющие отличные от штатных трансформаторов напряжения характеристики, прежде всего в диапазоне частот регистрируемых сигналов (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики высоковольтных ДН для натуральных измерений и длительной регистрации фазных напряжений

Параметр	Значение	
Номинальное/наибольшее рабочее напряжение, кВ	10/12	35/40,5
Номинальный диапазон рабочих частот, кГц	0,02...500	
Коэффициент деления по напряжению в номинальном диапазоне рабочих частот	4 250 или 5 000	10 000
Тангенс угла диэлектрических потерь, при 25°С	≤ 0,002	
Погрешность коэффициента деления на частоте 50 Гц в диапазоне (0,1 – 2,0)Uном, не более	1,0%	1,5%
Одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты, кВ	42	93,5
Тип выходных разъемов	CP-50 (BNC)	
Климатическое исполнение, категория размещения по ГОСТ 15150	УХЛ 3.1	
Интервал рабочих температур, °С	–25...+40	

Замыкание на землю в схеме с использованием одной ячейки КРУ (рис. 2б) создается путем включения однополюсного вакуумного выключателя на 0,5-1,0 с дистанционно с пульта управления. При этом измерения проходят в максимально щадящем режиме, при ко-

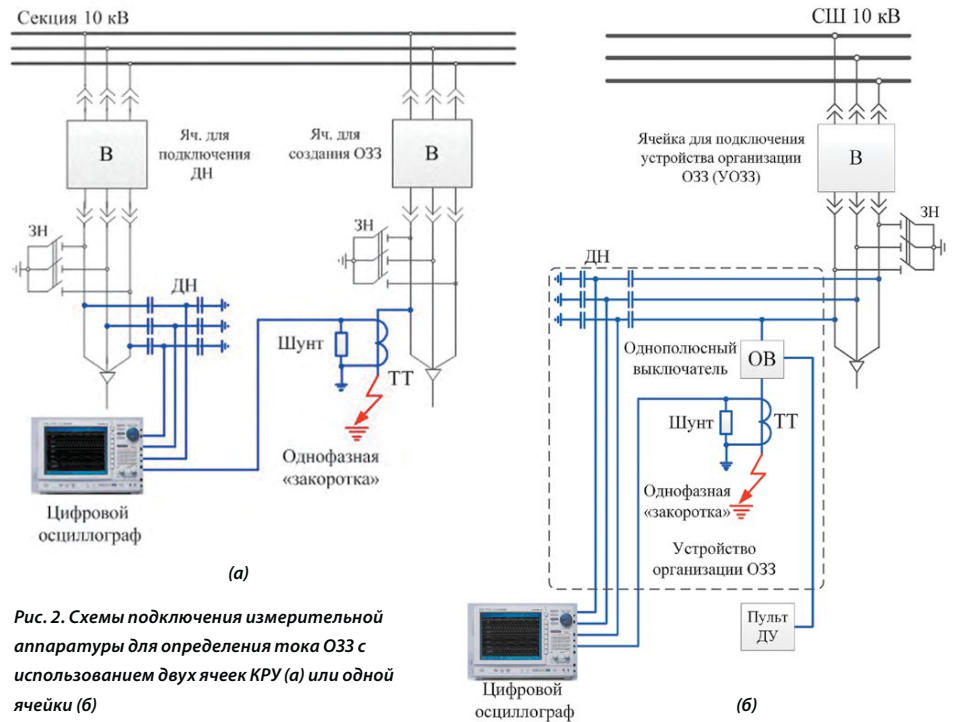


Рис. 2. Схемы подключения измерительной аппаратуры для определения тока ОЗЗ с использованием двух ячеек КРУ (а) или одной ячейки (б)



Рис. 3. Устройство измерения параметров ОЗЗ.

Состав устройства измерения:

1. Блок управления ВВО.
2. Однополюсный вакуумный выключатель ВВО-10-20/1000.
3. Широкополосные делители напряжения.
4. Трансформатор тока.
5. Активный шунт.
6. Резервный источник питания блока управления (аккумулятор).
7. Кабель к выносному пульта управления ВВО.

тором опасные перенапряжения отсутствуют: на доли и единицы секунд две «здоровые» фазы оказываются под линейным напряжением. Поэтому опасность такого метода сильно преувеличена и не соответствует действительности.

С одной стороны, вероятность возникновения второй «земли» при натуральных испытаниях не равна нулю ввиду повышения напряжения на 73 % на двух фазах и непрогнозируемого состояния изоляции в разных точках сети (может найтись «слабое место»), с другой – перед измерениями выполняется перенастройка уставок защит на задействованных в измерительной схеме ячейках таким образом, чтобы при нештатной ситуации (той самой «второй земле») присоединение с измерительным оборудованием отключилось первым и без выдержки времени. Таким образом минимизируется риск развития повреждения. Если «вторая земля» не самоустранилась, поиск и локализация поврежденного участка сети выполняется персоналом по инструкции – спокойно, четко, известными методами. С измерительной схемы к этому времени напряжение полностью снято и безопасность людей обеспечена.

Между тем, в эксплуатационной практике режим удержания ОЗЗ, строго говоря, не считается аварийным и не требует в большинстве случаев быстрого отключения потребителей. В ПТЭ электроустановок потребителей [6, п.2.8.11] указано: «В сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения». Исключением являются сети шахт, карьеров, горных разработок «с повышенными требованиями по условиям электробезопасности людей». Более того, возникающие в нормальных эксплуатационных режимах сети замыкания на землю (являющиеся следствием деградации изоляции, механического воздействия, ошибок монтажа и пр.) гораздо более опасны и несут риск отказа оборудования по следующим причинам. Длительность «естественного» ОЗЗ ограничена только временем оперативных переключений для поиска и отключения линии с однофазным повреждением. При этом не исключается воздействие перенапряжений на всю сеть из-за дугового характера замыкания, возможны повторные пробои на других фазах, вызывающие работу токовой отсечки и максимальной токовой защиты, веерные отключения потребителей.

Указанные негативные эффекты исключены при правильной подготовке и выполнении натурального измерения «прямым» методом опытными, квалифицированными специалистами подрядчика, когда обеспечены все требования согласованной Программы испытаний (описан порядок, объем и последовательность выполнения всех операций и переключений) и налажено четкое взаимодействие с эксплуатирующим персоналом предприятия-заказчика.

### Анализ результатов измерения тока ОЗЗ «прямым» методом

После получения натуральных осциллограмм производится их математическая обработка в программном комплексе MATLAB для определения переходных и установившихся значений фиксируемых параметров, определяются гармонические искажения токов и напряжений, уровень перенапряжений при ОЗЗ, время выхода на режим компенсации при наличии в сети ДГР и т.д. Применяемые алгоритмы обработки сигналов позволяют выделить активную и реактивную составляющие тока ОЗЗ и тока ДГР, точно оценить расстройку компенсации.

Осциллограммы тока ОЗЗ, ДГР и фазных напряжений, напряжения на нейтрали обмоток 10 кВ нейтралеобразующего трансформатора в действующей электрической сети 10 кВ приведены на рис. 4.

Изменение фазных напряжений после отключения ОЗЗ (рис. 4) свидетельствует о значительной расстройке компенсации, поскольку процесс восстановления напряжений к фазным значениям носит характер «биений» с перенапряжениями, в том числе и на поврежденной фазе, порядка 1,6 о.е. Повторный пробой при таком значении напряжения приводит к возникновению значительных перенапряжений, представляющих опасность для изоляции электрооборудования.

Гармоническое искажение, т.е. суммарное действующее значение гармоник со 2-й по 40-ю, в токе ОЗЗ для рассматриваемой сети 10 кВ составляет 1,99 А при введенной компенсации, в то время как полный емкостный ток промышленной частоты, измеренный в сети с изолированной нейтралью, равен 17,96 А (рис. 5). Таким образом, даже в случае хорошей компенсации ДГР составляющей 50 Гц емкостного тока ОЗЗ, в месте замыкания будет протекать ток высших гармоник (в рассматриваемой схеме 11% от емкостного тока) и ток активной проводимости изоляции (в пределах 2-3 %).

В табл. 2 приведены действующие значения токов замыкания на землю, остаточных токов в месте повреж-

Таблица 2. Измеренные значения полного тока ОЗЗ, остаточного тока ОЗЗ, тока ДГР частоты 50 Гц и степень расстройки компенсации ДГР в сети 10 кВ

Режим нейтрали	Параметр	Измеренный ток ОЗЗ и ДГР на момент эксперимента, А			Реальная раскомпенсация, $(I_C - I_L) / I_C$ %
		Полный	Активный	Реактивный	
Изолированная нейтраль	$I_{OЗЗ}$	17,96	0,21	-17,96 емкостный	-
Нейтраль заземлена через ДГР	$I_{OЗЗ \text{ ост.}}$	3,73	0,64	-3,68 емкостный	20,42% недокомпенсация
	$I_{DГР1}$	14,50	0,73	14,48 индуктивный	
	$I_{OЗЗ \text{ емк.}}$	$= I_{OЗЗ \text{ ост.}} - I_{DГР}$		-18,16 емкостный	



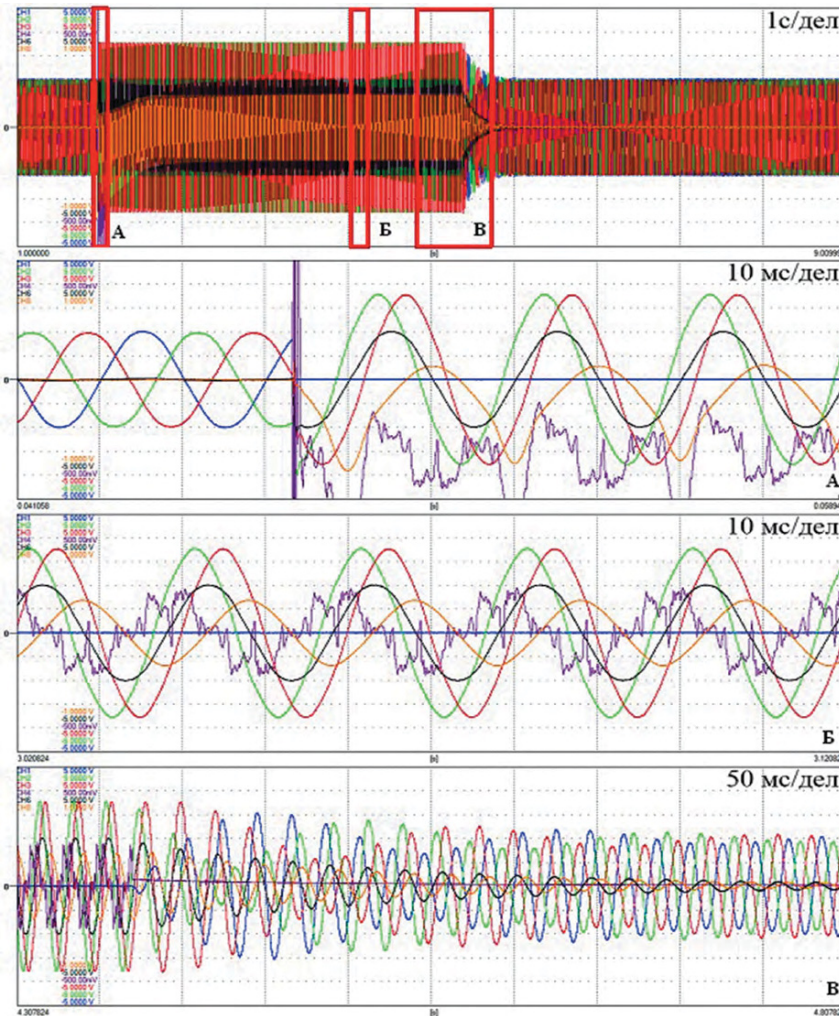


Рис. 4. Осциллограммы фазных напряжений ( $U_A$  – синий,  $U_B$  – зеленый,  $U_C$  – красный), напряжения на нейтрали ( $U_N$  – черный), остаточного тока замыкания на землю ( $I_{033}$  – сиреневый) и тока ДГР ( $I_{ДГР}$  – оранжевый) в сети 10 кВ с компенсацией. Масштабы по оси ординат: для напряжений – 4250 В/дел, для  $I_{033}$  – 4,13 А/дел, для  $I_{ДГР}$  – 15,38 А/дел

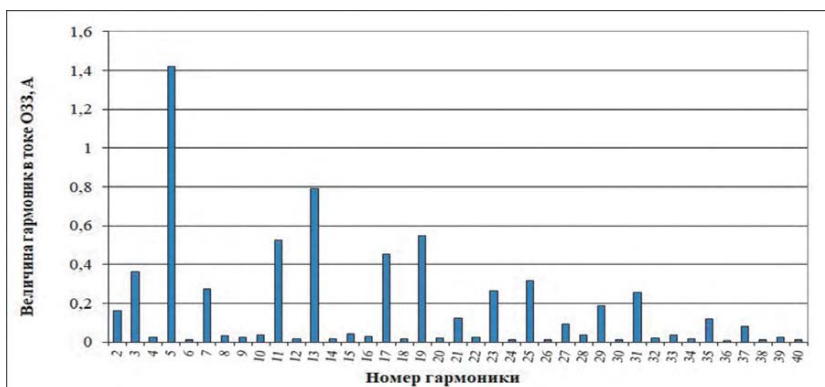


Рис. 5. Действующие значения гармоник остаточного тока ОЗЗ со 2-й по 40-ю для сети 10 кВ при включенном ДГР ( $I_{\text{действ.2-40}} = 1,99$  А), первая гармоника составляет 3,73 А

дения и токов ДГР частоты 50 Гц, их активная и реактивная составляющие, полученные по результатам гармонического анализа экспериментальных осциллограмм в рассматриваемой сети 10 кВ.

Результаты измерений показали, что в данном случае не обеспечивается необходимая требуемая резонансная настройка ДГР, фактическая степень расстройки компенсации в 4 раза превышает нормированное значение 5 % [2, п. 5.11.10]. В обследованной сети необходимо проверить автоматику управления ДГР и выполнить наладку компенсации емкостного тока.

Многолетний опыт выполнения авторами натуральных экспериментов с осциллографированием позволил сформулировать перечень решаемых с помощью измерения тока ОЗЗ «прямым» методом задач. Такие измерения могут рассматриваться как часть предпроектного обследования сети и дают возможность:

1. Надежно и точно определить текущее значение активной и реактивной составляющих тока однофазного замыкания на промышленной частоте.
2. Выполнить гармонический анализ сигналов тока и напряжения, выявить искажающие сигнал высшие гармоники, наметить меры их подавления.
3. Определить необходимость компенсации емкостного тока согласно требованиям нормативных документов [2, 3] и разработать наилучшие технические решения по заземлению нейтрали.
4. Оценить «реакцию» сети на ОЗЗ по результатам записи фазных напряжений до, во время и после искусственного замыкания (выявить биения напряжений, феррорезонансные процессы).
5. Оценить работоспособность и эффективность работы оборудования в нейтрали, в том числе систем компенсации емкостного тока с различными принципами регулирования индуктивности.

В рамках изучения эффективности оборудования для заземления нейтрали на ряде предприятий выполнены искусственные дуговые ОЗЗ с помощью вращающегося искрового промежутка, сконструированного ООО «Болид»

(рис. 6). Схема измерений предусматривает, помимо регистрации напряжений в нескольких точках сети, осциллографирование сигналов тока заземляющей дуги, тока через каждый ДГР или резистор. По результатам измерений выполняется детальный анализ параметров зафиксированного переходного процесса, в том числе амплитуды и уровней перенапряжений, количества и временных параметров циклов зажигания-гашения дуги [7].

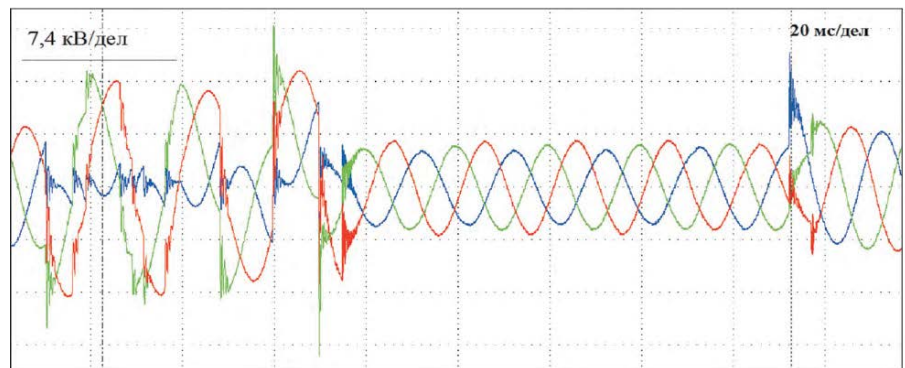
Испытания с созданием перемежающейся дуги, очевидно, являются более опасными за счет генерации и воздействия на изоляцию сети импульсных перенапряжений. Однако при регулярных высоковольтных испытаниях эксплуатируемого оборудования согласно требованиям нормативных документов [9] такие воздействия, как правило, не оказывают разрушающего влияния на изоляцию.

На рис. 7 приведены натурные осциллограммы дугового замыкания, реализованного с помощью вращающегося искрового промежутка. Очевидно, что в сети с изолированной нейтралью в данном случае дуга имеет неустойчивый характер и по сути является перемежающейся (наибольший уровень перенапряжений  $2,8U_{фmax}$ ). При включении резисторов с относительно небольшим эквивалентным сопротивлением (250 Ом) происходит перевод заземляющей дуги к устойчивому горению с ограниченными перенапряжениями (импульс при первом пробое  $2,3U_{фmax}$ ). В сети с резистивно заземленной нейтралью в установившемся режиме ОЗЗ на незамкнутых фазах фактически наблюдаются перенапряжения значением  $1,73U_{фmax}$ , т. е. линейные напряжения.

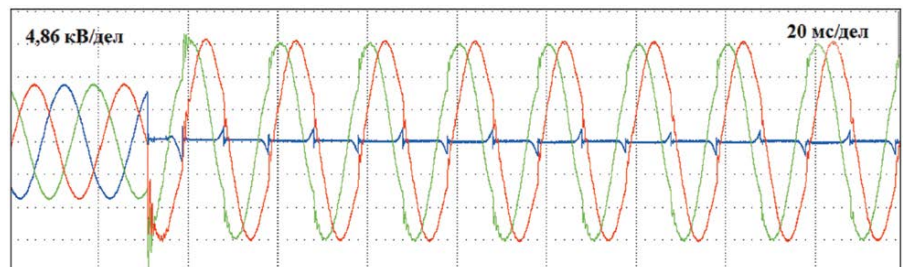
Организация искусственных дуговых замыканий востребована и выполняется, помимо сетей с резистивным заземлением, в рамках сетевых испытаний ДГР различно-



Рис. 6. Внешний вид подключения на фазу нейтраллера (а) искрового промежутка с шаровыми электродами и ТТ (б)



а)



б)

Рис. 7. Натурные осциллограммы фазных напряжений ( $U_A$  – синий,  $U_B$  – зеленый,  $U_C$  – красный) в опытах искусственного дугового ОЗЗ в сети 10 кВ с изолированной (а) и заземленной через резистор (б) нейтралью



го типа (плунжерных, статических, с подмагничиванием) с разными устройствами автоматического управления, для оценки точности настройки компенсации, бросков остаточного тока, длительности горения дуги в каждом пробое и бестоковых пауз, уровней возникающих перенапряжений. Комплексное обследование сети с созданием искусственных «металлических» и дуговых замыканий дает наиболее полное представление о надежности и эффективности оборудования, установленного в нейтрали.

### Метод определения тока ОЗЗ созданием несимметрии фазных напряжений

Целесообразность выбора и согласования того или иного метода определения тока замыкания на землю без создания искусственного ОЗЗ определяется главным образом количеством и качеством измерений, на основании которых по формулам рассчитывается емкостный ток ОЗЗ сети. Использование «косвенных» методов определения тока ОЗЗ по умолчанию сопряжено с неточностью (ошибкой) получения значения емкостного тока. Однако методика осциллографирования и алгоритмы математической обработки зарегистрированных сигналов в применяемом методе создания искусственной несимметрии позволяют свести эту ошибку к минимуму. Сравнительные испытания, выполненные «прямым» и «косвенным» методами в действующей сети 10 кВ крупного металлургического комбината, показали достаточную точность каждого метода и высокую сходимость результатов: значения емкостных токов, полученные для одной и той же конфигурации и схемы сети разными методами, после экспресс-обработки натуральных осциллограмм совпали с точностью до десятой доли ампер.

Суть применяемого «косвенного» метода заключается в создании искусственной несимметрии в сети 6-10 кВ за счет подключения дополнительной емкости к одной из фаз сети и осциллографической регистрации фазных напряжений и тока через дополнительную емкость. Величина дополнительно подключаемой емкости должна находиться в диапазоне 10-15 % от суммарной емкости сети на «землю», выбор фазы для ее подключения выполняется произвольно. Исследования показали, что необходимость поочередного подключения емкости к каждой фазе в симметричной кабельной сети отсутствует. Отметим, что типовая инструкция по компенсации [4] предусматривала измерения по каждой фазе с алгебраическим усреднением результата пересчета для снижения инструментальной ошибки.

В качестве дополнительной емкости используются высоковольтные косинусные конденсаторы. С одной стороны, конденсаторная сборка кратковременно (на 3...5 с) подключается к одной из фаз сети посредством включения однополюсного вакуумного выключателя, с другой – она жестко присоединена к контуру заземле-

ния через ТТ. Производятся измерения с осциллографической записью фазных и линейных напряжений, а также эквивалентного тока через конденсаторы. Внешний вид измерительной установки, собранной и используемой ООО «Болид» при натурном определении емкостного тока «косвенным» методом, приведен на рис. 8. Уровень смещения нейтрали и ток через конденсаторную сборку регулируется количеством и схемой соединения высоковольтных конденсаторов.

Емкостный ток сети  $I_C$ , А определяется по формуле:

$$I_C = U_\phi \cdot \omega \cdot C_{\text{доп}} \cdot \left( \frac{1}{\left( \frac{U_{1\phi} \cdot \sqrt{3}}{U_{1л}} \right) - \left( \frac{U_{2\phi} \cdot \sqrt{3}}{U_{2л}} \right)} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $U_{1\phi}$  и  $U_{2\phi}$  – напряжения какой-либо фазы относительно «земли» до и после подключения к ней дополнительной емкости, измеренные с помощью делителей напряжения, В;

$U_{1л}$  и  $U_{2л}$  – линейные напряжения сети до и после подключения дополнительной емкости, В;

$C_{\text{доп}}$  – дополнительная емкость, мкФ;

При измерении тока через дополнительную емкость значение емкостного тока ОЗЗ может быть определено согласно следующему выражению:

$$I_C = I_{C \text{ доп}} \cdot \left( \frac{1}{\left( \frac{U_{1\phi} \cdot \sqrt{3}}{U_{1л}} \right) - \left( \frac{U_{2\phi} \cdot \sqrt{3}}{U_{2л}} \right)} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

В рамках испытаний предусматривается осциллографирование токов через емкость и фазных напряжений при изолированной нейтрали сети: если нормаль-



Рис. 8. Подключение к установке с однополюсным вакуумным выключателем высоковольтных конденсаторов для реализации «косвенного» метода определения тока ОЗЗ



но в нейтрали включены ДГР, на время измерений они должны быть выведены из работы. Как и при измерениях «прямым» методом, в обязательном порядке контролируются фазные напряжения и отслеживается синхронизация по  $3U_0$ .

Результаты измерения тока через конденсаторы, фазных и пересчитанных из них линейных напряжений с расчетом полного емкостного тока ОЗЗ промышленной частоты приведены на рис. 9 и в табл. 3. Емкостный ток на разных секциях обследованной сети отличается примерно в 2 раза, поэтому требовалась разная емкость конденсаторов для достижения необходимой несимметрии. Регистрируемый ток через конденса-

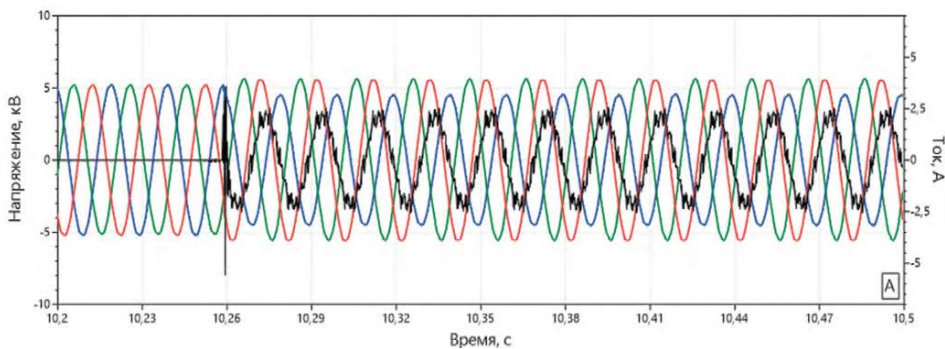
ры перенасыщен высшими гармониками, что видно из приведенных осциллограмм. Дополнительные исследования выявили, что эти гармоники точно совпадают по фазе для одинаковых частот (рассматривались кратные 50 Гц гармоники, начиная со 2-ой), но отличаются по амплитуде – в сравнении с соответствующими гармониками в токе «металлического» ОЗЗ для той же сети в аналогичном режиме эксплуатации.

Недостатком «косвенного» метода с созданием несимметрии напряжений является сложность прогнозной оценки ожидаемого емкостного тока обследуемой сети на момент измерений, что связано с изменением конфигурации схемы за счет отключения или перевода части потребителей со своей сетью на другие секции, создания ремонтного режима.

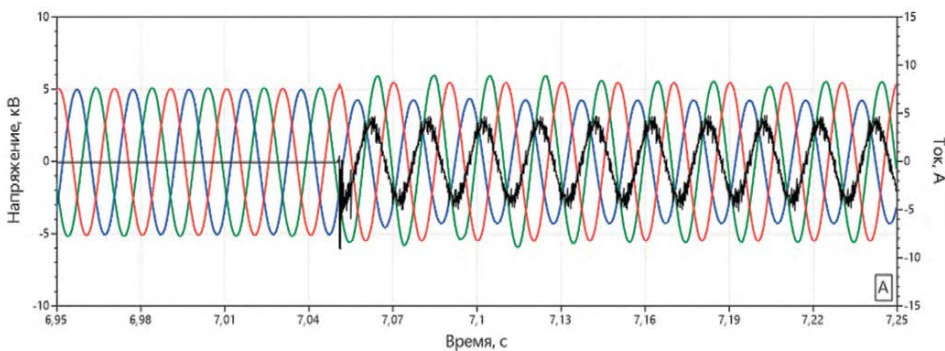
Поэтому для получения необходимого результата может потребоваться несколько циклов измерения, с поэтапной корректировкой эквивалентной емкости подключенных конденсаторов. При этом для обеспечения безопасного производства работ в каждом цикле изменения подключенной емкости требуется вывод в ремонт задействованной в испытаниях ячейки КРУ. В ряде случаев это приводит к увеличению длительности измерений по сравнению с методом создания искусственного ОЗЗ. Использование методики «косвенного» определения тока ОЗЗ с помощью дополнительной емкости позволяет определить только основную составляющую тока ОЗЗ (частоты 50 Гц) и не дает возможности непосредственной проверки точности настройки ДГР в резонанс.

Таблица 3. Результаты обработки осциллограмм при измерении тока ОЗЗ «косвенным» методом создания несимметрии фазных напряжений в сети 6 кВ промышленного предприятия

Номинальное напряжение сети, кВ	Секция шин	$U_{1ФФ}$ , В	$U_{1ЛР}$ , В	$U_{2ФФ}$ , В	$U_{2ЛР}$ , В	$I_{Cдоп}$ , А	$I_{C}$ , А
6	1СШ	3579,8	6402,5	3056,5	6399,6	2,80	19,80
	2СШ	3683,8	6355,8	3187,9	6353,1	1,50	11,16



а)



б)

Рис. 9. Натурные осциллограммы фазных напряжений ( $U_A$  – синий,  $U_B$  – зеленый,  $U_C$  – красный) и тока через конденсатор ( $I_{C доп}$  – черный) при измерении тока ОЗЗ методом создания несимметрии фазных напряжений на 1СШ (а) и 2СШ (б) действующей электрической сети 6 кВ промышленного предприятия

### Выводы

1. Необходимость периодического определения емкостного тока для сетей напряжением 6-35 кВ закреплена в отраслевых нормативных документах и служит главным образом для оценки необходимости компенсации емкостного тока, а шире – для проверки оборудования заземления нейтрали.

2. Наиболее простым способом определения емкостного тока замыкания на землю является расчет по удельным параметрам оборудования. Область применения этого

способа ограничена объектами, по которым есть относительно полная информация с указанием типов и характеристик основного высоковольтного оборудования. При отсутствии такой информации точно рассчитать емкостной ток ОЗЗ не представляется возможным.

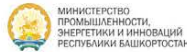
3. Максимальный объем получаемой информации дает метод «прямого» измерения тока ОЗЗ путем создания искусственного ОЗЗ, который также позволяет выполнить проверку работоспособности и эффективности установленного оборудования для заземления нейтрали в конкретной сети. При правильной постановке испытаний этот метод позволяет быстро и безопасно получить фактические значения тока ОЗЗ и его гармонического искажения для разных режимов и конфигураций сети. Если использование «прямого» метода по каким-либо причинам затруднено, рекомендуется использовать «косвенный» метод создания несимметрии фазных напряжений с осциллографической регистрацией сигналов. Оба метода в современной постановке предъявляют серьезные требования к частотным характеристикам датчиков тока и напряжения, частоте дискретизации осциллографов и алгоритмам математической обработки зарегистрированных сигналов.

4. Обследование сети и определение емкостного тока с помощью натурального эксперимента с осциллографированием являются важным элементом предпроектного обследования. Результаты измерений используются для дальнейшего расчета и выбора технических решений по заземлению нейтрали и эффективной защите от перенапряжений.

#### Литература:

1. Шуин В.А. Оценка минимального уровня высших гармоник в токе замыкания на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ / Шуин В.А., Винокурова Т.Ю., Шагурина Е.С. // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России : сб. тез. II Международной научн.-практ. конф. и выст. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2013. – С. 105–106.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации СО 153-34.20.501-2003, утв. Приказом Минэнерго России от 19.06.2003
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей, утв. Приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 №6.
4. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87). Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ.
5. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. Майоров А.В., Челазнов А.А., Ильных М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник ИГЭУ. – Вып. 6. – 2015. – С. 23–29.
7. Дмитриев И.Н. Ограничение перенапряжений в электрической сети 10 кВ. // Энергетик. – №10. – 2011. – С. 17–19.
8. СТО 34.01-23.1-001-2017 Объем и нормы испытаний электрооборудования.

Организаторы



Официальная поддержка



Содействие



27-29 октября ВДНХЭКСПО Уфа 2021

# Российский энергетический форум

## Энергетика Урала XXVII специализированная выставка

Instagram ref\_ufa, energyexpo Facebook energobvk #рэфуфа #энергетикаурала



По вопросам выставки

Бронь стенда [www.energobvk.ru](http://www.energobvk.ru)  
+7 (347) 246-41-93  
[energo@bvkeexpo.ru](mailto:energo@bvkeexpo.ru)

По вопросам форума

Регистрация на форум [www.refbvk.ru](http://www.refbvk.ru)  
+7 (347) 246-42-81  
[kongress@bvkeexpo.ru](mailto:kongress@bvkeexpo.ru)

Технический  
поддержка  
 Медиа02