

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-35 кВ

*Ширковец А.И., Ильиных М.В. (ООО «ПНП Болид», г. Новосибирск)*

## ***Постановка задачи***

Оценка емкостного тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с целью определения необходимости введения компенсации и установки дугогасящих реакторов (ДГР) может быть произведена расчетным путем либо одним из предлагаемых экспериментальных методов [1, 2]. Определение емкостного тока ОЗЗ с помощью расчета (например, на основании удельных емкостных параметров оборудования) – удобный и не требующий особых затрат способ, но он применим в тех сетях, где есть полная информация по типам оборудования – в частности, на вновь проектируемых объектах. По прошествии многих лет эксплуатации сети точно определить емкостной ток ОЗЗ расчетным путем представляется затруднительным. Тем более сегодня, в условиях интенсивной замены оборудования, перехода к новым типам кабелей (с изоляцией из сшитого полиэтилена) когда изменение конфигурации электрически единой сети 6-35 кВ учитывать достаточно сложно. Например: снабжающая организация – ТЭЦ – предоставляет данные по отходящим линиям и "своей" части сети, но этих данных недостаточно: рост и развитие сетей потребителей эксплуатационным персоналом станции не контролируется.

Даже несмотря на наличие в электроцехах электростанций и цехах электроснабжения предприятий инструкций, регламентирующих вопросы настройки и регулирования установленных ДГР, задача определения *фактического значения емкостного тока ОЗЗ* в сетях 6-35 кВ актуальна и требует четкого решения.

Экспериментальные замеры емкостного тока ОЗЗ позволяют точно определить его значение и вынести соответствующие рекомендации по настройке существующих ДГР и установке новых. Помимо этого величины измеренного тока ОЗЗ могут использоваться для определения перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ) и разработки мер их ограничения.

## ***Комплексный подход к записи переходных процессов при ОЗЗ***

К настоящему времени проработаны и используются несколько методов экспериментального определения емкостного тока замыкания на землю [2, 3]. Наиболее просто реализовать "косвенные" методы, не связанные с включением дополнительных емкостей в фазу сети. Расчет емкостного тока производится по "резонансным" кривым, т.е. графикам изменения напряжения смещения нейтрали в зависимости от индуктивного тока ДГР. "Прямой" метод – замер емкостного тока путем искусственного "металлического" замыкания фазы на землю, является более точным.

Развитие цифровой техники обуславливает целесообразность применения предложенных методик с использованием современных приборов регистрации, включая многоканальные осциллографы с высокими частотами дискретизации (50 кГц и выше).

Метод определения емкостного тока ОЗЗ посредством искусственного "металлического" замыкания фазы сети на землю является прямым и позволяет наиболее точно измерить величину тока ОЗЗ для текущей конфигурации схемы. При низком уровне изоляции, как и в случае реального ОЗЗ, может произойти развитие однофазного замыкания на землю с его переходом в двухместное или короткое замыкание. Но для изоляции

оборудования, испытанного в соответствии с нормативными требованиями (РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытаний электрооборудования") как показывает опыт многочисленных подобных экспериментов, данный вид воздействий не представляет опасности.

Согласно [2] на период проведения опытов искусственного "металлического" замыкания на землю уставки по времени защит фидеров, используемых для создания ОЗЗ и подключения делителей напряжения, нужно выставлять минимальными. Это делается с целью быстрого отключения искусственного ОЗЗ при возникновении замыкания на землю во втором месте, т.е. ликвидации возможного двухместного ОЗЗ.

Предлагаемый комплексный подход в части применения методики замера емкостного тока ОЗЗ "напрямую", т.е. с созданием искусственного ОЗЗ, заключается в следующем:

- ❖ осциллографируются сигналы фазных напряжений и тока ОЗЗ, что позволяет после конвертации проводить их дальнейшую математическую обработку во внешних программных пакетах;
- ❖ определяется величина емкостного тока основной частоты и его гармонических составляющих для известной конфигурации сети;
- ❖ анализируется характер изменения фазных напряжений в нормальном режиме и переходных процессах возникновения и отключения замыкания на землю, фактически это позволяет оценить "реакцию" сети на ОЗЗ.

### ***Осциллографирование процессов при искусственном «металлическом» ОЗЗ***

Современный уровень развития средств вычислительной и измерительной техники позволяет построить систему регистрации процессов при однофазном замыкании на землю, включая запись сигналов фазных напряжений и тока ОЗЗ (с различными коэффициентами усиления), на основе аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и компьютера. Эта система включает следующий комплекс аппаратуры:

- ❖ датчики напряжения и тока;
- ❖ кабели связи (передачи информации);
- ❖ платы АЦП или цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО);
- ❖ персональный компьютер с программным обеспечением, позволяющим осуществлять обработку и анализ параметров записанных процессов ("виртуальная лаборатория").

В специально подготовленной для организации искусственного "металлического" ОЗЗ ячейке на каждой из секций обследуемой сети одна из фаз через *датчик тока* соединяется с заземляющим устройством закороткой, рассчитанной на ток трехфазного КЗ.

В качестве датчика тока может быть использован трансформатор тока (ТТ) либо датчик Холла. Датчик тока должен иметь линейную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), чтобы обеспечить требуемый частотный диапазон для записи сигнала. По некоторым оценкам [1], частота переходного процесса до достижения установившегося значения тока ОЗЗ достигает 250-1000 Гц в сетях воздушными линиями и 1500-3000 Гц – в сетях с кабельными линиями.

Токовые датчики Холла по сравнению с трансформаторами тока обладают лучшими характеристиками: они обеспечивают линейную зависимость коэффициента преобразования от частоты в диапазоне 0...150 кГц [3]. Их влияние на сигнал на низких частотах (единицы и десятки Гц) компенсируется дополнительными трансформаторными витками. Токовые датчики на основе эффекта Холла рекомендуются использовать в области значений, близких к максимальным, т.к. это уменьшает влияние шумов.

Существующие стандартные ТТ по своим частотным характеристикам пригодны для записи сигналов тока с высокочастотными составляющими с верхней границей 5 кГц и могут применяться наряду с токовыми датчиками Холла. Последним требуется отдельный

источник питания, что не всегда удобно. Напряжение питания типичных линейных датчиков Холла с аналоговым выходом составляет 6...12 В, с цифровым – до 30 В. Как правило, 1 минутное испытательное напряжение частоты 50 Гц для датчиков Холла не превышает 6 кВ. С другой стороны, при замерах потенциал на заземленном корпусе датчика тока близок к нулю.

Класс точности используемого трансформатора тока должен быть не ниже 1,0, а его номинальное напряжение может быть любым [2]. Удобно использовать ТТ с первичным током, близким к максимальному ожидаемому току ОЗЗ.

От выводов вторичной обмотки ТТ, зашунтированной сопротивлением 0,1-1,0 Ом, с помощью измерительного кабеля сигнал подается на один из входов цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) или регистратора на основе плат АЦП для записи тока ОЗЗ. Максимально допустимый уровень искажений, вносимый кабелями связи, не должен превышать 0,5%.

При замерах в сетях с компенсацией емкостного тока с целью получения максимально достоверной информации и анализа состояния устройств компенсации рекомендуется контролировать действительный ток через ДГР при ОЗЗ: современная практика проектирования предусматривает установку трансформаторов тока в цепи нейтрали. При отсутствии такой возможности лучше ориентироваться на *результаты замеров индуктивного тока* катушки в разных положениях "анцапфы".

Применение трансформаторов напряжения (ТН) для получения сигналов фазных напряжений не всегда приемлемо. Во-первых, даже стандартизованные ТН, применяемые для учета электроэнергии на промышленной частоте, сегодня не проверяются в эксплуатации, а их частотные характеристики не нормируются. Хотя верхняя граница пропускаемых частот, при которых коэффициент трансформации еще постоянен, у трансформаторов типа НТМИ, НОМ и ЗНОМ не превышает 3...5 кГц [4], она не гарантируется производителем. С другой стороны, расчетно-экспериментальные оценки частотных характеристик защитной обмотки НОМ-6 [5] показывают, что погрешность таких ТН на частоте 2 кГц по напряжению достигает 20%, а по углу минус 30 градусов, что не соответствует требованиям точности замера ВЧ сигналов.

Во-вторых, АЧХ трансформаторов напряжения, которые могут применяться для измерения внутренних перенапряжений при однофазных "металлических" замыканиях на землю, должны быть не хуже, чем у ТН, что используются для контроля показателей качества электроэнергии [6]: неравномерность АЧХ – на уровне 2-3%; а искажения, вносимые самим трансформатором в синусоидальный сигнал – 0,02...0,03%.

Анализ экспериментальных осциллограмм, полученных с помощью цифровой аппаратуры, показывает, что верхняя граница частот переходного процесса при однофазном замыкании на землю для напряжения составляет 10...50 кГц. Поэтому регистрация фазных напряжений производится с помощью специально разработанных высоковольтных делителей напряжения (ДН).

Используемые при экспериментах в сетях 6-10 кВ ДН производства ООО "ПНП БОЛИД" отличаются высокими рабочими параметрами: номинальным диапазоном рабочих частот  $20 \div 2 \cdot 10^6$  Гц при неравномерности АЧХ  $\pm 0,5$  дБ и практически постоянным коэффициентом деления по напряжению в номинальном диапазоне рабочих частот –  $K = 74 \text{ дБ} \pm 0,5 \text{ дБ}$  ( $5100:1 \pm 0,5\%$ ). Производителем нормируются также активное сопротивление нагрузки  $\geq 1 \cdot 10^6$  Ом и емкость нагрузки  $\leq 1,5 \cdot 10^{-9}$  Ф. Минимальная наработка на отказ ДН составляет  $\tau_{\min} = 5000$  час.

К выводам низковольтного плеча каждого ДН через измерительный кабель подключаются ЦЗО. Отметим, что напряжение на выводах "разомкнутого треугольника"

одной из обмоток низкого напряжения шинного ТН можно не регистрировать, поскольку запись трех фазных напряжений через осциллограф позволяет определить величину  $3U_0$ .

Делители напряжения рекомендуется подключать к шинам секции через отдельный выключатель резервной ячейки или выключатель присоединения, которое может быть выведено из работы на время подключения ДН. При случайном повреждении ДН это гарантирует их быстрое отключение. При отсутствии возможности вынесения ДН за выключатель может использоваться ячейка с шинным трансформатором напряжения.

Предлагаемая схема замера емкостного тока ОЗЗ в сети 6-35 кВ методом искусственного "металлического" замыкания на землю, а также регистрации фазных напряжений представлена на *рис. 4* (синим цветом выделено подключаемое оборудование). Устройство запуска служит для внешней синхронизации осциллографов, т.е. обеспечивает начало записи сигналов по появлению несимметрии по напряжению 20% или выше. Задержка запуска, т.е. длительность предзаписи для анализа бросков напряжений и токов в переходном процессе, устанавливается программно в долях от общего времени записи. Объем базовой памяти ЦЗО должен обеспечивать запись переходных процессов без "мертвых зон".

Современные цифровые осциллографы, как правило, используются совместно с персональными компьютерами и позволяют наблюдать форму сигнала в режиме реального времени, используя до 10-16 независимых каналов с разрешением каждого 8-16 бит и чувствительностью (0,0001...20) В/дел в полосе частот от 0 до десятков ГГц. Аппаратный буфер таких приборов вмещает от нескольких тысяч до 50 млн. выборок для каждого канала.

Для записи переходных процессов при ОЗЗ следует применять осциллографы с частотой дискретизации не менее 50 кГц.

На основе анализа характеристик записываемых процессов могут быть сформулированы и ***минимальные аппаратные требования к ЦЗО для осциллографирования напряжений фаз и токов однофазного замыкания на землю:***

- 4 независимых канала с аналоговыми входами;
- разрядность АЦП – 12;
- возможность синхронизации по одному из каналов;
- частота дискретизации 50 кГц и выше, в зависимости от числа выборок на канал;
- длительность записи при наименьшей требуемой частоте дискретизации 50 кГц – не менее 5 с;
- диапазоны измерений  $\pm 100$  В,  $\pm 10$  В,  $\pm 1$  В,  $\pm 0,1$  В.

ЦЗО должен обеспечивать визуальное наблюдение, запоминание в цифровой форме и измерение амплитудно-временных параметров периодических и непериодических электрических сигналов, в том числе однократных импульсов. Программное обеспечение цифровых осциллографов в большинстве случаев позволяет выполнить дальнейшую обработку полученных осциллограмм токов однофазного замыкания и фазных напряжений для определения гармонического состава и амплитуд гармоник сигналов, иногда удобнее использовать внешние пакеты программ, например, MATLAB.

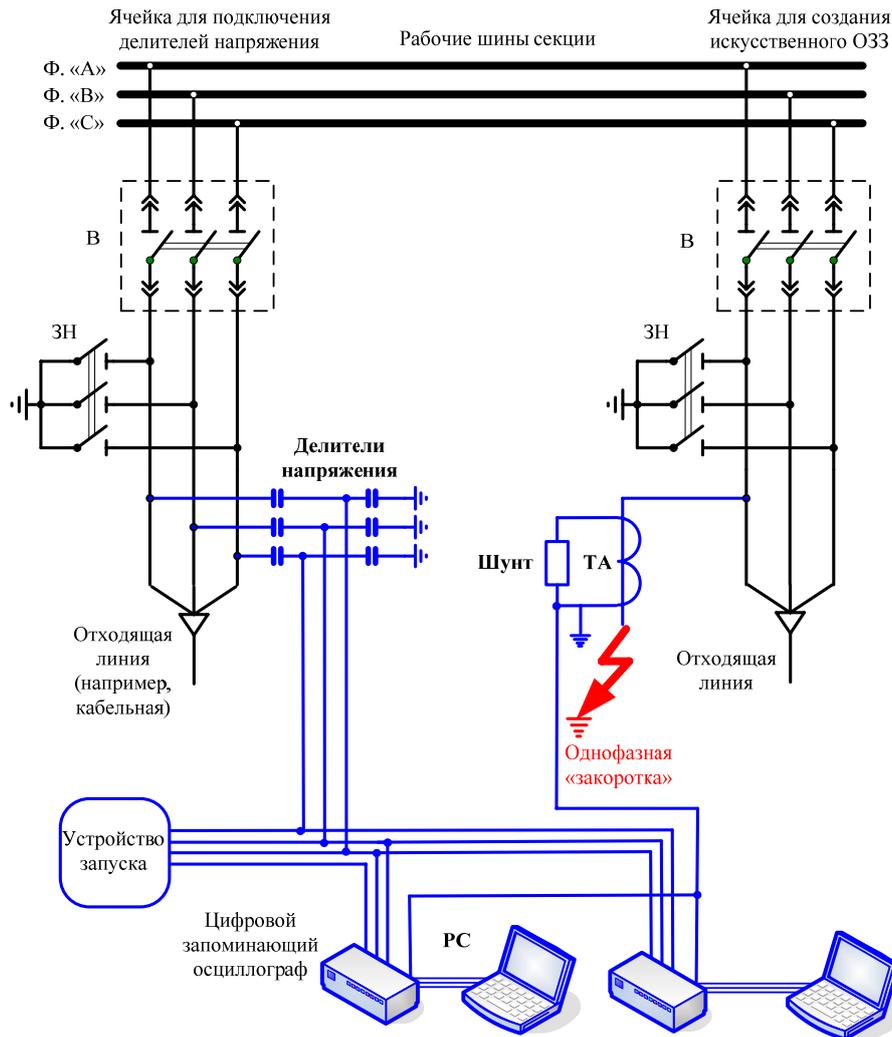


Рис. 4. Схема подключения измерительной аппаратуры при проведении инструментального замера емкостного тока ОЗЗ и регистрации переходного процесса

Дублирование измеряемых сигналов тока и напряжения используется для обеспечения надежной регистрации процессов при ограниченном количестве опытов.

Важное значение имеет электромагнитная обстановка на объекте. Причины опасных электромагнитных воздействий (наводок) на измерительные кабели и чувствительную аппаратуру, к которой относятся и цифровые осциллографы, могут быть связаны с протеканием токов по элементам металлоконструкций и заземляющих устройств при КЗ и коммутациях мощных нагрузок, при переходных процессах, зачастую сопровождающихся перенапряжениями, т.д. За счет этого полезный сигнал может быть искажен шумами. Поэтому идеальным вариантом было бы использование при экспериментах *специального контура "чистой земли"* для цифровых осциллографов, делителей напряжения и датчика тока, или так называемого "функционального заземления". Стандарт ГОСТ Р 50571.2-94 (МЭК 364-3-93) предусматривает в некоторых случаях существование на одном объекте нескольких заземляющих устройств, не соединенных друг с другом.

#### **Высшие гармоники в токе замыкания на землю**

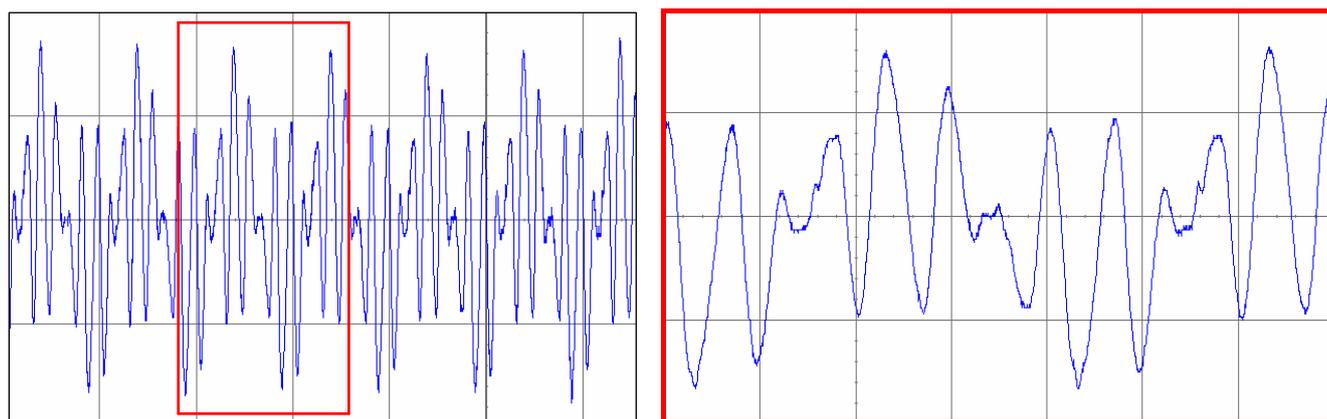
Как показывают эксперименты, проведенные на десятках объектов, где эксплуатируются сети 6-35 кВ, емкостной ток ОЗЗ всегда содержит ряд гармоник

(выраженных в записываемом сигнале) в широком частотном диапазоне – как правило, наиболее четко выраженных на частотах от 25 Гц до 3,5 кГц. Весомый вклад в результирующий сигнал вносят, как правило, нечетные гармоники с 3-й по 11-ю – доля любой из них может составлять свыше 50% от тока замыкания на землю промышленной частоты. В большинстве случаев заметными являются гармоники нечетного ряда 3, 5, 7, 11...35, 37; их величины в различных сетях составляют (0,2 – 60) %. Иногда высшие гармоники превосходят основную по величине в несколько раз, что обусловлено их резонансным ростом – такие процессы были зарегистрированы, в частности, в сетях ГРУ-6 кВ Свердловской и Ново-Кемеровской ТЭЦ. Природа высших гармоник в токе замыкания изучена не до конца [7,8]. Их источниками на крупных производствах либо в сетях ТЭЦ, питающих электрохимические и металлургические заводы, целлюлознобумажные комбинаты и т.д., могут быть частотно-регулируемые приводы, вентильные преобразователи; силовое электрооборудование с тиристорным управлением; дуговые и индукционные электропечи и др.

Высшие гармоники в токе ОЗЗ проявляются и в тех сетях, где гармонический состав напряжений фаз удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109-97, в частности, по уровню коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей. Это обусловлено формированием при замыкании на землю одного или нескольких контуров, где неизбежно соблюдаются условия резонанса на высших гармониках, присутствующих в токах и напряжениях нормального (неаварийного) режима сети.

Следовательно, для анализа гармонического состава емкостного тока ОЗЗ и возможности связанных с наличием высших гармоник резонансных процессов необходимо осциллографировать *ток однофазного замыкания на землю*.

Это было показано при замерах на нескольких десятках объектов, в том числе ТЭЦ, подстанциях, сетях электроснабжения крупных промпредприятий (металлургических, нефтехимических, целлюлозно-бумажных комбинатах, газоперерабатывающих заводов и т.д.). В качестве примера на *рис.5* приведены осциллограммы тока ОЗЗ в опыте металлического замыкания на землю сети ГРУ-6 кВ Свердловской ТЭЦ. Обе секции ГРУ работают совместно, компенсация ведется с помощью двух ДГР типа РДМР-300/6.



а)

б)

*Рис. 5. Осциллограммы тока искусственного "металлического" однофазного замыкания на землю с разверткой по току 19,7 А/дел в сети ГРУ-6 кВ Свердловской ТЭЦ: а) исходная – 20 мс/дел, б) растянутая – 5 мс/дел*

Величина остаточного тока ОЗЗ частоты 50 Гц в приведенном случае составляет всего 5,5 А при расчетном емкостном токе сети 104 А, т.е. раскомпенсация превышает регламентированную ПУЭ величину 5% всего на 0,2%. Однако анализ показал, что в токе ОЗЗ сети I и II секций ГРУ-6 кВ рассматриваемой ТЭЦ явно выражены 5, 7 и 11 гармоники,

значения которых достигают 7,7 А, 12,2 А, 3,2 А соответственно. Т.е. 7-я гармоника превышает основную в 2,2 раза (!) и не компенсируется ДГР.

При этом за счет хорошей компенсации составляющей промышленной частоты тока ОЗЗ напряжение поврежденной фазы после отключения замыкания плавно восстанавливается до номинального в течение 15-18 периодов 50 Гц (рис. 6), а наличия в его составе сколько-нибудь значительно выраженных гармоник (в режиме ОЗЗ и нормальном режиме) не зафиксировано.

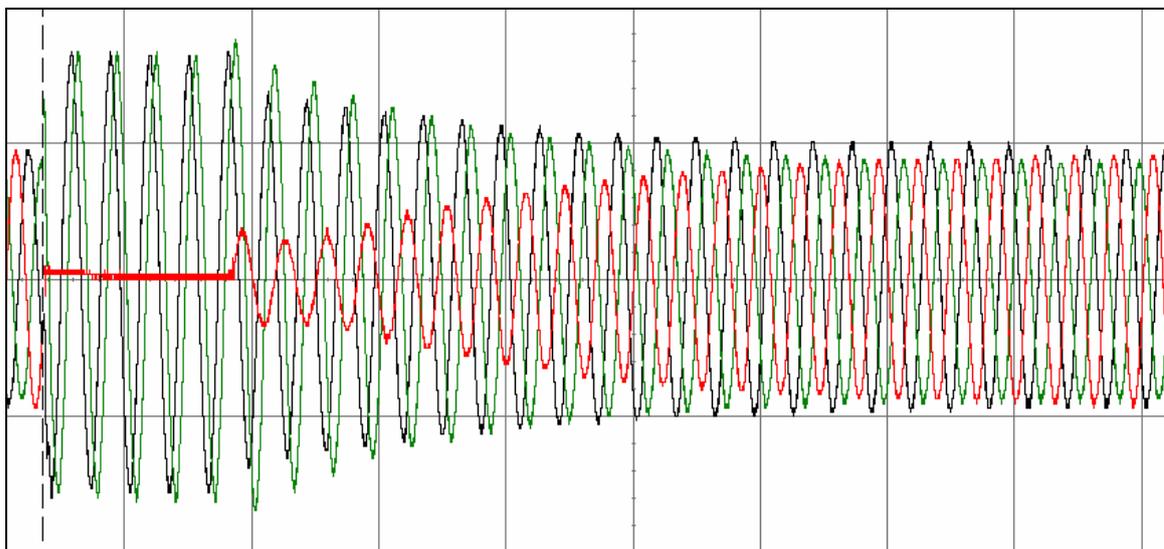


Рис. 6. Процессы в поврежденной и "здоровых" фазах при "металлическом" ОЗЗ в сети ГРУ-6 кВ Свердловской ТЭЦ с малой расстройкой ДГР (+5,2%), развертка по напряжению 5,2 кВ/дел, масштаб по оси времени – 65 мс/дел

Однако нередко случаи, когда резонансный рост отдельных гармоник наблюдается и в фазных напряжениях. С другой стороны, величина этих гармоник, как было показано в экспериментах, не превосходит в большинстве случаев 0,9-1,0 % от составляющей 50 Гц. В качестве примера приведем гистограмму гармонического состава фазных напряжений ГРУ-6 кВ Ново-Кемеровской ТЭЦ (рис. 7). Хотя доля 11 гармоника в напряжениях трех фаз сети составляет всего 0,65...0,89%, ток ОЗЗ 11-й гармоники превышает остаточный емкостный ток замыкания на землю частоты 50 Гц более чем в 2,5 раза.

Отметим, что ситуация с настройкой ДГР в приведенной сети достаточно распространенная: эксплуатация из-за влияния высших гармоник (один из потребителей – мощный химкомбинат) не в силах поддерживать резонансную настройку катушек, тем более при частых изменениях режимов нагрузки. Так, на момент замеров индуктивный ток перекомпенсации составил 27,5 А при полном емкостном токе сети 301 А.

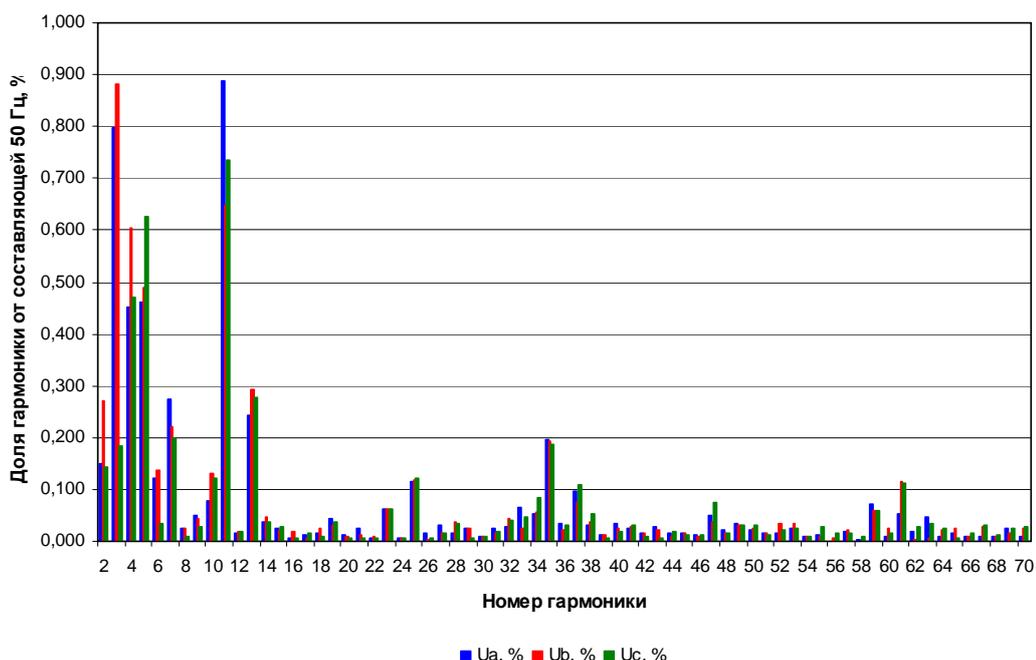


Рис. 7. Гармонический состав фазных напряжений нормального режима ГРУ-6 кВ Ново-Кемеровской ТЭЦ

Таким образом, для выделения составляющих выраженных частот в токе и напряжениях при ОЗЗ необходим глубокий спектральный анализ. Программное обеспечение некоторых цифровых осциллографов позволяет оценить значение тока замыкания на землю не только частоты 50 Гц, но и составляющих других частот с помощью быстрого преобразования Фурье.

Независимо от режима нейтрали активная составляющая тока ОЗЗ дает представление об активных утечках по изоляции исследуемой сети 6-35 кВ. Как показывают эксперименты, в большинстве случаев величина активных утечек не превышает 5%. Увеличение активной доли в токе замыкания на землю в компенсированной сети связано с влиянием дугогасящих катушек на состав тока ОЗЗ. Как показывают эксперименты, такое увеличение может быть значительным – в несколько раз – по сравнению с сетью без компенсации.

Анализ величин измеренных при различных настройках ДГР токов ОЗЗ 50 Гц позволяет проверить, исправны ли указатели положения «анцапф» ступенчатых катушек. Например, при замерах на секциях ГРУ-10 кВ Новосибирской ТЭЦ-3, где компенсация организована с помощью ДГР типа ЗРОМ-300/10 (в режиме раздельной работы секций ГРУ на рассматриваемую III секцию приходится 2 катушки) было показано, что при изменении отпаяк обеих катушек с 1 на 5 и, следовательно, увеличения суммарного индуктивного тока на 50 А компенсированный емкостной ток секции уменьшается примерно на 30 А. Это свидетельствует о нарушениях в работе устройства регулирования ДГК.

## Выводы

1. К датчикам тока и напряжения, используемых для преобразования сигналов тока однофазного замыкания на землю и фазных напряжений первичной сети, предъявляются специальные требования в части АЧХ, а именно – постоянства коэффициента преобразования в требуемом диапазоне частот (хотя бы до 5 кГц). В качестве датчиков тока могут быть использованы стандартные ТТ (ни в коем

случае не ТТНП) любого номинального напряжения, в качестве датчиков напряжения лучше использовать специальные делители напряжения.

2. При записи сигналов фазных напряжений и тока замыкания с помощью многоканального цифрового прибора решаются задачи определения уровней перенапряжений при замыканиях на землю и гармонического состава напряжения в нормальном режиме и режиме ОЗЗ. Характер записываемых процессов и последующий анализ осциллограмм говорят о степени расстройки ДГР в сети с компенсированной нейтралью. Наряду с этим происходит проверка настройки катушек.
3. На основе анализа характеристик записываемых процессов разработаны минимальные аппаратные требования к цифровым осциллографам для записи напряжений фаз и токов однофазного замыкания на землю.
4. Емкостной ток ОЗЗ всегда содержит ряд гармоник в широком частотном диапазоне – от 25 Гц до 3,5 кГц. В сетях с компенсацией емкостного тока ОЗЗ токи высших гармоник не компенсируются дугогасящими реакторами. Зачастую эксплуатационный персонал из-за влияния высших гармоник испытывает сложности с настройкой катушек и поддержанием режима компенсации, особенно при частых изменениях режимов нагрузки.

### *Литература*

1. *Лихачев Ф.А.* Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. – Москва: Энергия, 1971.
2. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ ТИ 34.20.179-88.
3. *Келим Ю.М.* Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М: Высшая школа, 1991. – 304 с.
4. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / *Ф.А. Гиндуллин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов.* – М: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
5. *Бульчев А.В., Ванин В.К.* Частотные характеристики трансформаторов напряжения для защиты генераторов// Энергетика, 1987. - №11.
6. *Ярославский В.Н., Боярин Н.А., Алексеев А.А.* и др. Метод измерения частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля ПКЭ.
7. *Кузнецов А.А.* Исследование резонансных процессов на высших гармониках в несимметричных режимах работы систем электроснабжения – Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. тех. наук. – каф. "Электрические системы и сети" СПбГТУ – 2000.
8. *Сапунов М.* Вопросы качества электроэнергии//Новости Электротехники. – 2001.- №4(10).