

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА РУОМ ПРИ «МЕТАЛЛИЧЕСКИХ» И ДУГОВЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 10 кВ

Ширковец А.И., Ильиных М.В., Дмитриев И.Н.,
Астафьев С.О., Хуртов И.И., Ильин А.И.,
Сазонов В.Н., Багаев Д.В.

На базе инструментальных замеров получены фактические величины времени выхода на установившийся режим компенсации дугогасящего реактора типа РУОМ при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Впервые в ряде экспериментов осциллографированы переходные процессы, отображающие поведение реактора РУОМ в режимах дуговых ОЗЗ в реальной сети, а не на испытательном стенде. Предложена методика исследования, реализующая комплексный подход при одновременной записи сигналов фазных напряжений и токов в цепи заземления нейтрали. В результате спектрального анализа определены значения явно выраженных в токе реактора и остаточном токе замыкания гармоник, а также характер их изменения в течение однофазного замыкания. Показано, что степень расстройки компенсации в сети с управляемым подмагничиванием реактором зависит от целого ряда факторов, которые определяются работоспособностью автоматики САНК и качеством ее наладки при вводе системы компенсации в эксплуатацию.

Ключевые слова: дугогасящие реакторы с подмагничиванием типа РУОМ; системы автоматической настройки компенсации (САНК); однофазные «металлические» (дуговые) замыкания на землю; время выхода на установившийся режим; гармонический состав тока; степень расстройки компенсации

Постановка задачи

Существует целый ряд работ, где подробно описывается принцип действия и технические характеристики дугогасящего реактора (ДГР) с подмагничиванием типа РУОМ, а также рассматриваются основные принципы построения системы САНК, без которой нормальное функционирование реактора невозможно [1, 2, 3]. Физический принцип работы управляемого подмагничиванием данного типа реактора, а также эквивалентная и принципиальная

схемы последнего приведены в [4]. Несмотря на то, что с 1996 г. по 2007 г. предприятием «РЭТЗ «Энергия» выпущено более 400 реакторов типа РУОМ, установленных в сетях России, Белоруссии, Казахстана, Молдовы, Монголии и других стран [5], экспериментальных исследований эффективности таких реакторов в действующих электрических сетях, а не на заводском стенде чрезвычайно мало.

К настоящему времени разработаны и апробированы высокоточные методики инструментального замера, которые позволяют на базе анализа цифровых осциллограмм с минимальной погрешностью оценивать параметры переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-35 кВ с любыми режимами заземления нейтрали [6].

В рамках данной работы осуществлена экспериментальная проверка эффективности системы компенсации на базе плавнорегулируемого реактора типа РУОМ-190/11 с системой настройки компенсации САНК-4.2-УХЛ4 при однофазных «металлических» и дуговых замыканиях на землю в сети 10 кВ ПС 110/10 кВ «Городская» Заволжского ПО филиала ОАО «МРСК Волги». Исследования проводились по инициативе специалистов ОАО «МРСК Волги».

Питание потребителей по сети 10 кВ на ПС «Городская» осуществляется с двух секций: 1СШ-10 кВ и 2СШ-10 кВ, которые в нормальном режиме работают отдельно. РУОМ под управлением САНК должен обеспечивать эффективную работу компенсации тока ОЗЗ как в режиме относительно небольшого тока ОЗЗ при работе 2СШ-10 кВ (около 7 А), так и в режиме значительно большего тока ОЗЗ при работе объединенных секций 1 и 2 СШ-10 кВ (около 20 А). Диапазон непрерывного изменения значений тока реактора РУОМ-190/11 составляет 2,5-30 А, при этом

номинальный ток 6-часовой нагрузки 25 А, ток 2-часовой нагрузки 25-30 А. Подробные эксплуатационные характеристики реактора РУОМ-190/11 можно найти в каталогах производителя «РЭТЗ «Энергия». Автоматика управления РУОМ в настоящее время реализуется на микропроцессорной базе, на ПС «Городская» установлена ее новая модификация САНК 4.2.

На наш взгляд, в первую очередь проверке необходимо подвергнуть тезис разработчиков реакторов РУОМ по поводу «безынерционного выхода на режим реактора РУОМ и возврата к требуемому току компенсации как при устойчивом, так и при неустойчивом горении дуги» [5]. Заявленное время выхода на режим компенсации с выдачей индуктивного тока при любых ОЗЗ (и «металлических», и дуговых) согласно предварительно определенной уставке САНК составляет 0,01-0,02 с [2]. Однако столь малое время выхода на режим достигается только при условии соответствующей настройки углов регулирования тиристоров и определенной начальной индукции реактора [4].

Тезис о практически безынерционном выходе реактора типа РУОМ на установившийся режим до настоящего времени подтверждался многочисленными расчетными экспериментами, а также опытами на стенде «РЭТЗ «Энергия». Относительно недавними можно считать полевые испытания реактора типа РУОМ-480/11 при металлических ОЗЗ в сети 10 кВ ПС «Луговая» и записи переходных процессов регистратором «Парма» [5], частота дискретизации которого не превышает 1 кГц. Этого явно недостаточно для корректной записи сигналов при ОЗЗ (особенно дуговых), поскольку частота переходного процесса до достижения установившегося значения тока замыкания на землю достигает по некоторым оценкам 250-1000 Гц в сетях с воздушными линиями и 1500-3000 Гц — в сетях с кабельными линиями [7].

Осциллограммы тока и напряжения реактора того же типа при повторяющихся дуговых замыканиях представлены, к сожалению, только для экспериментов на испытательном стенде «РЭТЗ «Энергия», проведенных еще в 1998-1999 гг [5].

Подлежит анализу и точность настройки реактора РУОМ в режим, близкий к резонансному, при возникновении в сети ОЗЗ. Декларируемая степень настройки, которая должна обеспечиваться системой САНК, составляет $\pm 2\%$ при работе в кабельных, воздушных и смешанных электрических сетях, в том числе при наличии в сетях базовых дугогасящих реакторов, включенных параллельно с реактором типа РУОМ [8]. При этом, согласно [2], указанная величина 2% представляет собой не что иное, как погрешность измерения емкости сети методом, реализованным в системе управления САНК, при пороговом смещении нейтрали $U_{\text{см}} = (0,15-0,20)U_{\text{ф}}$, до достижения которого система управления фиксирует нормальный режим работы сети.

Немаловажным обстоятельством представляется насыщенность тока РУОМ — а, следовательно, остаточного тока в месте замыкания высшими гармониками. Согласно экспериментам, результаты которых представлены в работе [5], величина «тока искажения» (или суммарное среднеквадратическое значение гармоник), не превышает 5% от номинального тока реактора во всем диапазоне регулирования и определяется главным образом третьей гармоникой.

Методика инструментального замера и схема эксперимента

Методические подходы к осциллографированию переходных процессов при ОЗЗ подробно описаны в работе [6], где приведены сведения по используемому измерительному оборудованию и определены минимальные аппаратные требования для него. Отметим следующее. Для преобразования сигнала в цепи заземления РУОМ, а также (в некоторых опытах) в месте ОЗЗ использовался датчик тока LT 500 — компенсационный датчик на эффекте Холла (точность преобразования — $\pm 0,3\%$; частотный диапазон — 0-150 кГц). Запись сигналов осуществлялась с помощью цифрового осциллограф-регистратора DL-750 Scope Corder («Yokogawa Electric Corporation», Япония) — многоканальной компьютеризированной системой сбора, обработки и хранения данных, имеющей 8 аналоговых каналов с максимальной частотой выборки 10 МГц, памятью 25 миллионов точек на канал и вертикальным разрешением 12 бит. Высокая точность измерений достигается хорошей вертикальной чувствительностью — от 0,1 мВ/дел и широким диапазоном временной развертки: в проведенных опытах время записи процессов достигало 200 с при частоте дискретизации 100 кГц и объеме памяти 25 Мб на канал с одновременным использованием 5-7 каналов. Осциллограф ЦЗО-04 производства ЗАО «Руднев – Шилев», который показан на обобщенной схеме эксперимента (рис. 1), использовался в качестве резервного.

На рис. 1 также показаны присоединения соответствующих каналов осциллографов в цепи снимаемых сигналов: цепи 1,2,3 — фазные напряжения, цепь 4 — ток в месте ОЗЗ (ОДЗ), цепи 5, 6 — ток РУОМ, снимаемый с двух выходов датчика LT 500 с различными коэффициентами усиления.

Искусственные «металлические» ОЗЗ проводятся при установке однофазной «закоротки» в цепи 4 (из схемы выводится искровой промежуток). Для создания ОДЗ используется искровой промежуток (ИП) с шаровыми медными электродами определенного диаметра. Расстояние между электродами устанавливается таким образом, чтобы обеспечить пробой воздушного промежутка при прохождении подвижного электрода под неподвижным. За счет определенной скорости вращения подвижного электрода обеспечивалось горение перемежающейся/прерывистой дуги при схождении-расхождении электродов,

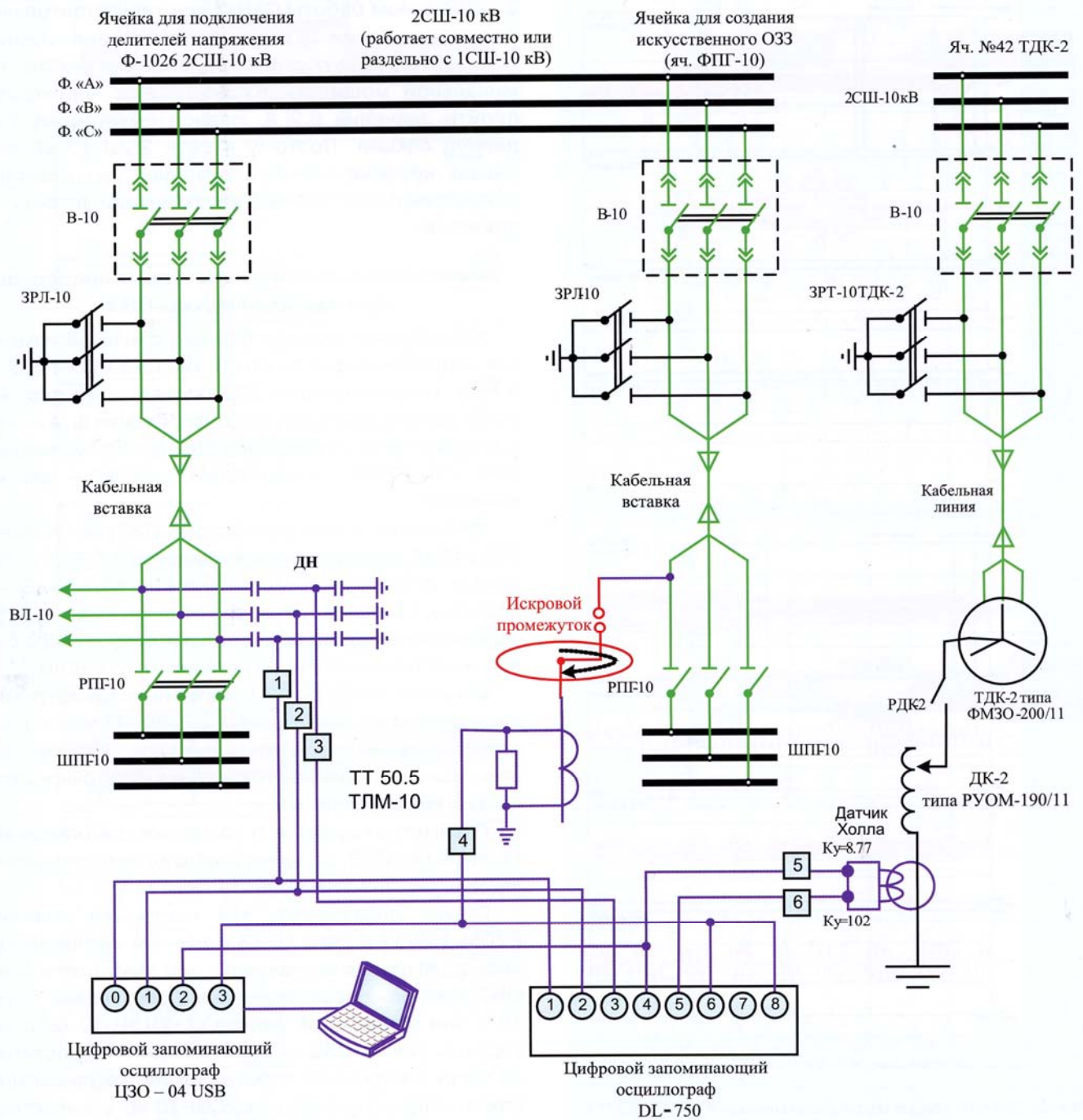


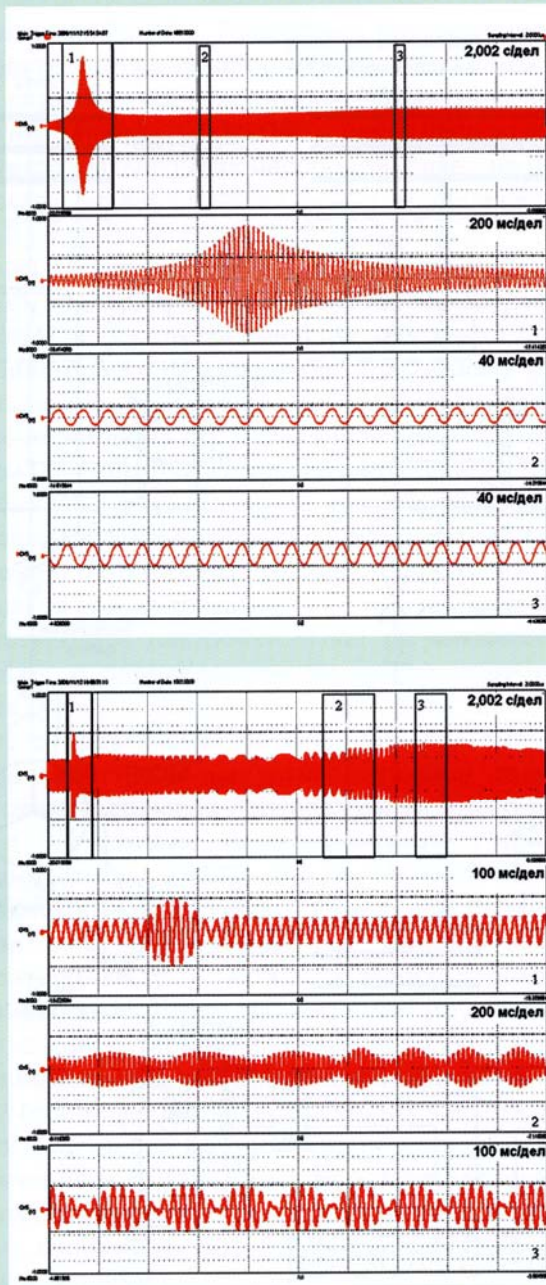
Рис. 1. Схема подключения измерительной аппаратуры при экспериментальном исследовании эффективности системы компенсации в сети 10 кВ подстанции «Городская» 110/10 кВ с организацией «металлических» и дуговых ОЗЗ

а также определенное количество циклов возникновения дуги.

Перед проведением экспериментов с организацией однофазных замыканий на землю в цепи заземления РУОМ-190/11 было зафиксировано появление тока с амплитудой периодических «биений» до 0,6-0,8 А в течение примерно 1,0-1,5 мин после включения системы «САНК+РУОМ» в работу (рис. 2, а). Позже, по истечении указанного времени, было отмечено изменение амплитуды тока в процессе подстройки реактора (рис. 2, б). Это явление обусловлено поиском резонансной точки (в контуре

нулевой последовательности — частоты резонанса между суммарной емкостью сети на землю и индуктивностью подмагниченного реактора) и последующим предварительным подмагничиванием реактора по команде системы управления. Изменение частоты огибающей биения (рис. 2, б) связано, вероятно, с динамикой изменения углов открытия тиристорov в процессе предварительного подмагничивания реактора.

В случае раздельной работы секций при величине емкостного тока 2СШ-10 кВ, когда индуктивный ток предварительно подмагниченного реактора,



Действительный масштаб по оси «I_{РУОМ}» — 0,2 А/дел

Рис. 2. Сигнал тока в цепи заземления РУОМ-190/11, зафиксированный в отсутствие в сети ОЗЗ при работе системы автоматической настройки после включения САНК 4.2 в работу

соответствующий трети его мощности, составляет порядка 10 А, наблюдалось значительное качание стрелки вольтметра контроля напряжений (ячейка шинного ТН 2СШ-10 кВ). При этом сведений о повреждениях в сети 2СШ-10 кВ не поступало, что свидетельствует о «раскачивании» нейтрали во время определения требуемой уставки реактора РУОМ-190/11.

Замеренное напряжение смещения при определении регулятором САНК 4.2 резонансной частоты контура нулевой последовательности на 2СШ-10 кВ составляло до 500 В (8,7% от фазного напряжения сети).

Судя по всему, показанные процессы связаны с алгоритмом работы САНК: при предварительном подмагничивании ДГР с выходом на индуктивный ток, соответствующий определенной части номинальной мощности РУОМ-190/11, необходимо пройти значение 6,2 А, равное емкостному току данной секции. Поэтому в сети 2СШ-10 кВ возникает кратковременный резонанс, вызывающий появление существенной несимметрии фазных напряжений.

Анализ осциллограмм переходных процессов при «металлических» ОЗЗ

Характерные осциллограммы процессов изменения напряжений фаз в сети 10 кВ, тока РУОМ-190/11 и тока «металлического» ОЗЗ приведены на рис. 3-4. На осциллограммах с DL-750: напряжение ф. А — черный (СН1), ф. В — зеленый (СН2), ф. С — малиновый (СН3), ток РУОМ — синий (СН4), ток ОЗЗ — оранжевый (СН6).

Длительность «металлического» ОЗЗ при опытах на 2СШ-10 кВ варьировалась в пределах 9,6-27,0 с, при опытах на объединенных секциях (1+2)СШ-10 кВ — в пределах 11,1-54,9 с. Разброс величин амплитудного фазного напряжения, при которых возникает ОЗЗ, оказался достаточно велик и составил $(0,12-0,99)U_{ф\max}$.

Отметим, что на рис. 3, б показаны осциллограммы эксперимента с отключением фидера ($I_{\text{фидера}} = 1,4 \text{ А}$) и последующим его включением через 20 с, что вызвало соответствующее повышение остаточного тока ОЗЗ на указанное время.

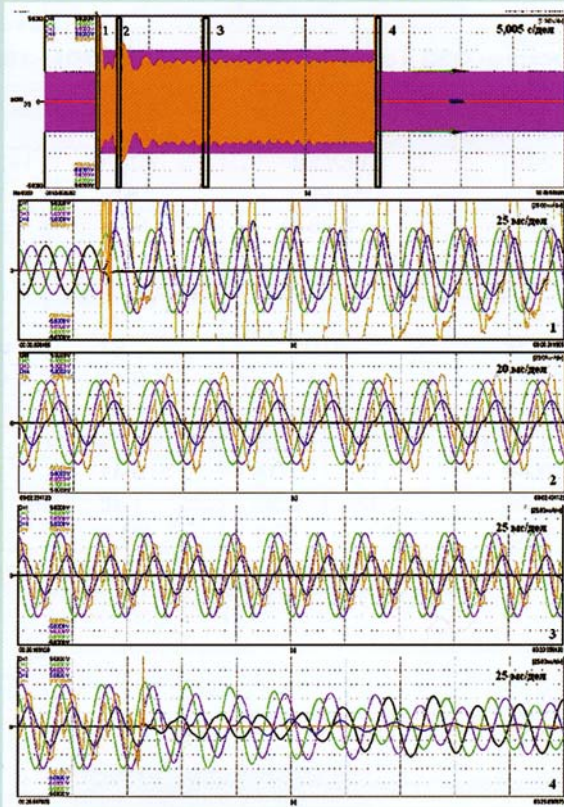
Параметры переходных процессов для опытов металлических ОЗЗ, осциллограммы которых представлены на рис. 3-4, приведены в табл. 1.

Опыты показывают, что настройка реактора РУОМ-190/11 в сети 10 кВ в данном случае оказалась далека от резонансной: при «металлических» ОЗЗ степень перекомпенсации составляет более 10% при совместной работе (1+2)СШ-10 кВ с емкостным током ОЗЗ $I_{\text{ОЗЗ}}^{1+2\text{СШ}} = 17,5 \text{ А}$ и достигает 24% при раздельной работе секций, когда система компенсации включена на 2СШ-10 кВ с емкостным током $I_{\text{ОЗЗ}}^{2\text{СШ}} = 6,2 \text{ А}$.

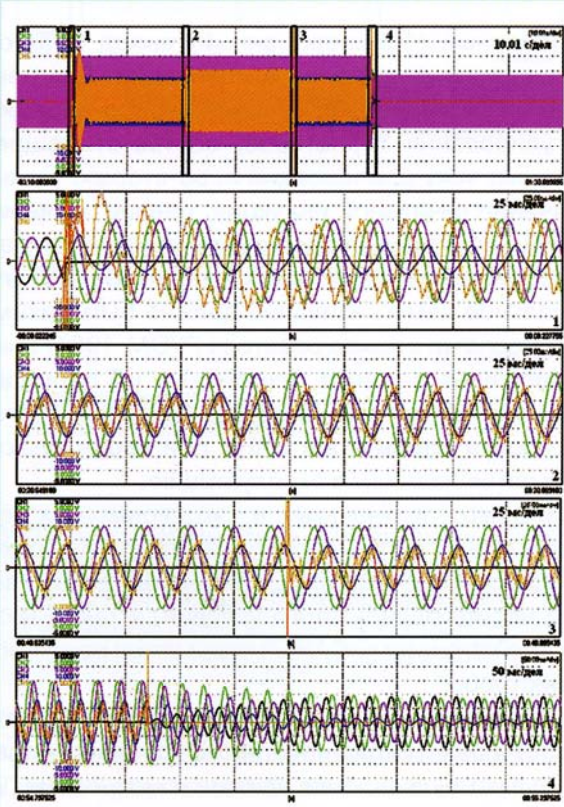
Определение времени выхода на установившийся режим компенсации

На рис. 5 приведены характерные осциллограммы изменения тока РУОМ в процессе ОЗЗ, соответствующие рис. 3. Осциллограммы тока реактора с подмагничиванием для опытов, представленных на рис. 4, здесь не приводятся, поскольку характер их подобен.

Поскольку при проведении опытов искусственно металлического ОЗЗ возникновение однофазного замыкания происходит в ряде случаев в момент времени, не соответствующий максимуму напряжения на замыкаемой фазе, в токе компенсации должна присутствовать апериодическая составляющая даже при настройке данного ДГР, близкой к резонансной. Как



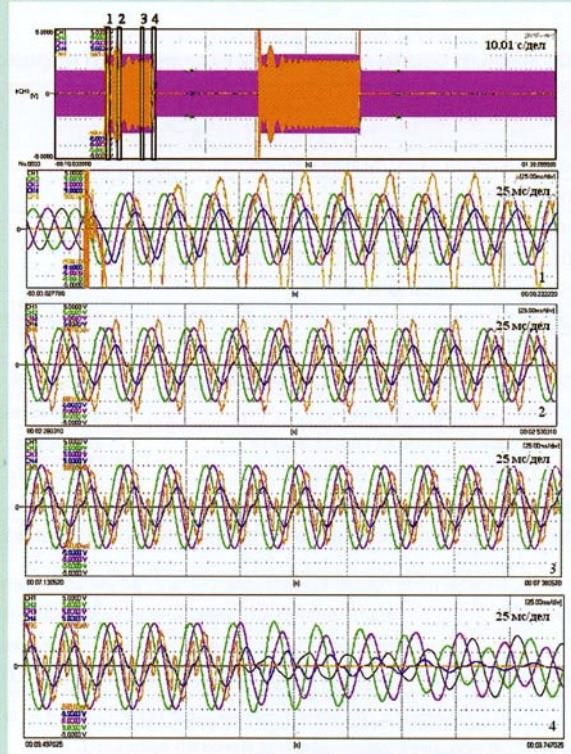
а



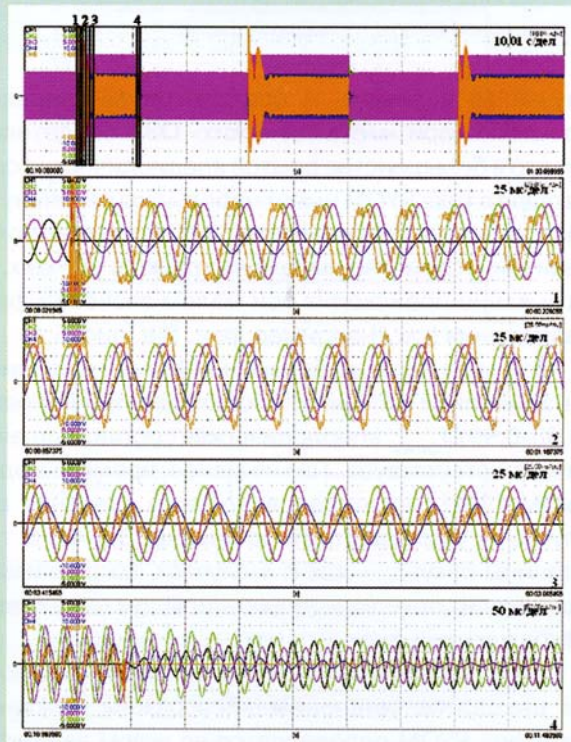
б

Действительный масштаб по оси «напряжение» — 4,86 кВ/дел
 а) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 8,77 А/дел, по оси « I_{O33} » — 1,39 А/дел
 б) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 17,54 А/дел, по оси « I_{O33} » — 2,78 А/дел

Рис. 3. Осциллограммы тока в цепи заземления РУОМ-190/11, остаточного тока O33 и фазных напряжений при замерах в сети 2СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская» для моментов замыкания в $0,13U_{\text{фmax}}$ (а) и $0,88U_{\text{фmax}}$ (б)



а



б

Действительный масштаб по оси «напряжение» — 4,86 кВ/дел
 а) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 8,77 А/дел, по оси « I_{O33} » — 1,39 А/дел
 б) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 17,54 А/дел, по оси « I_{O33} » — 2,78 А/дел

Рис. 4. Осциллограммы тока в цепи заземления РУОМ-190/11, остаточного тока O33 и фазных напряжений с повторными замыканиями при замерах в сети 2СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская» для моментов замыкания в $0,96U_{\text{фmax}}$ (а) и $0,99U_{\text{фmax}}$ (б)

указывалось выше, разброс величин амплитудного фазного напряжения, при которых возникает O33, достаточно велик, так как момент замыкания —

Таблица 1

Основные параметры, характеризующие процесс «металлического» ОЗЗ в сети 10 кВ с реактором РУОМ-190/11

Осциллограмма	Рис. 3, а, рис. 5, а	Рис. 3, б, рис. 5, б	Рис. 4, а	Рис. 4, б		
Исследуемая секция шин 10 кВ ПС «Городская»	2СШ	1+2СШ	2СШ ⁽³⁾	1+2СШ ⁽³⁾		
Длительность ОЗЗ, с	27,0	54,9 ⁽²⁾	9,6	11,1		
Значение $U_{\text{фmax}}$ для фазы, замыкаемой на землю	0,13	0,88	0,96	0,99		
Время выхода РУОМ-190/11 на установившийся режим компенсации, с	6,0	4,5	6,0	4,0		
Время полного затухания тока РУОМ после отключения ОЗЗ, с	0,5	1,7	0,5	1,7		
Значение основной гармоники тока РУОМ-190/11 в «установившемся» режиме компенсации, А	полный	7,46	18,91	7,67	19,08	
	активный	0,11	0,52	0,12	0,55	
	реактивный	7,45	18,90	7,67	19,07	
Значение основной гармоники тока ОЗЗ в установившемся режиме компенсации, А	полный	1,32	1,82	3,20	1,53	1,97
	активный	0,40	1,14	1,14	0,41	1,16
	реактивный	1,26	1,42	2,99	1,48	1,60
Степень перекомпенсации по реактивным составляющим ⁽¹⁾ , %	20,3	8,1	17,1	23,9	9,1	

⁽¹⁾ Степень перекомпенсации (расстройку реактора) вычислим по формуле: $100 \cdot I_{\text{ОЗЗ, ост, реакт}}^{50 \text{ Гц}} / I_{\text{ОЗЗ, полный}}^{50 \text{ Гц}}$,

где $I_{\text{ОЗЗ, ост, реакт}}^{50 \text{ Гц}}$ — реактивная составляющая остаточного тока ОЗЗ, А;

$I_{\text{ОЗЗ, полный}}^{50 \text{ Гц}}$ — величина полного тока ОЗЗ соответствующей секции или объединенных секций, А.

Замеренный полный ток ОЗЗ составил $I_{\text{ОЗЗ}}^{2\text{СШ}} = 6,2 \text{ А}$, $I_{\text{ОЗЗ}}^{1+2\text{СШ}} = 17,5 \text{ А}$.

⁽²⁾ Эксперимент с отключением фидера ($I_{\text{фидера}} = 1,4 \text{ А}$) и последующим его включением, это обуславливает соответствующее повышение остаточного тока ОЗЗ.

⁽³⁾ В табл. 1 приведены данные только по первому ОЗЗ в опытах, где было произведено несколько замыканий подряд с интервалом 20-30 с, что видно из рис. 4.

случайная величина. А осциллограммы переходных процессов при «металлических» ОЗЗ свидетельствуют, что в большинстве опытов апериодическая составляющая в токе РУОМ имеет небольшую величину, затухает за 3-5 периодов частоты 50 Гц, а имеет большую величину и заметно выражена только в случаях, когда замыкание происходит при малом значении фазного напряжения (см., например, рис. 3, а, рис. 5, а).

При угле пробоя, близком к 90 эл. градусам, когда замыкание на землю происходит при напряжении $(0,98-0,99)U_{\text{фmax}}$, апериодическая составляющая практически отсутствует. Тем не менее, время выхода тока РУОМ-190/11 на «установившееся» значение в этом случае не уменьшается и составляет 3,6-4,0 с, то есть единицы секунд — как и в случаях, когда замыкание происходит при значительно меньшем напряжении на поврежденной фазе.

Следовательно, в нашем случае значительное время выхода на установившийся режим компенсации реактора РУОМ определяется не углом замыкания, а характеристиками магнитной системы ДГР с подмагничиванием и автоматического регулятора САНК.

В работе [2] приводится пояснение физической сущности процессов, сопровождающих выход управляемых подмагничиванием реакторов на установившийся режим при подключении их к переменному напряжению. Показывается, что время этого выхода зависит от начального значения индукции в магнитной системе реактора в момент подключения к сети. Чем ближе значение начальной индукции к индукции подмагничивания в установившемся режиме, тем меньше длительность переходного процесса. Иначе говоря, в предельном случае имеет место

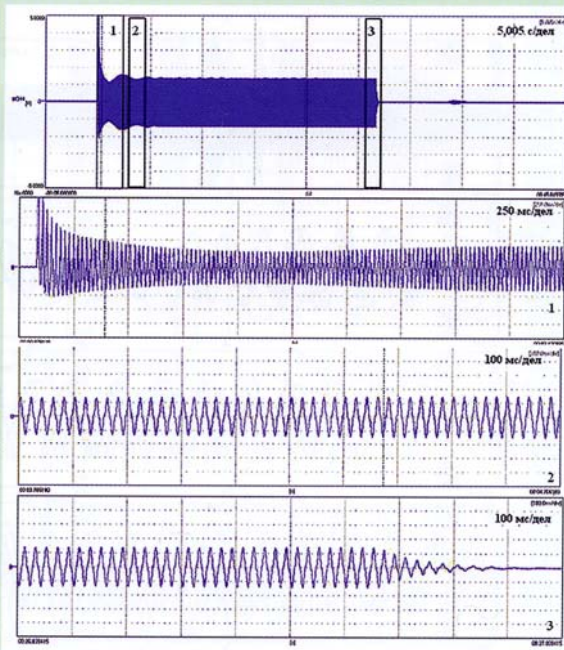
мгновенный (безынерционный) выход реактора на установившийся режим компенсации. Для реализации этого необходимо установить, во-первых, углы регулирования тиристорov, соответствующие требуемому току компенсации и, во-вторых, установить значение начальной индукции, равное значению индукции подмагничивания в установившемся режиме. Следовательно, судя по заключению разработчиков, начальное намагничивание должно быть таким, чтобы обеспечить выход реактора РУОМ-190/11 на установившийся режим в течение 0,5-1,0 периода промышленной частоты. Для этого необходима «тонкая» настройка параметров САНК при вводе реактора с подмагничиванием в эксплуатацию.

Однако полученные в экспериментах данные (табл. 1, рис. 3-5), а именно — затянутый переходный процесс в токе реактора, свидетельствуют о вероятном несоблюдении этого условия, а также неточной настройке системы САНК в части углов регулирования тиристорov.

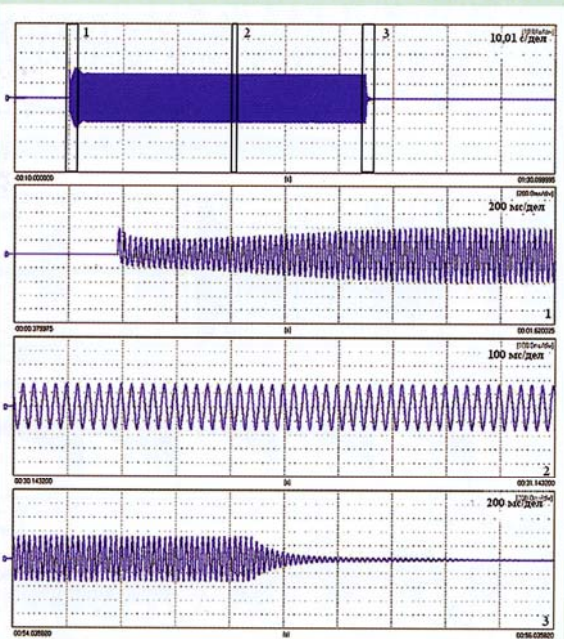
Кроме того, были отмечены колебания тока РУОМ частоты 50 Гц около некоторого «среднего» значения даже в установившемся режиме компенсации (!). Уровень этих колебаний находится в пределах 2-3% и не зависит от текущего напряжения на нейтрали, представляющего собой в опытах «металлического» ОЗЗ гладкую кривую фазного напряжения.

Исследование гармонического состава тока РУОМ

В результате измерений тока ОЗЗ и тока дугосвещающего реактора типа РУОМ-190/11 в различных режимах работы секций 1 и 2СШ-10 кВ ПС «Городская» было отмечено наличие явно выраженных в сигнале



а

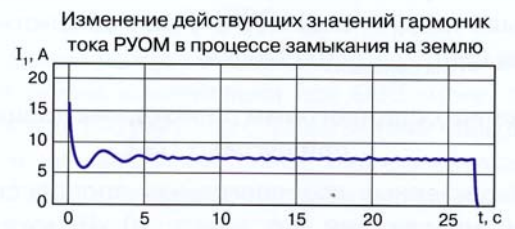


б

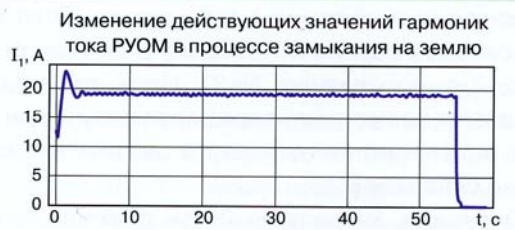
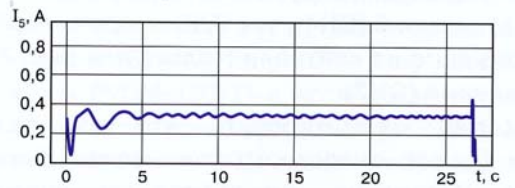
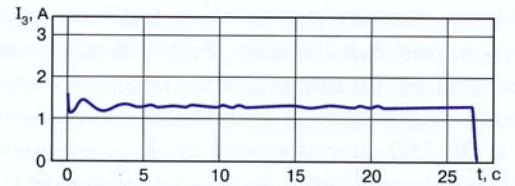
Рис. 5. Осциллограммы тока в цепи заземления РУОМ-190/11 при замерах в сети 2СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская»
 а — масштаб по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 8,77 А/дел
 б — масштаб по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 17,54 А/дел

тока РУОМ третьей и пятой гармоник (рис. 6, соответствует опыту рис. 3, рис. 5), которые значительно влияют на гармонический состав остаточного тока замыкания. При возрастании тока компенсации (рис. 5, б, рис. 6, б) искажение формы кривой данного тока за счет 3-й гармоники существенно снижается. На рис. 6 показано, как меняется величина отдельных гармоник тока РУОМ-190/11 в процессе ОЗЗ.

Результаты исследований, касающихся определения остаточного тока реактора в точке замыкания, которые представлены в [2], хорошо согласуются с полученными в настоящей работе данными. Действительно, среднеквадратическое значение высших



а



б

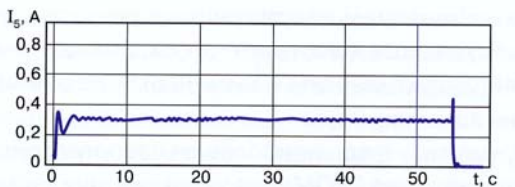
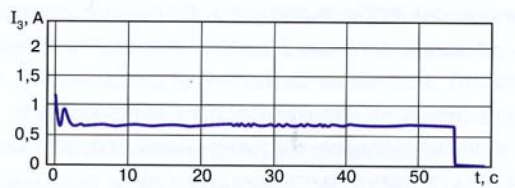


Рис. 6. Характер изменения первой, третьей и пятой гармоник тока РУОМ-190/11 в процессе ОЗЗ при замерах в сети 2СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская»

гармоник в токе РУОМ $\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$ (в данном случае $n=40$) для «малого» тока РУОМ $I_{\text{РУОМ}_2\text{СШ}}^{50\text{ Гц}} = 7,5\text{ А}$ составляет 1,4 А (более 18% от составляющей 50 Гц) и 0,8 А (порядка 4% от составляющей 50 Гц) для «большого» тока РУОМ $I_{\text{РУОМ}_{1+2\text{СШ}}}^{50\text{ Гц}} = 19,0\text{ А}$. Таким образом, суммарный остаточный ток от высших гармоник в точке ОЗЗ для РУОМ-190/11 в экспериментах не превысил указанной для величины 2 А для данного типа реактора [2].

Активная составляющая в токе РУОМ, как было выявлено по результатам анализа осциллограмм переходных процессов при «металлических» ОЗЗ, не превышает 1,5-3,0% от величины 50 Гц и тем меньше, чем

меньше ток ДГР. В данном случае в абсолютных единицах $I_{\text{РУОМ}}^{50\text{Гц}} = 0,1-0,6 \text{ А}$.

Анализ осциллограмм переходных процессов при дуговых ОДЗ

Характерные осциллограммы процессов изменения напряжений фаз в сети 10 кВ, тока РУОМ-190/11 и тока дуги в опытах ОДЗ приведены на рис. 7, а, рис. 8, а. На рис. 7, б, 8, б показаны соответствующие осциллограммы кривых напряжения смещения нейтрали и тока РУОМ. На осциллограммах с DL-750: напряжение ф. А — черный (CH1), ф. В — зеленый (CH2), ф. С — малиновый (CH3), ток РУОМ — синий (CH4), ток ОДЗ — оранжевый (CH6), напряжение на нейтрали (только для рис. 7, б, 8, б) — зеленый (CH7).

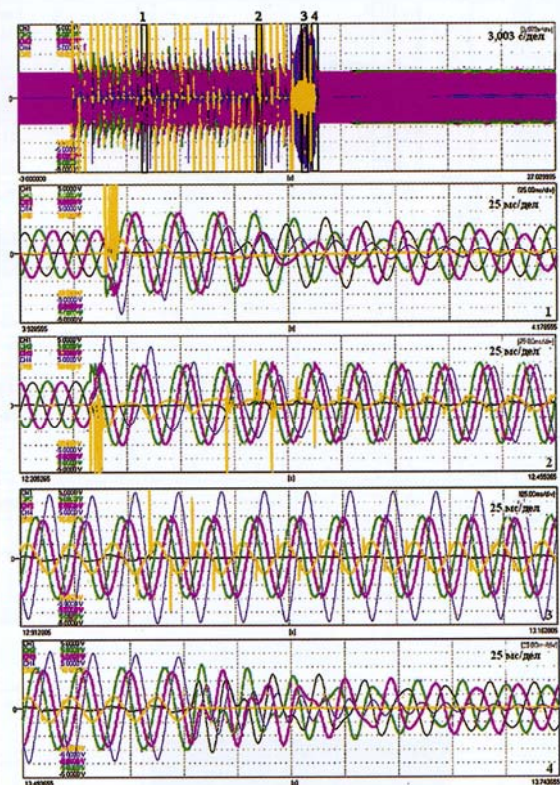
Можно констатировать, что при зажигании дуги бросок емкостного тока может быть более 1 кА. Интересно, что в установившихся режимах длительного горения (чередования циклов «зажигания-погасания») дуги ток в месте замыкания оказывается на 20-30% меньше тока реактора: (рис. 7, а, растяжение № 3). Цель получения максимально возможных перенапряжений при ОДЗ за счет эскалационного роста в данных экспериментах не ставилась.

Очевидно, индуктивный ток реактора с подмагничиванием определяется в большей степени уровнем намагничивания сердечника постоянным током согласно величине заранее определенной уставки. Затухание тока реактора при ликвидации замыкания и последующее «мгновенное» возрастание этого тока при очередном зажигании дуги с соответствующим изменением напряжения на реакторе (рис. 7, б, рис. 8, б) свидетельствуют о сохранении реактором своей индуктивности в интервалах времени прерывания замыкания.

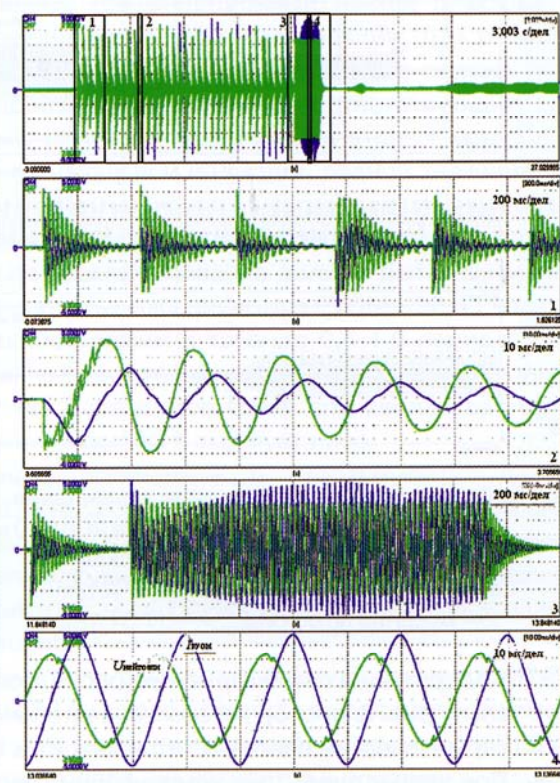
Отметим, что наибольшая зарегистрированная амплитуда тока РУОМ (без учета высших гармоник) по данным ряда экспериментов составила 25,4-61,4 А. Этим величинам соответствует диапазон напряжений смещения нейтрали 5,7-20,9 кВ. Интервал между циклами «зажигания-погасания» дуги в большинстве опытов составлял величину 0,01 с и более, что является «классическим» случаем горения перемежающейся дуги. Общее время горения перемежающейся/прерывистой дуги составляло в экспериментах от 0,13 до 40,6 с.

Явно выраженным в отдельных опытах является «подбрасывание» $I_{\text{РУОМ}}$ и соответствующее увеличение перекомпенсации при последовательных зажиганиях дуги, что хорошо видно из рис. 8 а (растяжение № 3, масштаб 25 мс/дел по оси времени). Визуально данный эффект выражается в «изломе» гладкой кривой на полупериоде, что приводит к увеличению амплитуды тока реактора на величину $\Delta I_{\text{РУОМ}} \leq 20 \text{ А}$ относительно первоначальной.

а

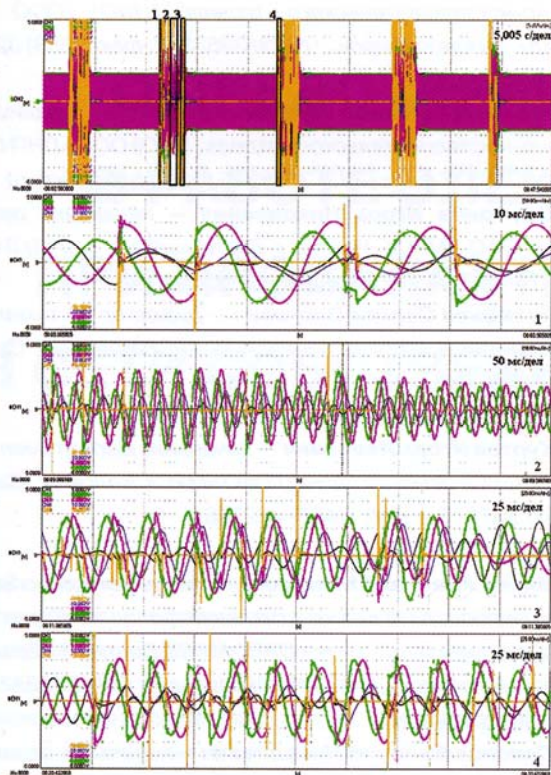


б

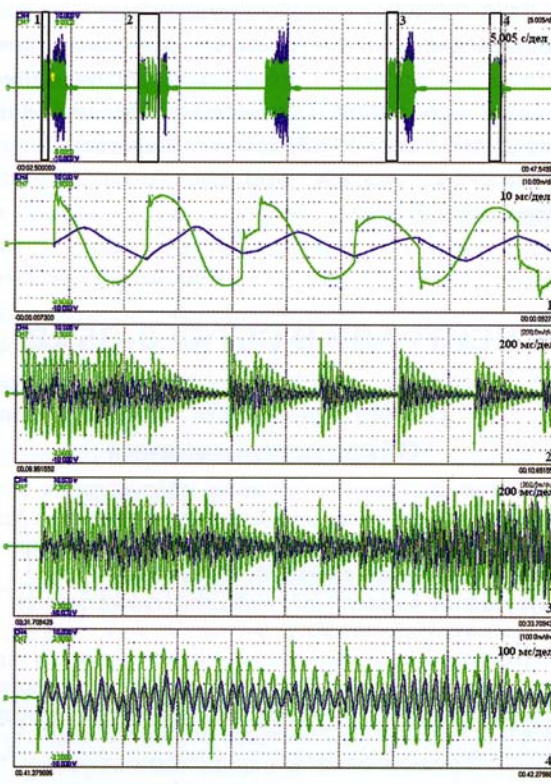


а) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 8,77 А/дел, по оси « $I_{\text{ОДЗ}}$ » — 27,9 А/дел, по оси « $U_{\text{ф}}$ » — 4,86 кВ/дел
 б) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 8,77 А/дел, по оси « $U_{\text{СН}}$ » — 2,43 А/дел

Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений, тока в цепи заземления РУОМ-190/11, тока в месте ОДЗ при замерах в сети 2СШ-10 кВ подстанции «Городская», интервал между последовательными зажиганиями дуги 0,36 с



а



б

а) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 17,54 А/дел, по оси « $I_{\text{ОДЗ}}$ » — 139,3 А/дел,
по оси « $U_{\text{ф}}$ » — 4,86 кВ/дел

б) по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » — 17,54 А/дел, по оси « $U_{\text{см}}$ » — 2,43 А/дел,
по оси « $U_{\text{см}}$ » — 4,86 А/дел (10, 100, 200 мс/дел)

Рис. 8. Осциллограммы фазных напряжений, тока в цепи заземления РУОМ-190/11, тока в месте ОДЗ при замерах в сети 1 + 2 СШ-10 кВ ПС «Городская», интервал между последовательными зажиганиями дуги варьируются от 0,01 до 0,29с

ВЫВОДЫ

1. Время выхода РУОМ-190/11 на установившийся режим компенсации при ОЗЗ может составлять до 6-8 секунд и определяется в большей степени не углом замыкания, а характеристиками самого ДГР с подмагничиванием и системы автоматической настройки САНК. Установлено, что чем сильнее «нагружен» РУОМ, то есть чем выше ток компенсации, тем быстрее он выходит на установившийся режим компенсации. Однако и в том, и в другом случае рассматриваемое время выхода составляет секунды.

2. Реальная расстройка компенсации в сети с реактором РУОМ может существенно превышать заявленную в [8] величину $\pm 2\%$. Так, настройка реактора РУОМ-190/11 в исследованной сети 10 кВ оказалась весьма далека от резонансной: при «металлических» ОЗЗ степень перекомпенсации составляла 9-10% при совместной работе секций 10 кВ и достигала 20-24% на 2СШ при раздельной работе секций.

3. При изменении емкостного тока сети — как во время существования замыкания на землю, так и после его устранения — настройка РУОМ не меняется в течение нескольких минут, что может привести к существенному повышению степени расстройки компенсации относительно исходной (в данных опытах — более чем в 2 раза) и, как следствие, переходу однофазного замыкания на землю в короткое.

4. Зафиксировано наличие явно выраженных в сигнале тока рассматриваемого реактора РУОМ 3-й и 5-й гармоник с уровнем 1,5-17% (0,3-1,3 А) от сигнала промышленной частоты в зависимости от величины индуктивного тока. Измерения остаточного тока ОЗЗ в сети с включенным ДГР с подмагничиванием показали, что гармонический состав первого, а именно — наличие 3-й и 5-й гармоник — определяется главным образом влиянием дугогасящего реактора.

5. В режиме горения перемежающейся однофазной дуги при ненулевом начальном потоке (обусловленном наличием предыдущих ОДЗ) наблюдается значительное увеличение тока реактора РУОМ — в 2,2-3,9 раза относительно значения тока компенсации в установившемся режиме «металлического» ОЗЗ. В отдельных циклах «зажигания-погасания» дуги происходит дополнительное подмагничивание реактора РУОМ, в результате чего амплитуда $I_{\text{РУОМ}}$ может увеличиваться на 15-20 А с соответствующим повышением степени перекомпенсации. Следовательно, в режимах однофазных дуговых замыканий на землю система «РУОМ+САНК» не имеет каких-либо преимуществ перед традиционными дугогасящими реакторами со ступенчатым или плавным регулированием индуктивного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базылев Б.Н., Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Лурье А.И., Таджибаев А.И. Дугогасящие реакторы с автоматической коменсацией емкостного тока замыкания на землю. СПб.: Изд. ПЭИПК, 1999. 184 с.
2. Брянцев А.М., Лурье А.И., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Базылев Б.И. Управляемые подмагничиванием дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6-35 кВ // Электричество. 2000. № 7. – С. 59-68.
3. Долгополов А.Г. Способы автоматической настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием // Электротехника. 2003. № 1. — С. 59-63.
4. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы — как элемент электроэнергетической системы // Электротехника. 2003. № 1. С. 2-5.
5. Базылев Б.И., Долгополов А.Г., Долгополов С.Г. Результаты сетевых испытаний и опыт эксплуатации дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2007. № 5. С. 31-34.
6. Ширковец А.И., Ильиных М.В. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. 2008. Спец. вып. № 1. С. 44-51.
7. Лихачев Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. М.: Энергия, 1971.
8. Руководство по эксплуатации системы автоматической настройки компенсации САНК-4.2-УХЛ4/ЮНИЯ.421.413.141Э. Тольятти, 2007.

Ширковец Андрей Игоревич — ведущий инженер научно-исследовательского отдела (НИО) ООО «ПНП Болид», г. Новосибирск, (383) 3253317, факс (383) 3253315 pnnp_bolid@ngs.ru

Ильиных Михаил Владимирович — руководитель научно-исследовательского отдела (НИО) ООО «ПНП Болид» (383) 3253317 факс (383) 3253315 pnnp_bolid@ngs.ru

Дмитриев Игорь Николаевич — начальник департамента ОАО «МРСК Урала» г. Екатеринбург, (343) 2152270 факс (343) 2152299 indus@energo.pssr.ru

Астафьев Сергей Олегович — директор по техническому развитию и эксплуатации ОАО «МРСК Волги», г. Саратов, (8452) 302742, моб. 8927-1517541 so.astafiev@mrsk-volgi.ru

Хуртов Игорь Иванович — начальник Департамента эксплуатации и ремонта (ДЭиР) ОАО «МРСК Волги», г. Саратов, (8452) 302616, моб. 8452-462768 ii.hurtov@mrsk-volgi.ru

Ильин Анатолий Иванович — главный инженер Заволжского Производственного отделения филиала «Саратовские распределительные сети» ОАО «МРСК Волги», г. Ершов Саратовской области, (84564) 58934, моб. 909-3322729 a.ilyin@zes.volmrk.ru

Сазонов Валерий Николаевич — начальник отдела развития сетей Департамента технического развития (ДТР) ОАО «МРСК Волги», г. Саратов, (8452) 302794, моб. 8452-462764 vn.sazonov@mrsk-volgi.ru

Багаев Дмитрий Викторович — заместитель начальника отдела диагностики и технического обслуживания электрических сетей (ОДиТО) Департамента эксплуатации и ремонта (ДЭиР) ОАО «МРСК Волги», г. Саратов, (8452) 302494, моб. 8927-1551378 dv.bagaev@mrsk-volgi.ru



РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 3-35 кВ

высоковольтный резистор для заземления нейтрали

Область применения

Предназначен для защиты сетевого оборудования от перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю и устранения резонансных и феррорезонансных явлений путем заземления нейтрали в сетях 3, 6, 10, 35 кВ; при отсутствии выведенной нейтрали подключается через специальный фильтр ФМЗО; география применения резисторов — практически вся территория России от Кольского полуострова до Якутии, а также страны ближнего зарубежья — Казахстан, Украина, Белоруссия.

Технические характеристики

Номинальное напряжение сети, кВ	3, 6, 10, 35
Номинальная мощность, кВт	до 200
Номинальное сопротивление, Ом	100 — 12000
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	3000
Среднее время восстановления, ч	24
Климатическое исполнение	УХЛ, категория I по ГОСТ 15150



ООО «ПНП БОЛИД», pnnp_bolid@ngs.ru

630015, Новосибирск, а/я 119, ул. Электrozаводская 2, корп. 6
т./ф.: (383) 325 33 15, тел.: (383) 325 33 16, (383) 325 33 17