

УДК 621.311

## Проверка работоспособности дугогасящего реактора с подмагничиванием типа РУОМ при однофазных замыканиях на землю в сети 10 кВ

*Сведения об авторах и организациях приведены в отдельном файле*

### Постановка задачи

Существует целый ряд работ, где подробно описывается принцип действия и технические характеристики реактора типа РУОМ, а также рассматриваются основные принципы построения системы автоматической настройки и компенсации управляемого реактора (САНК) [1, 2, 3]. Несмотря на то, что с 1996-1997 гг. по 2007 г. предприятием «РЭТЗ «Энергия» выпущено более 400 реакторов типа РУОМ, установленных в сетях России, Белоруссии, Казахстана, Молдовы, Монголии и других стран [4], исследований в реальных сетях, а не на заводском стенде, чрезвычайно мало.

Необходимо подвергнуть проверке 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» [4]. 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].

Подлежит анализу 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 [5]. 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  $U_{см} = 0,15U_{ф}$ .

Немаловажным обстоятельством представляется насыщенность тока РУОМ и остаточного тока в месте замыкания высшими гармониками. Согласно экспериментам, результаты которых представлены в работе [4], 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.

*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".*

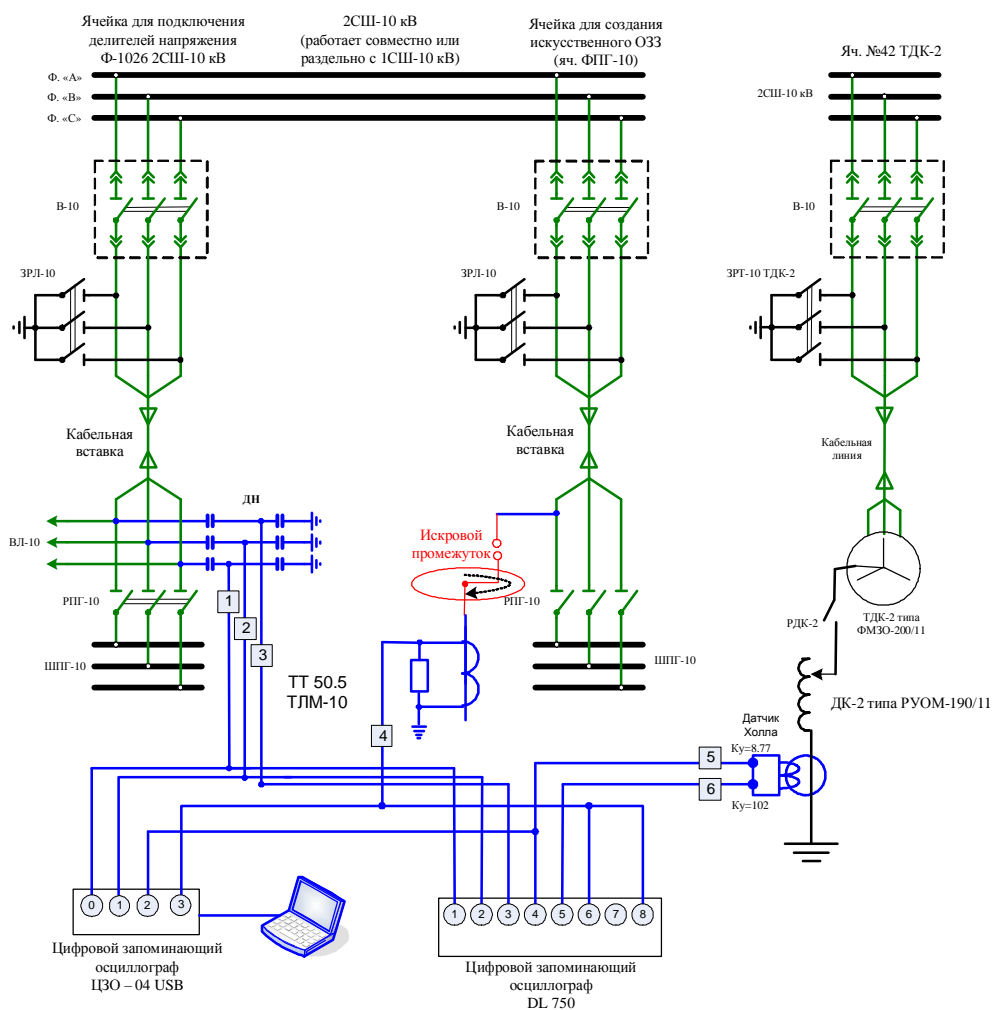
Питание потребителей по сети 10 кВ на ПС «Городская» осуществляется с двух секций: 1СШ-10 кВ и 2СШ-10 кВ, которые в нормальном режиме работают отдельно. РУОМ под управлением САНК должен обеспечивать эффективную работу компенсации тока ОЗЗ как в режиме относительно небольшого тока ОЗЗ при работе 2СШ-10 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). 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.

### Методика и схема эксперимента

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 -  $0 \div 150$  кГц). Запись сигналов осуществлялась с помощью цифрового осциллографа-регистратора *DL-750 Scope Corder* («Yokogawa Electric Corporation», Япония) - многоканальной компьютеризированной системы 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 – Шиляев», 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, а также определенное количество циклов возникновения дуги.



**Рис.1** Схема подключения измерительной аппаратуры при проверке эффективности системы компенсации в сети 10 кВ ПС Городская 110/10 кВ с организацией ОЗЗ

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. Позже, по истечении указанного времени, было отмечено изменение амплитуды тока в процессе подстройки реактора.

В случае раздельной работы секций при величине емкостного тока 2СШ-10 кВ  $I_{ОЗЗ\_2СШ}^{50Гц} = 6,2 \text{ А}$ , когда индуктивный ток предварительно подмагниченного реактора, 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.

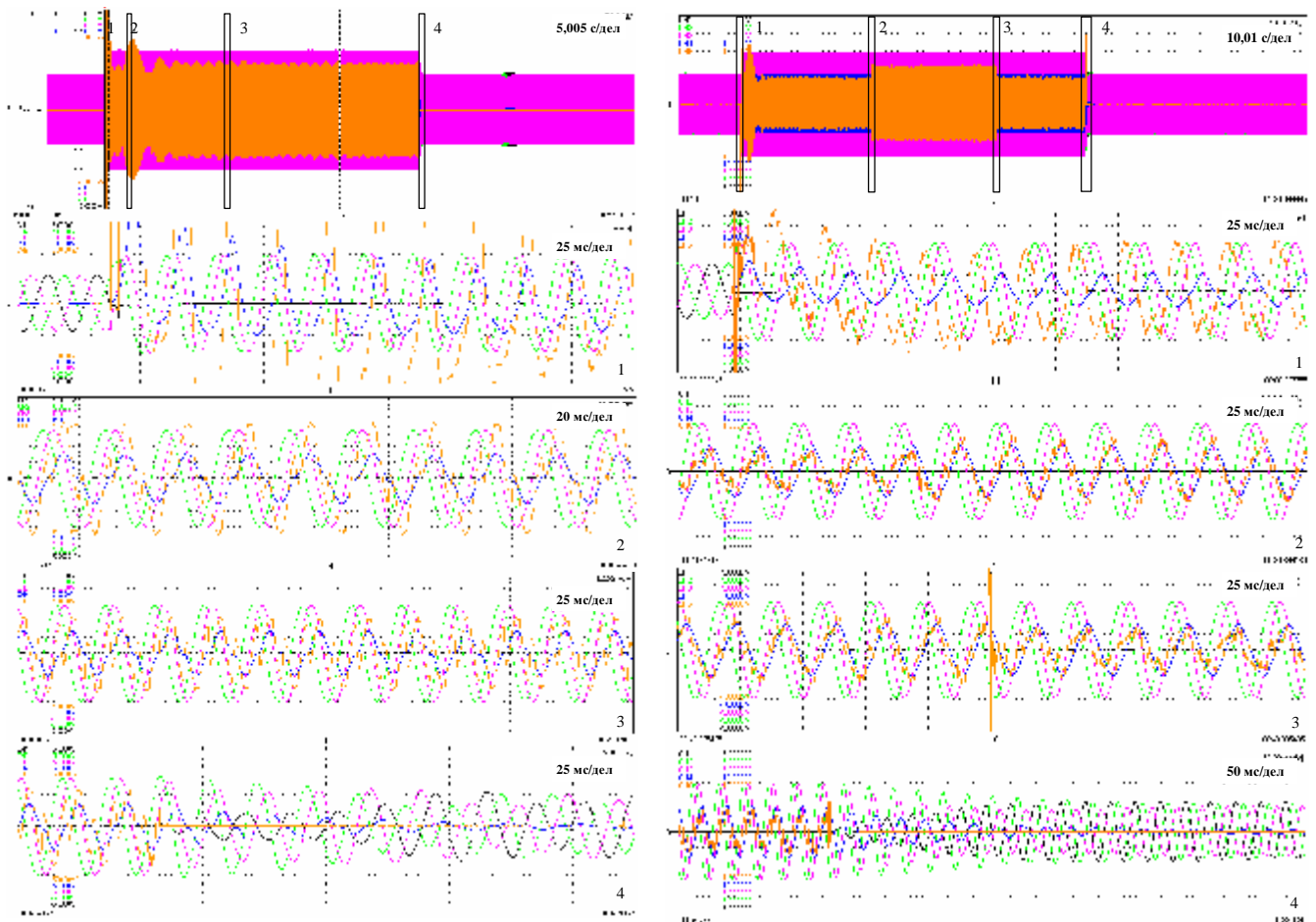
Указанные процессы, судя по всему, связаны с алгоритмом работы САНК: при предварительном подмагничивании ДГР с выходом на индуктивный ток, соответствующий определенной части номинальной мощности РУОМ-190/11, необходимо пройти значение 6,2 А, равное емкостному току данной секции. Поэтому в сети 2СШ-10 кВ возникает кратковременный резонанс, вызывающий появление существенной несимметрии фазных напряжений. Замеренное напряжение смещения при определении регулятором САНК 4.2 резонансной частоты контура нулевой последовательности на 2СШ-10 кВ составляло до 500 В ( $0,087U_{\phi}$ ).

### **Переходные процессы в сети с реактором РУОМ при «металлических» ОЗЗ**

Характерные осциллограммы процессов изменения напряжений фаз в сети 10 кВ, тока РУОМ-190/11 и тока «металлического» ОЗЗ приведены на **рис. 2**. На осциллограммах: 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 секунд, при опытах на объединенных секциях (1+2)СШ-10 кВ – в пределах 11,1-54,9 секунд. Разброс величин амплитудного фазного напряжения, при которых возникает ОЗЗ, оказался достаточно велик и составил  $(0,12-0,99)U_{\phi\max}$ .

Отметим, что на **рис. 2 б** показаны осциллограммы эксперимента с отключением фидера ( $I_C^{\text{фидера}} = 1,4 \text{ А}$ ) и последующим его включением через 20 секунд, что вызвало соответствующее повышение остаточного тока ОЗЗ на указанное время.



Действительный масштаб по оси «напряжение» – 4,86 кВ/дел

а) по оси « $I_{руом}$ » – 8,77 А/дел,  
по оси « $I_{озз}$ » – 1,39 А/дел

б) по оси « $I_{руом}$ » – 17,54 А/дел,  
по оси « $I_{озз}$ » – 2,78 А/дел

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

Параметры переходных процессов для опытов металлических ОЗЗ, осциллограммы которых представлены на **рис. 2-3**, приведены в **табл. 1**.

Таблица 1

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

Осциллограмма	<i>Рис. 3 а), рис. 4 а)</i>	<i>Рис. 3 б), рис. 4 б)</i>	
Исследуемая секция шин 10 кВ ПС «Городская»	2 СШ	1+2 СШ	
Длительность ОЗЗ, с	27,0	54,9 <sup>(2)</sup>	
Значение $U_{фmax}$ для фазы, замыкаемой на землю	0,13	0,88	
Время выхода РУОМ-190/11 на установившийся режим компенсации, с	6,0	4,5	
Время полного затухания тока РУОМ после отключения ОЗЗ, с	0,5	1,7	
Значение основной гармоники тока РУОМ-190/11 в	<i>полный</i>	7,46	18,91
	<i>активный</i>	0,11	0,52

«установившемся» режиме компенсации, А	реактивный	7,45	18,90	
Значение основной гармоники тока ОЗЗ в установившемся режиме компенсации, А	полный	1,32	1,82	3,20
	активный	0,40	1,14	1,14
	реактивный	1,26	1,42	2,99
Степень перекомпенсации по реактивным составляющим <sup>(1)</sup> , %		20,3	8,1	17,1

<sup>(1)</sup> Величину перекомпенсации (расстройку реактора) вычислим по формуле:

$$n = \frac{I_{OЗЗ\_ост\_реакт}^{50Гц}}{I_{OЗЗ\_полный}^{50Гц}} \cdot 100,$$

где  $I_{OЗЗ\_ост\_реакт}^{50Гц}$  - реактивная составляющая остаточного тока ОЗЗ, А

$I_{OЗЗ\_полный}^{50Гц}$  - величина полного тока ОЗЗ соответствующей секции или объединенных секций, А.

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

<sup>(2)</sup> Эксперимент с отключением фидера ( $I_C^{фидера} = 1,4$  А) и последующим его включением, это обуславливает соответствующее повышение остаточного тока ОЗЗ.

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  $I_{OЗЗ}^{(1+2)СШ} = 17,5$  А и достигает 24% при раздельной работе секций, когда система компенсации включена на 2СШ-10 кВ с емкостным током  $I_{OЗЗ}^{2СШ} = 6,2$  А.

#### • Анализ времени выхода на установившийся режим

Поскольку при проведении опытов искусственного 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. Однако осциллограммы переходных процессов при «металлических» ОЗЗ свидетельствуют, что в большинстве опытов апериодическая составляющая в токе РУОМ имеет небольшую величину и затухает в большинстве случаев за 3-5 периодов частоты 50 Гц (рис. 2 а).

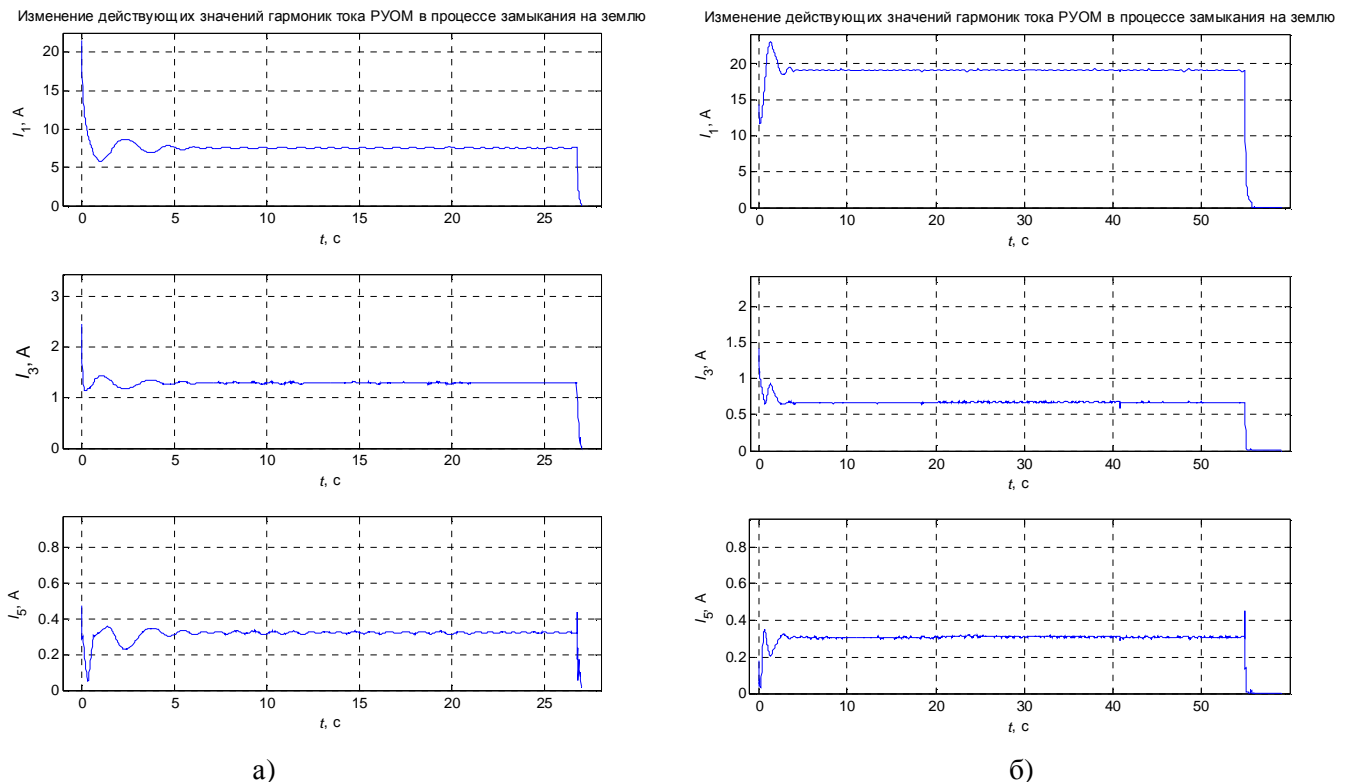
При угле пробоя, близком к 90 эл. градусам, когда замыкание на землю происходит при напряжении  $(0,98-0,99)U_{фmax}$ , апериодическая составляющая практически отсутствует. Тем не менее, время выхода тока РУОМ-190/11 на «установившееся» значение в этом случае не уменьшается и составляет 3,6-4,0 с, т.е. единицы секунд – как и в случаях, когда замыкание происходит при значительно меньшем напряжении на поврежденной фазе. Следовательно, значительное время выхода на установившийся режим компенсации реактора РУОМ – до 7,6 с в данной серии опытов – определяется не углом замыкания, а характеристиками магнитной системы ДГР с подмагничиванием и автоматического регулятора САНК.

Теоретически возможен 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. Судя по заключению разработчиков [2], начальное намагничивание реактора должно быть таким, чтобы обеспечить выход реактора РУОМ-190/11 на установившийся режим в течение 0,5-1,0 периода промышленной частоты.

Однако полученные в экспериментах данные (*табл.1, рис.2*), а именно – *затянутый* переходный процесс в токе реактора, свидетельствуют о вероятном несоблюдении указанных выше условий.

• *Анализ гармонического состава тока РУОМ*

В результате измерений тока ОЗЗ и тока дугогасящего реактора типа РУОМ-190/11 в различных режимах работы секций 1 и 2 СШ-10 кВ ПС «Городская» было отмечено наличие явно выраженных в сигнале тока РУОМ третьей и пятой гармоник (*рис. 3, соответствует опытам рис. 2*), которые значительно влияют на гармонический состав остаточного тока замыкания. При возрастании тока компенсации (*рис. 2 б*) искажение формы кривой данного тока за счет 3-й гармоники существенно снижается. На *рис. 3* показано, как меняется величина отдельных гармоник тока РУОМ-190/11 в процессе ОЗЗ.



*Рис. 3.* Характер изменения первой, третьей и пятой гармоник тока РУОМ-190/11 в процессе ОЗЗ при замерах в сети 2 СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская»

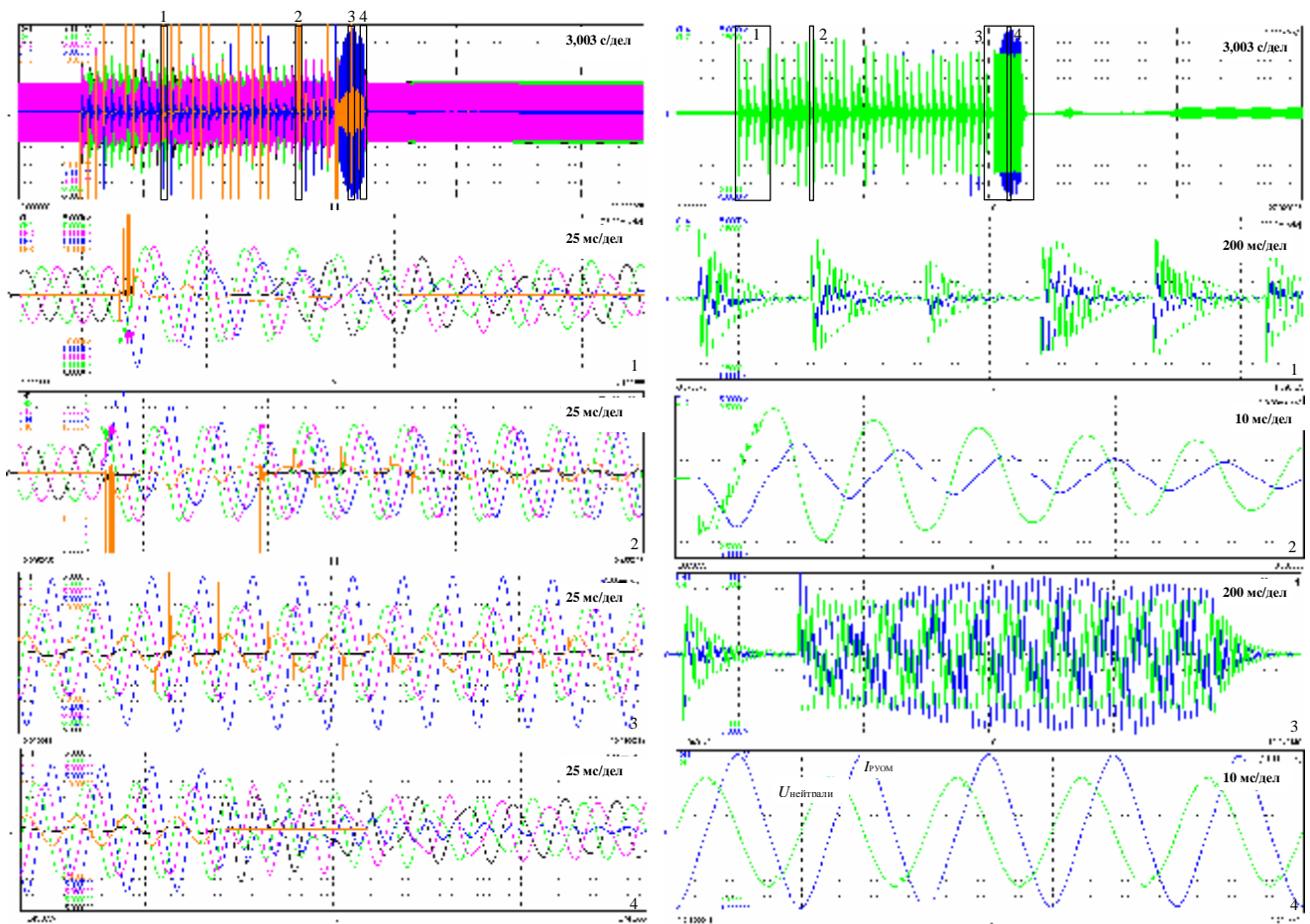
Результаты исследований, касающихся определения остаточного тока реактора в точке замыкания, которые представлены в [2], хорошо согласуются с полученными данными. Действительно, среднеквадратическое значение высших гармоник в токе РУОМ  $\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$  (в данном случае  $n=40$ ) для «малого» тока РУОМ  $I_{РУОМ\_2СШ}^{50Гц} = 7,5$  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  $I_{РУОМ\_1+2СШ}^{50Гц} = 19,0$  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  $I_{РУОМ\_активный}^{50Гц} = 0,1...0,6$  А.

## Переходные процессы в сети с реактором РУОМ 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.4 а* (интервал между последовательными зажиганиями дуги составляет 0,36 с). На *рис. рис. 4 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 – зеленый (CH7).

В установившихся режимах длительного горения (чередования циклов «зажигания-погасания») дуги ток в месте замыкания оказывается на 20-30% меньше тока реактора:  $I_{ОДЗ}^{ампл} = 31,8 \text{ А} < I_{РУОМ}^{ампл} = 41,9 \text{ А}$  (*рис. 4 а, растяжение №3*). Цель получения максимально возможных перенапряжений при ОДЗ за счет эскалационного роста в данных экспериментах не ставилась.



а) по оси « $I_{РУОМ}$ » – 8,77 А/дел,  
по оси « $I_{ОДЗ}$ » – 27,9 А/дел  
по оси « $U_{ф}$ » – 4,86 кВ/дел

б) по оси « $I_{РУОМ}$ » – 8,77 А/дел,  
по оси « $U_{см}$ » – 2,43 А/дел

*Рис. 4* Осциллограммы фазных напряжений, тока в цепи заземления РУОМ-190/11, тока в месте ОДЗ при замерах в сети 2 СШ-10 кВ ПС «Городская»

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.

Очевидно, индуктивный ток реактора с подмагничиванием определяется в большей степени уровнем намагничивания сердечника постоянным током, согласно величине заранее определенной уставки. В отдельных циклах «зажигания-погасания» дуги происходит дополнительное подмагничивание реактора РУОМ, в результате чего амплитуда  $I_{РУОМ}$  может увеличиваться на 15-20 А с соответствующим повышением степени перекompенсации.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что в режимах однофазного дугового замыкания на землю системы «РУОМ+САНК» не имеют каких-либо преимуществ перед традиционными дугогасящими реакторами со ступенчатым или плавным регулированием индуктивного тока.

## 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.
2. Реальная расстройка компенсации в сети с реактором РУОМ может существенно превышать заявленную в [5] величину  $\pm 2\%$ . Так, настройка реактора РУОМ-190/11 в исследованной сети 10 кВ оказалась весьма далека от резонансной: при «металлических» ОЗЗ степень перекompенсации составила 9...10 % при совместной работе секций 10 кВ и достигает 20...24 % на 2СШ при раздельной работе секций.
3. При изменении емкостного тока ОЗЗ в сети во время ОЗЗ настройка РУОМ не меняется и раскомпенсация может существенно увеличиться относительно исходной.
4. Зафиксировано наличие явно выраженных в сигнале тока РУОМ третьей и пятой гармоник с уровнем 1,5...17% (0,3...1,3 А) от сигнала промышленной частоты в зависимости от величины индуктивного тока. Суммарный ток искажения реактора РУОМ-190/11 (среднеквадратическое высших гармоник №2...№40) находится в диапазоне 0,8...1,4 А и с ростом тока реактора снижается.
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 раз относительно значения тока компенсации в установившемся режиме металлического ОЗЗ.

## Литература

1. Базылев Б.Н, Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Лурье А.И., Таджибаев А.И. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией 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. Базылев Б.И., Долгополов А.Г., Долгополов С.Г. Результаты сетевых испытаний и опыт эксплуатации дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием// Электро, №5. – 2007. – с. 31-34.
5. Руководство по эксплуатации системы автоматической настройки компенсации САНК-4.2-УХЛ4/ЮНИЯ.421.413.141Э. – Тольятти, 2007.