

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



**Ильиных Михаил Владимирович**  
Руководитель НИО ООО «ПНП БОЛИД»

## Постановка задачи

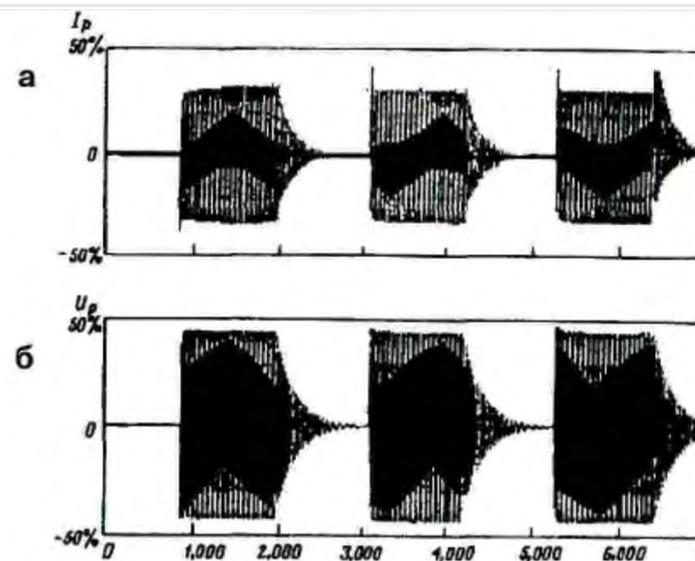
---

- Существует целый ряд работ, где подробно описывается принцип действия и технические характеристики ДГР с подмагничиванием типа РУОМ, рассматриваются основные принципы построения системы САНК – автоматики управления.
- 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, но экспериментальных исследований эффективности таких реакторов в действующих электрических сетях – а не на заводском стенде – чрезвычайно мало (!).
- Кроме стендовых опытов, нет реальных осциллограмм поведения РУОМа при дуговых замыканиях на землю.
- 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. Следует использовать эти наработки для исследования РУОМ.

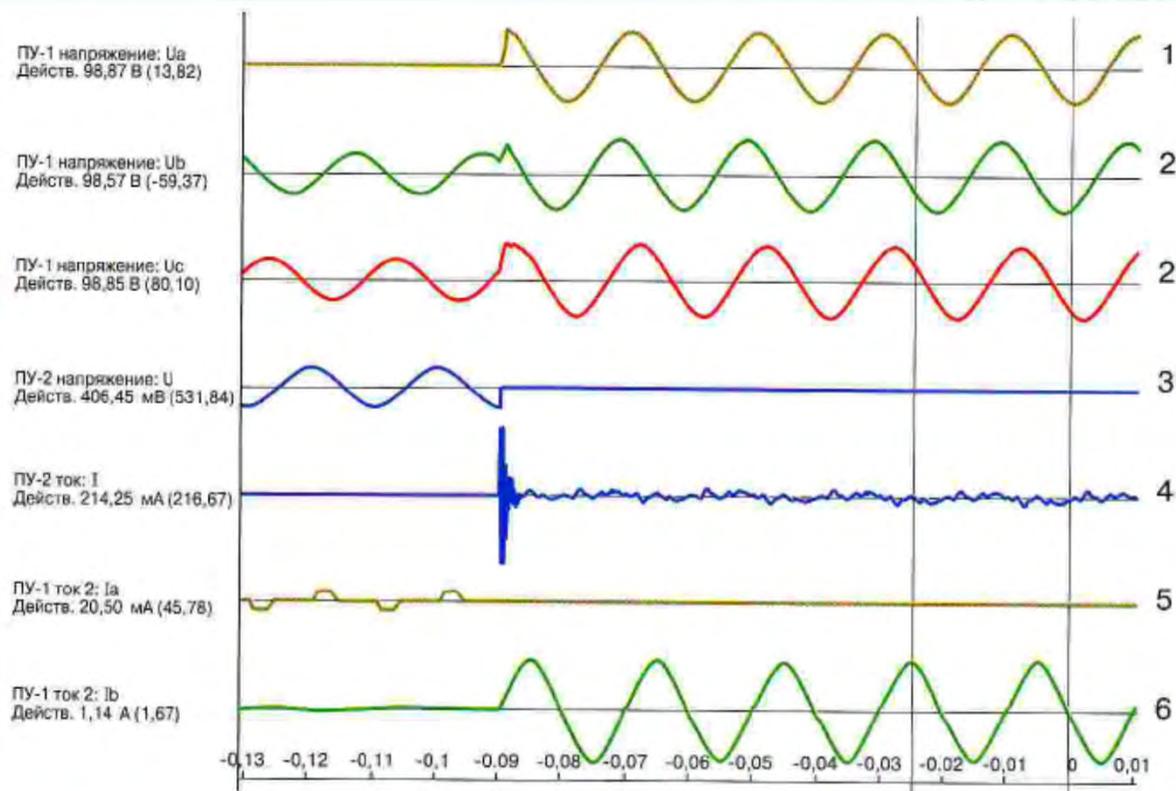
Базылев Б.И., Долгополов А.Г., Долгополов С.Г. Результаты сетевых испытаний и опыт эксплуатации дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием// Электро, №5. – 2007. – с. 31-34



**Рис. 1. Нелинейные искажения тока дугогасящего реактора РУОМ-480**  
1 — среднеквадратичное значение высших гармоник (ток искажения);  
2 — третья гармоника тока



**Рис. 2. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) реактора РУОМ-480/11√3 при повторяющихся замыканиях на землю**  
(получены на испытательном стенде ОАО «РЭТЗ Энергия»)



**Рис. 3. Осциллограммы (регистратор «Парма») однофазного металлического замыкания на землю на секции шин 10 кВ подстанции «Луговая» Вологодских электрических сетей с дугогасящим реактором РУОМ-480**

- 1 – напряжение нейтрали
- 2 – напряжения «здоровых фаз В и С;
- 3 – напряжение поврежденной фазы А
- 4 – ток однофазного замыкания на землю (действующее значение остаточного тока 3,7 А);
- 5 – ток предварительного подмагничивания реактора;
- 6 – ток компенсации РУОМ (действ. значение 23 А)

Подлежит проверке тезис безынерционного выхода на режим реактора РУОМ и возврата к требуемому току компенсации при неустойчивом горении дуги

## ***В реальной сети, а не на испытательном стенде – необходимо:***

---

- получить фактические величины времени выхода на установившийся режим компенсации реактора РУОМ при ОЗЗ;*
- определить гармонический состав тока реактора, величины явно выраженных гармоник, а также характер их изменения в течение ОЗЗ;*
- определить степень действительной раскомпенсации в сети с РУОМ, т.е оценить его работоспособность, при повторяющихся ОЗЗ.*

*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".*

---

## Автоматика управления РУОМ в настоящее время реализуется на микропроцессорной базе, на ПС «Городская» установлена ее новая модификация - САНК 4.2.

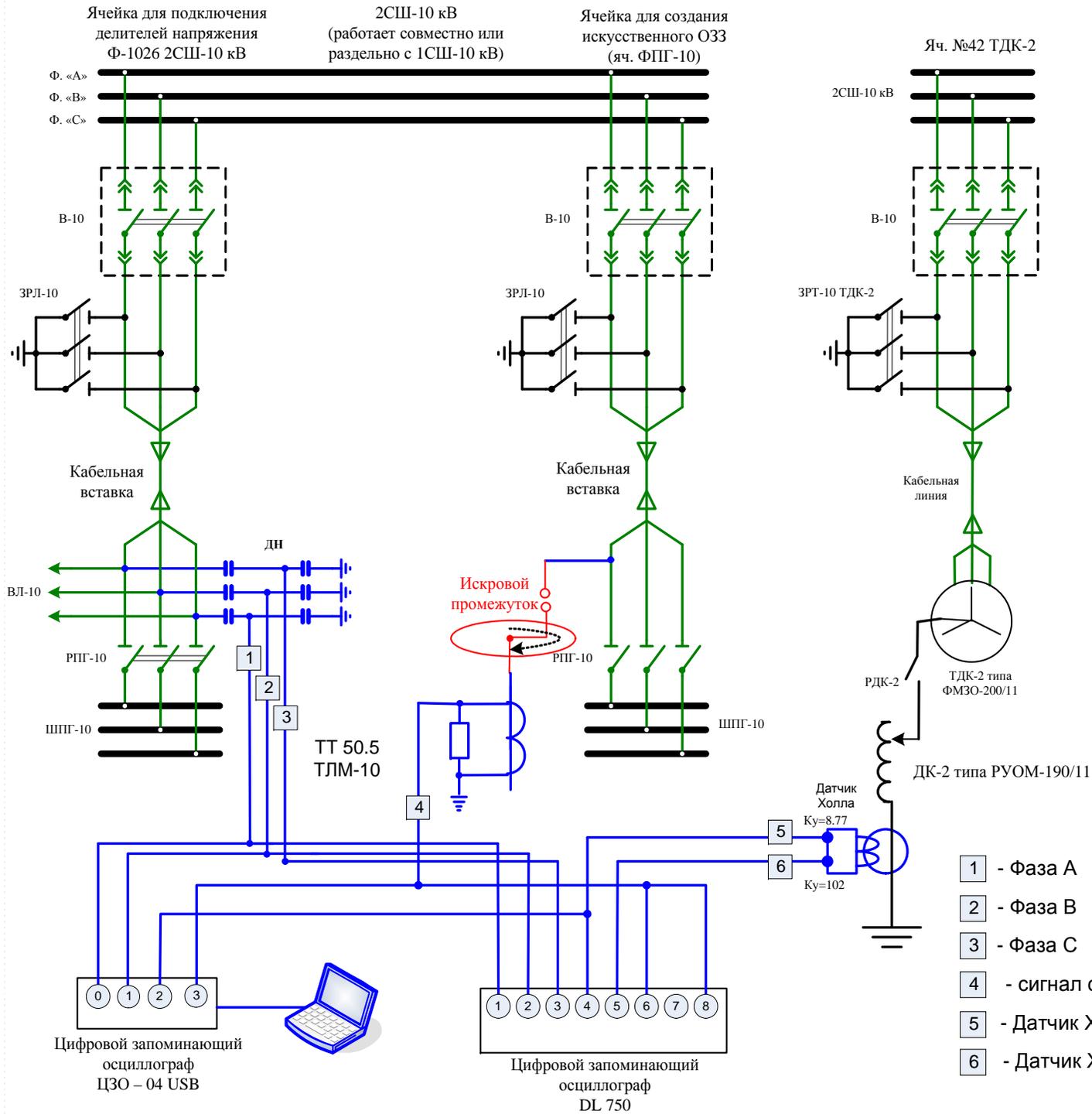
### САНК 4.2 выполняет следующие функции:



1. Постоянный автоматический анализ сети и определение ожидаемого тока замыкания на землю;
2. Безынерционный быстрый вывод реактора на необходимый ток компенсации в момент замыкания;
3. Поддержание заданного тока реактора во время замыкания;
4. Коррекция тока во время замыкания в зависимости от напряжения на реакторе;
5. Работа при наличии параллельно реактору РУОМ неуправляемого реактора (базового).
6. Самодиагностика с целью выявления ошибок в работе;
7. Работа в ручном режиме с любой уставкой тока.

*Для анализа работы сети предусмотрено сохранение информации обо всех замыканиях (с указанием даты и времени для каждого > 10 сек. (240 последних) и с указанием количества замыканий («клевков»)).*

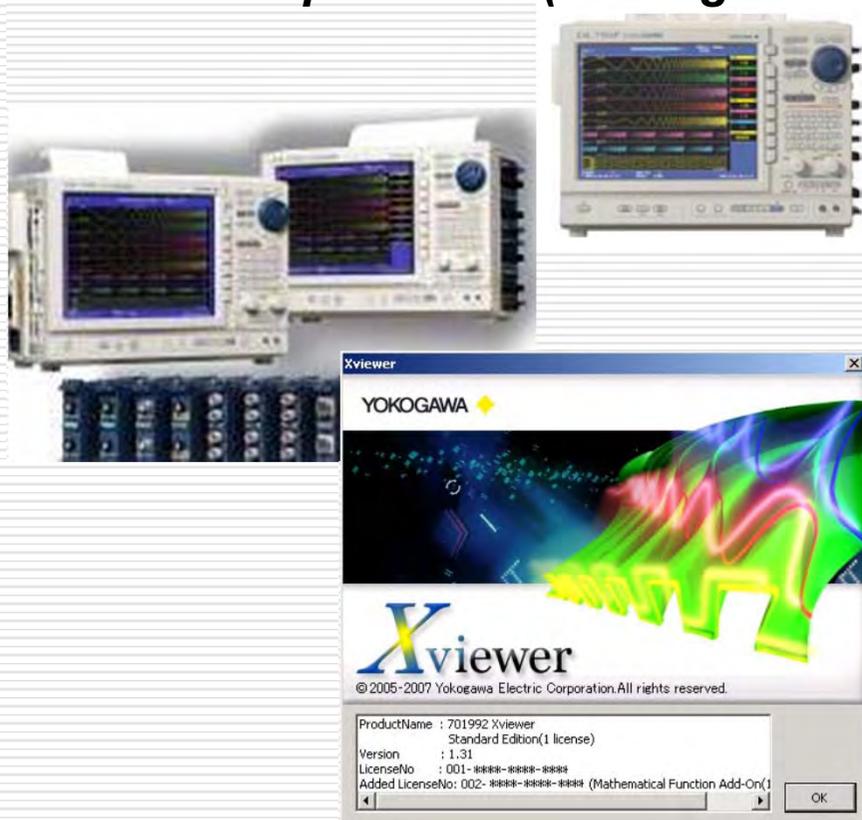
*Для анализа работы комплекса РУОМ-САНК ведется журнал ошибок (240 последних с указанием кода ошибки, краткого пояснения, дат и времени).*



**Схема подключения измерительной аппаратуры при экспериментальном исследовании эффективности системы компенсации в сети 10 кВ ПС Городская 110/10 кВ**

# Информационно-измерительная база

## DL750 Scope Corder («Yokogawa Electric Corporation», Япония)



Полоса частот, МГц	3 <sup>+2</sup>
Частота выборки на канал, ГВыб./с	0,01
Частота выборки эквивалентная	
Количество каналов аналоговых	16
Количество каналов логических	16
Память, Миллионов точек	50 DL750/DL750P: 1000 (опц.)
Вертикальное разрешение, бит	до 16
Вертикальная чувствительность	от 0,1мВ/дел <sup>+2</sup>
Погрешность измерения уровня, %	0,08 <sup>+2</sup>
Диапазон временной развертки	от 500 нс <sup>+2</sup>
Погрешность опорного генератора, x10 <sup>-6</sup>	50
Встроенный жесткий диск, Гигабайт	DL750/DL750P: 30 (опция) SL1400: 40 (опция)
Интерфейсы	FDD и Zip™ (DL750) PC card, USB, GP-IB, RS232, SCSI, Ethernet (опц.)
Встроенный принтер	DL750: 112 мм DL750P,SL1400: 210мм
Прикладные программы измерений	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пользовательские математические функции</li> <li>• 6 каналов цифровой обработки сигнала</li> </ul>
Экран	TFT, 10,4 дюйма, цветной, SVGA
Питание от постоянного тока 12 В	DL750
Габариты, мм	DL750: 355x250x180 355x250x225

# ЦЗО-04 (ЗАО «Руднев-Шиляев»)



## Общие характеристики

Вид и тип – осциллограф цифровой запоминающий ЦЗО-04;

Число каналов – 4;

Объем ОЗУ – 4 Мбайт на канал;

Объем предыстории – от 0 до 15/16 полного объема ОЗУ;

Число разрядов АЦП – 12;

Максимальная частота дискретизации АЦП – 100 МГц;

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ):

Полоса пропускания (-3 дБ) – не менее 100 МГц;

Активное входное сопротивление – от 0,95 до 1,05 МОм;

Входная емкость – не более 17 пФ

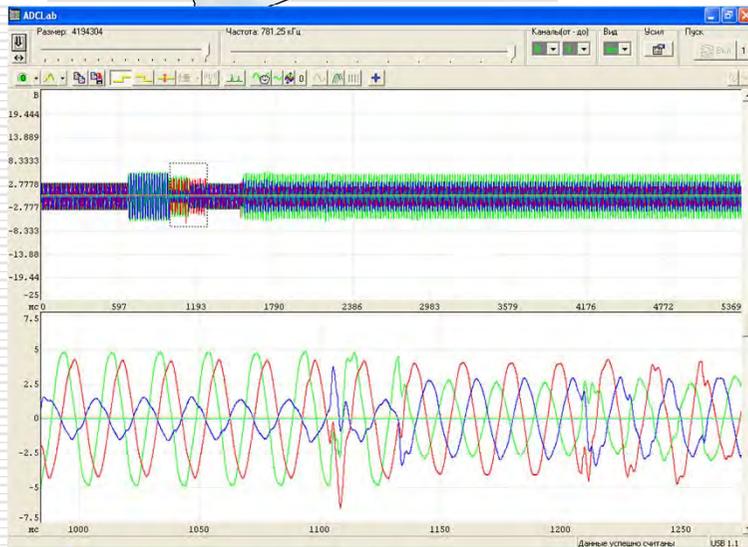
## Развертка

Коэффициент развертки - от 50 нс/дел до 50 мкс/дел

Режим работы - ждущий, однократный, автоколебательный;

Запуск развертки – нарастающей или спадающей частью сигнала;

Предел допускаемой основной погрешности измерения временных интервалов в процентах не более: 0,5 %;



## Делители напряжения 6-10 кВ



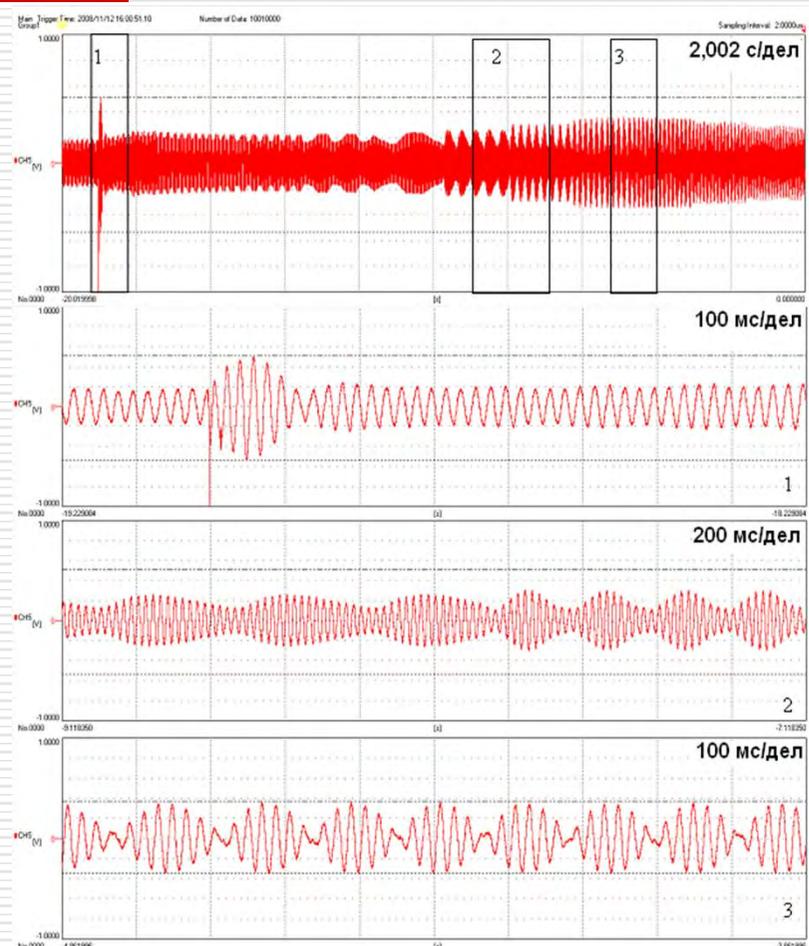
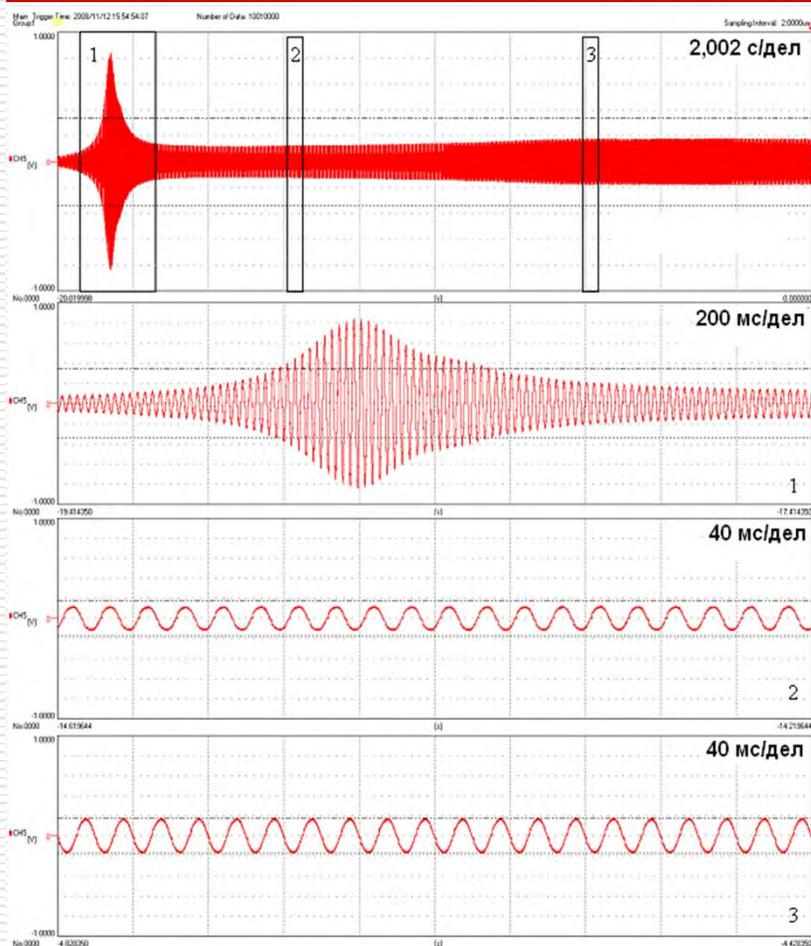
### Основные технические характеристики

1. Номинальное рабочее напряжение – 10 кВ.
2. Максимально допустимое входное импульсное напряжение (длительность импульса  $\tau_n = 0,1 \div 1000$  мкс, частота повторения импульсов  $f_n = 50$  Гц и  $t^\circ = 25^\circ C$ ) – 60 кВ.
3. Интервал рабочих температур  $-20 \div +40^\circ C$  при относительной влажности  $\leq 90\%$ .
4. Номинальный диапазон рабочих частот при неравномерности АЧХ  $\pm 0,5$  дБ  $-20 \div 2 \cdot 10^6$  Гц.
5. Коэффициент деления по напряжению в номинальном диапазоне рабочих частот  $K = 74$  дБ  $\pm 0,5$  дБ.
6. Активное сопротивление нагрузки  $\geq 1 \cdot 10^6$  Ом.
7. Емкость нагрузки  $\leq 1,5 \cdot 10^{-9}$  Ф.
8. Длина пути утечки внешней изоляции верхнего плеча  $\geq 250$  мм.
9. Рабочее положение делителя вертикальное.
10.  $tg\delta$  (тангенс угла диэлектрических потерь)  $\leq 0,002$  при  $25^\circ C$ .
11. Одноминутное испытательное напряжение ( $f = 50$  Гц) – 50 кВ.
12. Минимальная наработка на отказ  $\tau_{min} = 5000$  час.

## Расположение делителей напряжения и датчиков тока



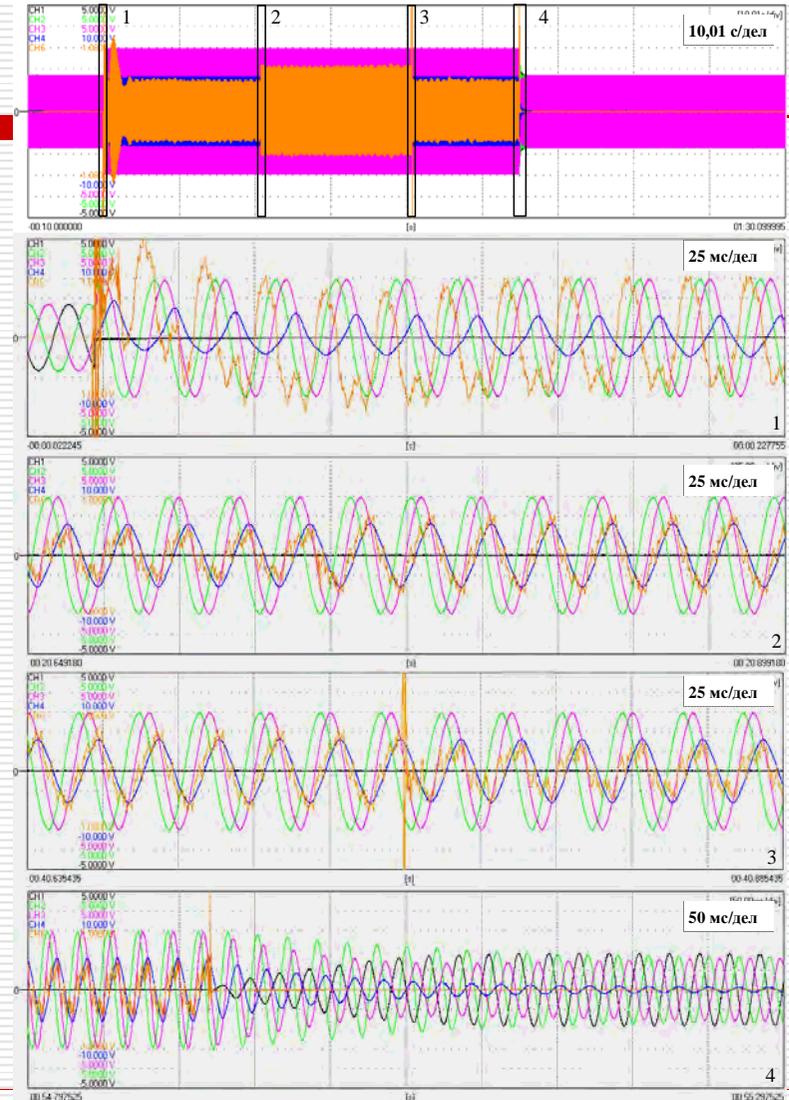
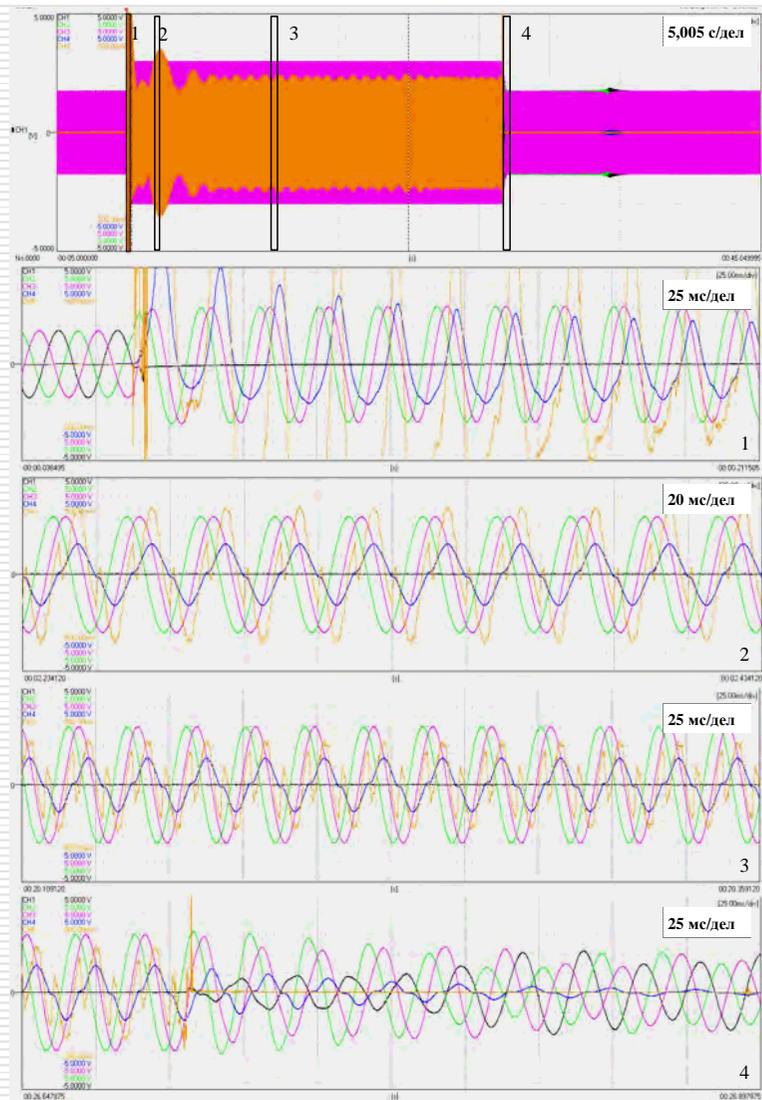
# Сигнал тока в цепи заземления РУОМ-190/11, зафиксированный в отсутствие в сети ОЗЗ при работе системы автоматической настройки после включения САНК 4.2 в работу



Действительный масштаб по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » – 0,2 А/дел



**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)**

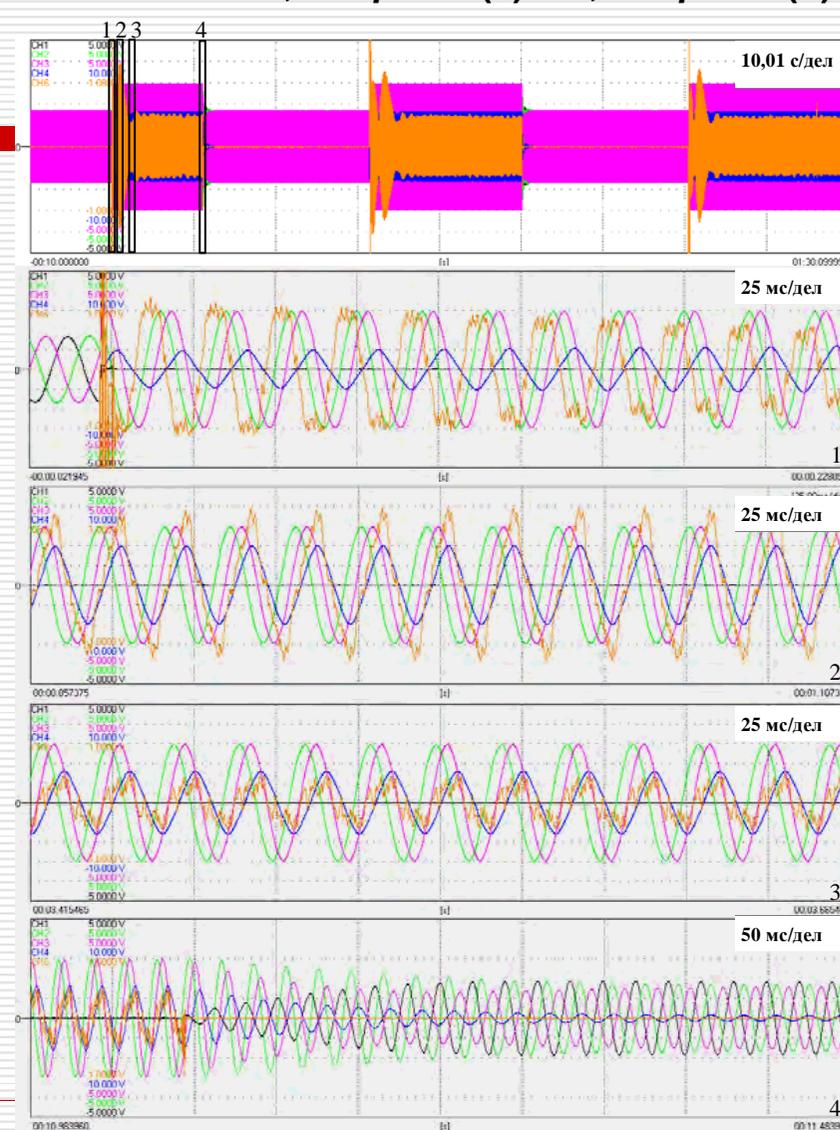
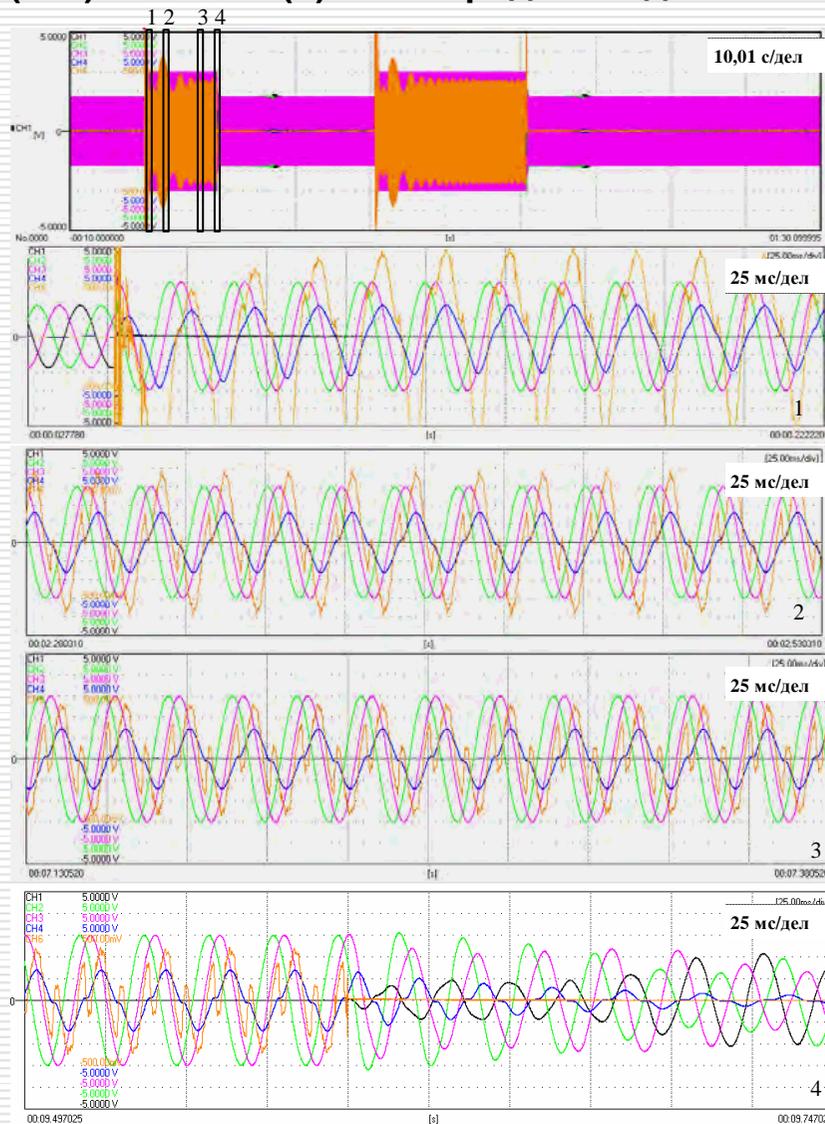


Действительный масштаб по оси «напряжение» – 4,86 кВ/дел

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

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



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

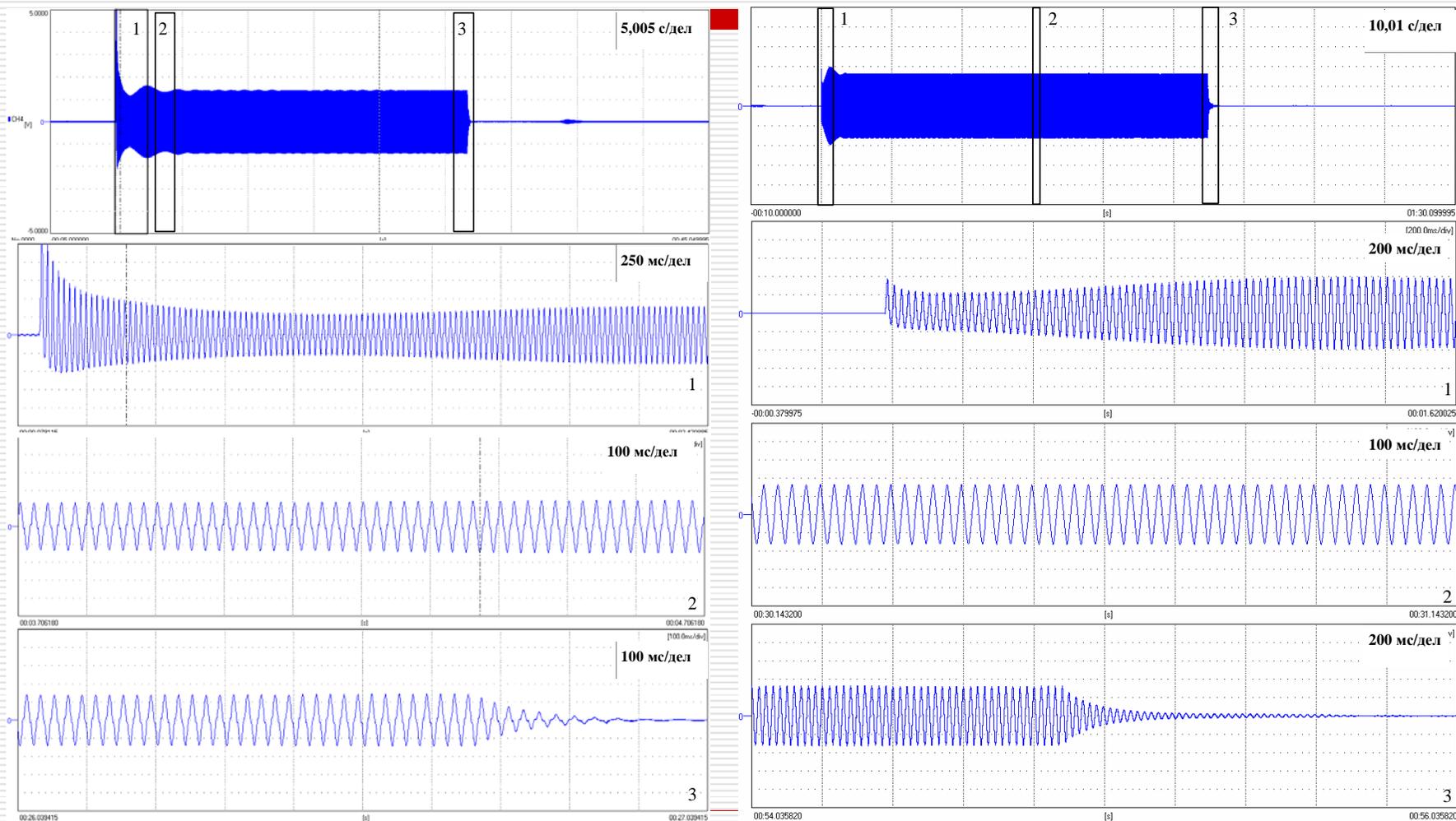
б) по оси « $I_{РУОМ}$ » – 17,54 А/дел,  
по оси « $I_{ОЗЗ}$ » – 2,78 А/дел

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

Осциллограмма		Слайд 14 а	Слайд 14 б	Слайд 15 а	Слайд 15 б
Исследуемая секция шин 10 кВ ПС «Городская»		2 СШ	1+2 СШ	2 СШ	1+2СШ
Длительность ОЗЗ, с		27,0	54,9	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	<i>полный</i>	7,46	18,91	7,67	19,08
	<i>активный</i>	0,11	0,52	0,12	0,55
	<i>реактивный</i>	7,45	18,90	7,67	19,07
Значение основной гармоники тока ОЗЗ в установившемся режиме компенсации, А	<i>полный</i>	1,32	1,82	3,20	1,97
	<i>активный</i>	0,40	1,14	1,14	0,41
	<i>реактивный</i>	1,26	1,42	2,99	1,60
Степень <u>перекомпенсации</u> по реактивным составляющим, %		20,3	8,1	17,1	23,9

# Определение времени выхода РУОМ на установившийся режим компенсации

Осциллограммы тока в цепи заземления РУОМ-190/11 при замерах в сети 2 СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская»



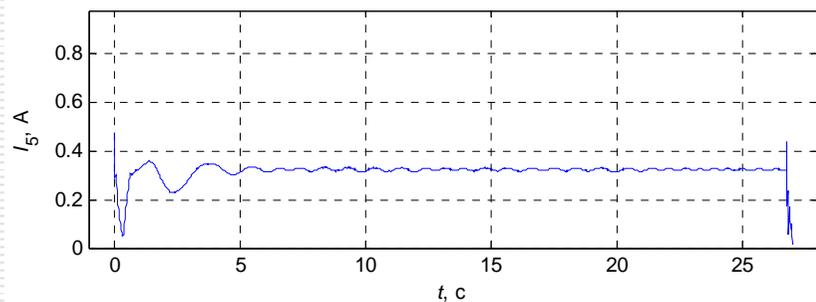
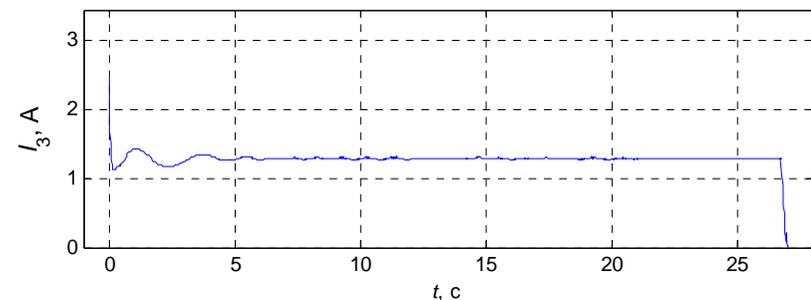
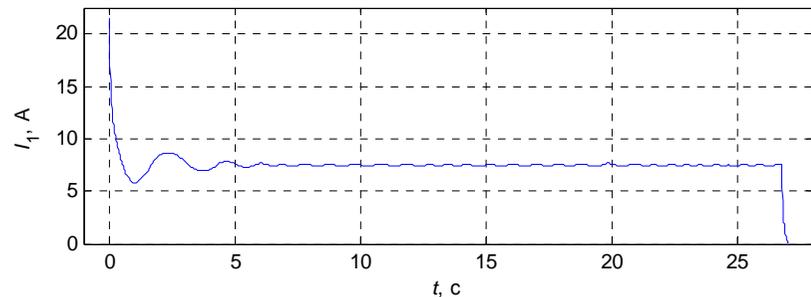
а) масштаб по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » – 8,77 А/дел

б) масштаб по оси « $I_{\text{РУОМ}}$ » – 17,54 А/дел<sup>17</sup>

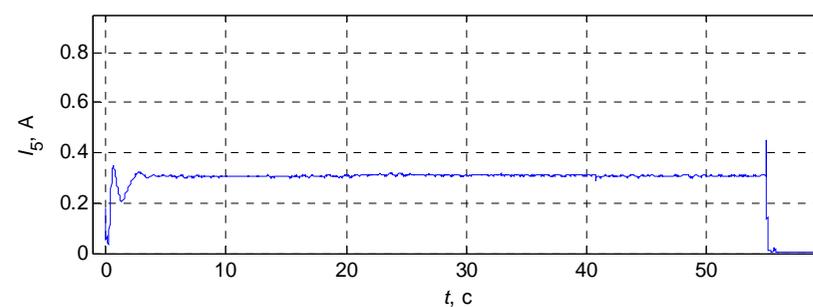
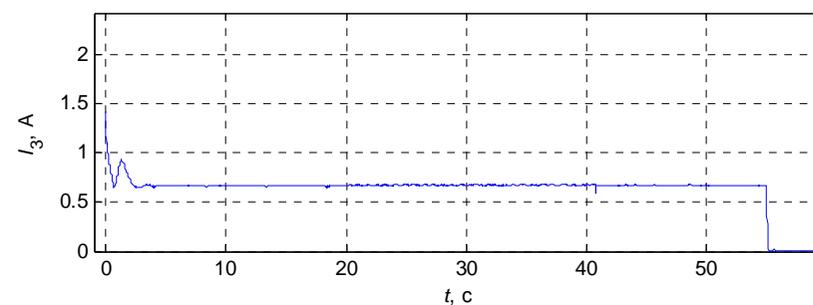
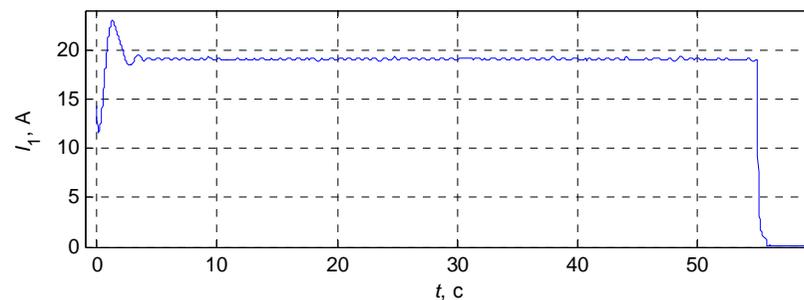
# Исследование гармонического состава тока РУОМ

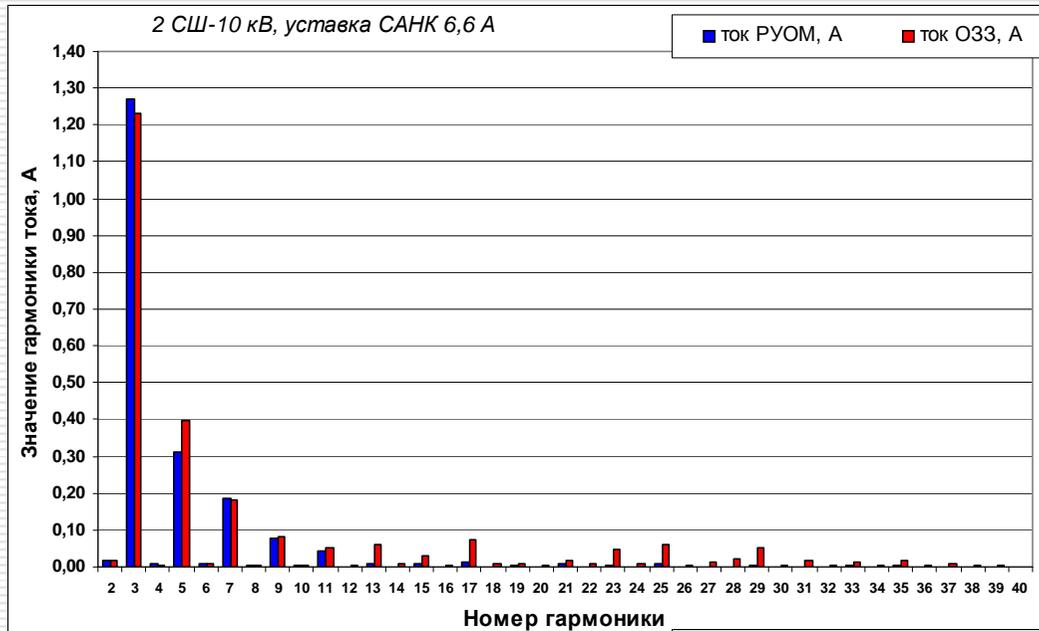
Характер изменения первой, третьей и пятой гармоник тока РУОМ-190/11 в процессе ОЗЗ при замерах в сети 2 СШ-10 кВ (а) и (1+2)СШ-10 кВ (б) ПС «Городская»

Изменение действующих значений гармоник тока РУОМ в процессе замыкания на землю



Изменение действующих значений гармоник тока РУОМ в процессе замыкания на землю





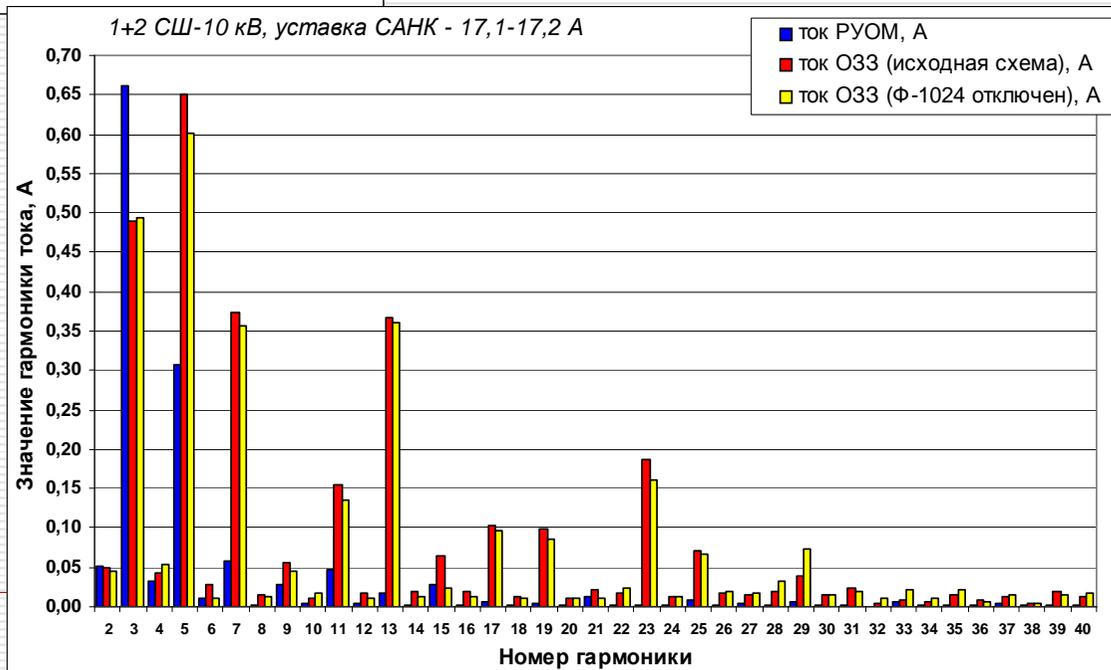
Действующие значения величин гармоник тока РУОМ-190/11 и остаточного тока ОЗЗ для 2 СШ сети 10 кВ ПС «Городская»

$$I_{1РУОМ} = 7,65 \text{ А}; I_{1ОЗЗ} = 1,51 \text{ А}$$

Действующие значения величин гармоник тока РУОМ-190/11 и остаточного тока ОЗЗ для 1+2 СШ сети 10 кВ ПС «Городская» с изменением конфигурации сети: **отключили Ф-1024, ток РУОМ не изменился!**

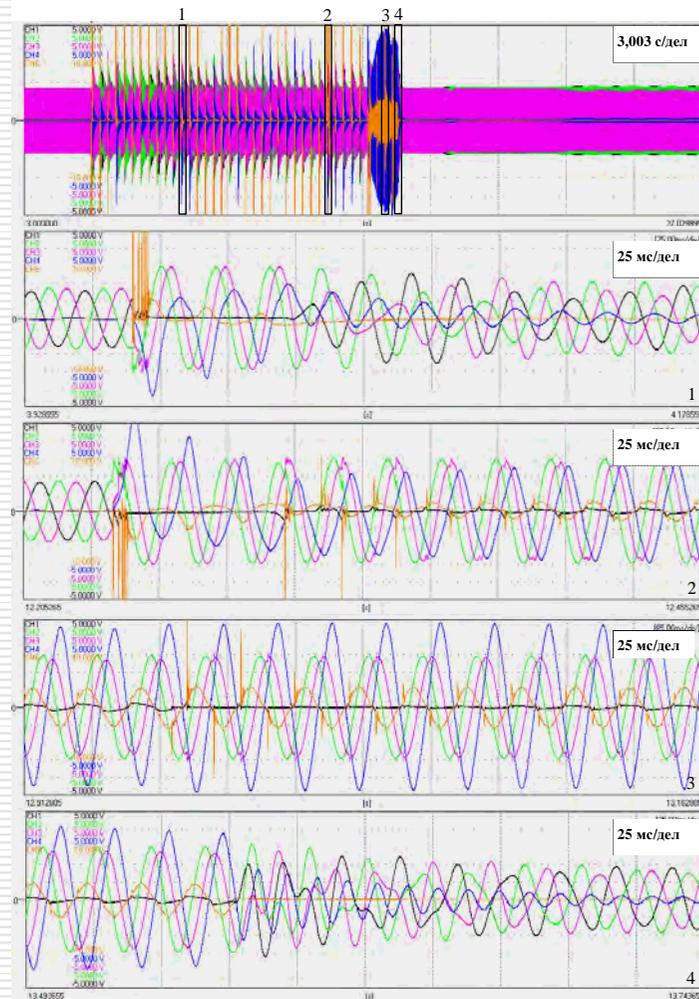
$$I_{1РУОМ} = 19,0 \text{ А} \quad I_{1ОЗЗ}^{исх.схема} = 1,89 \text{ А}$$

$$I_{1ОЗЗ}^{откл.Ф-1024} = 3,15 \text{ А}$$

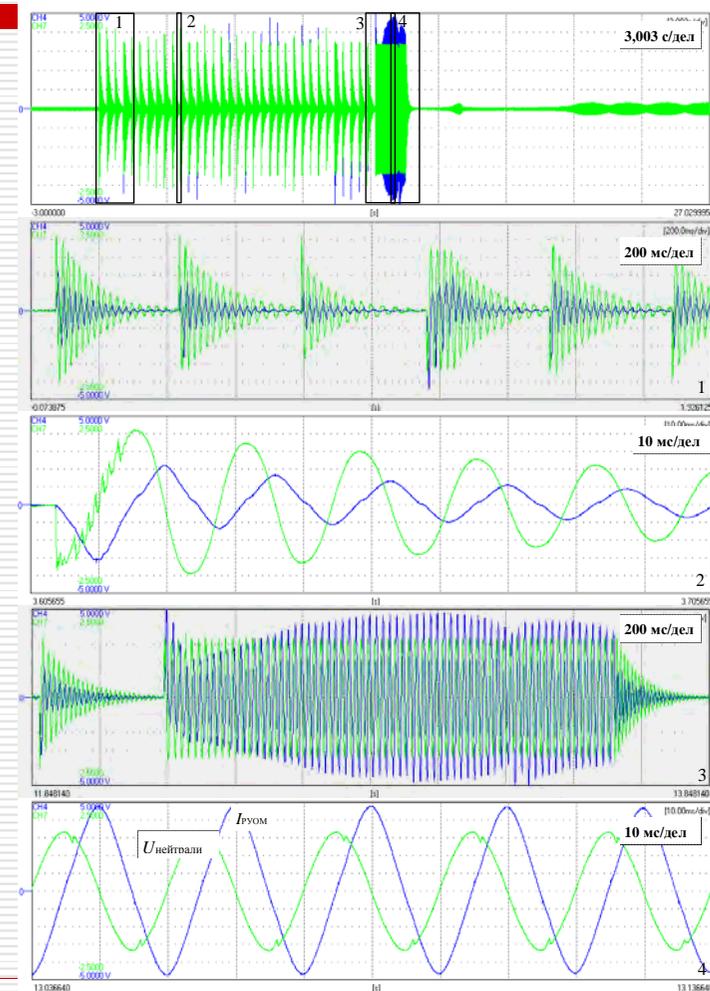


# Анализ осциллограмм переходных процессов при дуговых ОЗЗ

Осциллограммы фазных напряжений, тока в цепи заземления РУОМ-190/11, тока в месте ОДЗ и напряжения на нейтрали при замерах в сети 2 СШ-10 кВ ПС «Городская», интервал между последовательными зажиганиями дуги 0,36 с

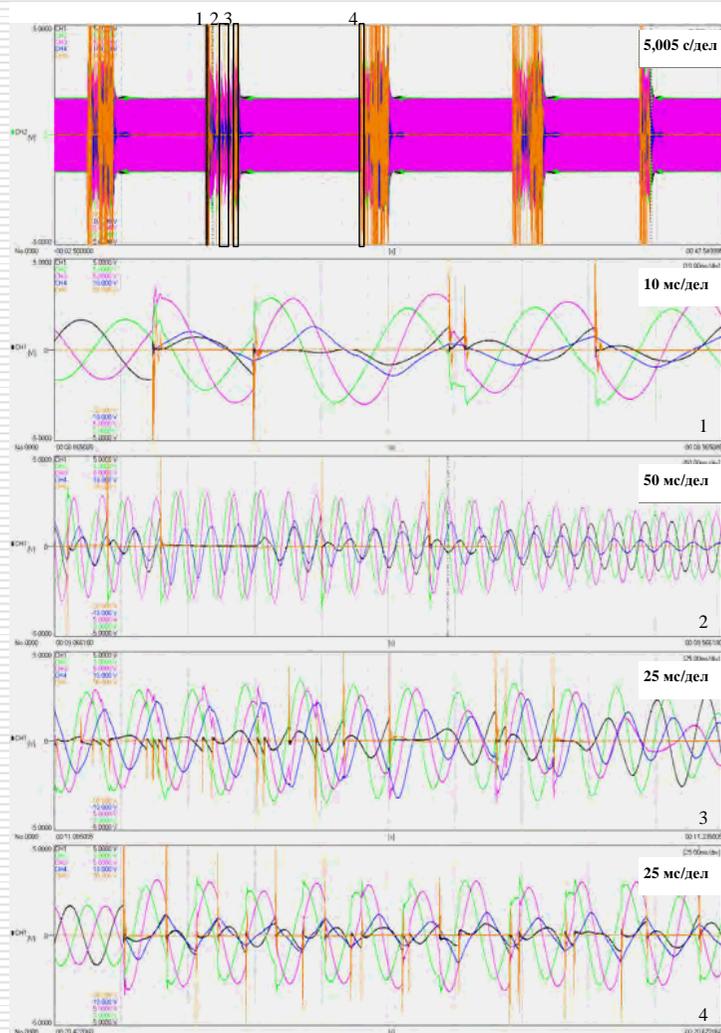


а) по оси « $I_{руом}$ » – 8,77 А/дел,  
 по оси « $I_{одз}$ » – 27,9 А/дел  
 по оси « $U_{ф}$ » – 4,86 кВ/дел

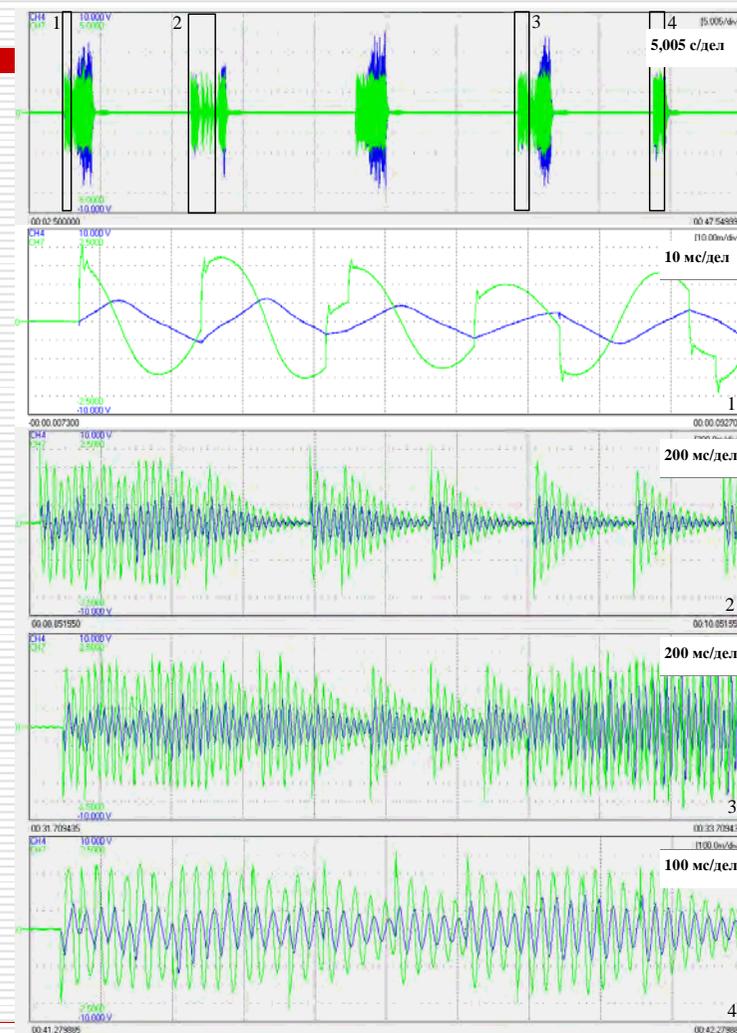


б) по оси « $I_{руом}$ » – 8,77 А/дел, 20  
 по оси « $U_{см}$ » – 2,43 А/дел

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



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 (5,005 с/дел)  
 по оси « $U_{\text{СМ}}$ » – 4,86 А/дел (10,100,200 мс/дел)

# ВЫВОДЫ

---

- ❖ **Время выхода РУОМ-190/11 на установившийся режим компенсации при ОЗЗ может составлять до 6-8 секунд и определяется не углом замыкания, а характеристиками комплекса «РУОМ-САНК».** *Чем сильнее «нагружен» РУОМ, т.е. 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.*
- ❖ **Реальная расстройка компенсации в сети с реактором РУОМ может существенно превышать заявленную в Инструкции САНК величину  $\pm 2\%$ . При «металлических» ОЗЗ в данной сети степень перекомпенсации составила 9...10 % при совместной работе секций 10 кВ и 20...24 % при раздельной работе секций.**
- ❖ **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 ОЗЗ в КЗ.**
- ❖ **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 РУОМа.*

## Поведение РУОМ при горении перемежающейся дуги

---

- ✓ В режиме горения перемежающейся однофазной дуги имеет место значительное увеличение тока реактора РУОМ – в 2,2...3,9 раз относительно значения тока компенсации в установившемся режиме металлического ОЗЗ.
- ✓ В отдельных циклах «зажигания-погасания» дуги происходит дополнительное подмагничивание реактора РУОМ, в результате чего амплитуда тока 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.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

---