

УДК 621.311.4

**М.В. Ильиных, А.И. Ширковец, А.А. Кузьмин,
И.Е. Волокитин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
И ДУГОВЫХ ОЗЗ В УСЛОВИЯХ РЕЗИСТИВНО-
ЗАЗЕМЛЁННОЙ И ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛИ
В СЕТИ 6 КВ ПС «КАРЬЕРНАЯ-2»
ОАО «РАЗРЕЗ ТУГНУЙСКИЙ»**

Представлены результаты инструментальных исследований переходных процессов при физическом моделировании дуговых и «металлических» замыканий на землю в действующей сети 6 кВ электроснабжения угольного разреза, проведенные в 2010 г. с целью проверки эффективности режима резистивного заземления нейтрали. На основе предлагаемой схемы измерений [1] впервые в сети горнорудного предприятия осуществлены полномасштабные испытания высоковольтного резистора в сериях замыканий на землю с записью высокочастотных переходных процессов. Представлены цифровые осциллограммы тока замыкания и фазных напряжений, а также результаты их гармонического анализа.

Ключевые слова: «Металлическое», дуговое однофазное замыкание на землю, эскалация перенапряжений, резистивно-заземленная нейтраль, гармоники тока.

Постановка задачи

Специфика тяжелых условий эксплуатации электрооборудования и электрических сетей угольных разрезов при ведении горных работ способствует возникновению большого числа повреждений.

Значительная часть повреждений в высоковольтных сетях промышленных предприятий приходится на долю однофазных замыканий на землю. Для электрических сетей угольных разрезов эта доля составляет 60-90 % от общего числа повреждений. В условиях эксплуатации систем электроснабжения угольных разрезов бывают случаи возникновения многоместных повреждений электрооборудования, приводящих к отключению питания электроприемников нескольких участков или даже целого разреза. Как было установлено, эти явления связаны с перемежающейся дугой в режимах однофазного замыкания на землю, которая сопровождается перенапряжениями, охватывающими всю электрически связанную сеть.

Наиболее уязвимым элементом сетей 6, 10 кВ при воздействии внутренних перенапряжений являются кабели и места соединения кабелей (до 60 % ОДЗ). В воздушно-кабельных сетях значительную долю составляют повреждения опорных и проходных изоляторов (20 %) и коммутационных аппаратов (более 20 %).

Однофазные замыкания на землю представляют значительную опасность для людей, установок и сетей. Опасность для людей связана с появлением на металлических нетоковедущих частях электрооборудования, элементах заземляющих устройств, поверхности земли в местах ОЗЗ и в непосредственной близости от них напряжений, по величине пропорциональных току замыкания на землю.

Для уменьшения вероятности поражения электрическим током и ограничения длительности существования ОЗЗ применяют защиту от однофазных замыкания на землю, которая в соответствии с Едиными правилами безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом (ЕПБ) и Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) должна устанавливаться на всех линиях напряжением выше 1000 В, отходящих от подстанций и питающих карьерные передвижные электроустановки и другие потребители. Защита должна действовать на отключение поврежденной линии без выдержки времени (первая ступень).

Невыполнение указанного требования ЕПБ и ПУЭ или отказ защиты приводят к возникновению аварийных ситуаций, характеризующихся повышенной опасностью поражения людей и повреждения электроустановок.

Все это обуславливает необходимость применения мероприятий по ограничению перенапряжений при однофазном дуговом замыкании на землю (ОДЗ) и повышения чувствительности и селективности работы защит.

Расчетное обоснование и установка резистора

Для ряда карьерных сетей 6-10 кВ подстанций угольных разрезов компании «СУЭК» был проведен комплекс расчетов по компьютерному моделированию процессов при однофазных замыканиях на землю.

Проведенный комплекс расчетов переходных процессов при ОДЗ в сети 6-10 кВ подстанций Разреза Тугнуйский показал:

1. В сети 6, 10 кВ карьерных подстанций в результате ОДЗ возникают опасные перенапряжения, уровень которых может достигать величины $(3,2 \div 3,4)U_{\phi}$.

2. После ликвидации однофазного замыкания возникают феррорезонансные процессы. В зависимости от величины емкостного тока ОЗЗ и характеристик сети феррорезонансные процессы носят устойчивый либо неустойчивый затухающий характер.

3. Даже при отсутствии устойчивого феррорезонансного процесса при ОДЗ в сети 6-10 кВ ПС, в обмотках высокого напряжения ТН возникают броски тока величиной до 1-2 А, которые значительно превышают допустимые значения тока по термической стойкости, оцениваемые интервалом 0,2...0,3 А. Кроме того, затухание феррорезонансных процессов может проходить достаточно долго, что приводит в отдельных случаях к ложному срабатыванию защит от ОЗЗ не поврежденных присоединений.

4. Необходимо реализовать мероприятия по ограничению уровня перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю до величины $(2,4 - 2,5) U_{\phi}$ и подавлению резонансных явлений.

5. Эффективно ограничить перенапряжения при ОДЗ, избавиться от резонансных явлений и обеспечить правильное функционирование защит от однофазных замыканий на землю в сети 6-10 кВ карьерных подстанций можно путем резистивного заземления нейтрали сети.

Для карьерных подстанций Разреза Тугнуйский были разработаны проектные решения по выполнению резистивного заземления нейтрали сети подстанций 6 кВ.

Первым этапом работ по переходу к резистивному заземлению нейтрали сетей подстанций 6-10 кВ явилась установка резистора в нейтраль сети 6 кВ ПС «Карьерная-2».

После установке резистора в нейтраль сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» были проведены экспериментальные исследования процессов при металлических и дуговых ОЗЗ в условиях резистивно-заземлённой и изолированной нейтрали.

Схема экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования процессов изменения фазных напряжений и тока однофазного замыкания на землю при «металлическом» однофазном замыкании на

землю (ОЗЗ) и однофазном дуговом замыкании на землю (ОДЗ) в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский» при различных режимах заземления нейтрали сети проводились с целью:

а) измерения величины тока ОЗЗ, определение его гармонического состава;

б) определения уровней перенапряжений, характера изменения процессов при однофазных замыканиях на землю для различных режимов заземления нейтрали (изолированная нейтраль сети и резистивно-заземленная нейтраль сети);

с) оценки эффективности резистивного заземления нейтрали сети.

Схема подключения измерительной аппаратуры для регистрации тока ОЗЗ и фазных напряжений при однофазных замыканиях на землю приведена на рис. 1. Общие методические положения измерений тока ОЗЗ и напряжений на фазах с осциллографированием переходных и установившихся процессов приведены в [1, 2].

На рис. 2 приведен внешний вид КРУ-6 кВ, "нейтралеобразующего" устройства типа ФМЗО, подключенного с помощью кабельной вставки через разъединитель к секции КРУ-6 кВ, резистора РЗ-800-15-6, подсоединенного к нейтральной точке ФМЗО, показано подключение делителей напряжения, ИП и трансформатора к фазным проводам отходящей линии Ф4.

В сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский» выполнены следующие эксперименты:

– металлическое ОЗЗ в режиме резистивно-заземлённой нейтрали;

– металлическое ОЗЗ в режиме изолированной нейтрали;

– ОДЗ в режиме резистивно-заземлённой нейтрали;

– ОДЗ в режиме изолированной нейтрали.

Результаты опытов «металлических» ОЗЗ

Осциллограммы тока ОЗЗ и фазных напряжений в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский» приведены на рис. 3 – 6. Во всех экспериментальных опытах замыкание проводилось на фазе А. На осциллограммах: синий (канал 1) – напряжение фазы А; зелёный (канал 2) – напряжение фазы В; красный (канал 3) – напряжение фазы С; чёрный (каналы 4) – ток ОЗЗ.

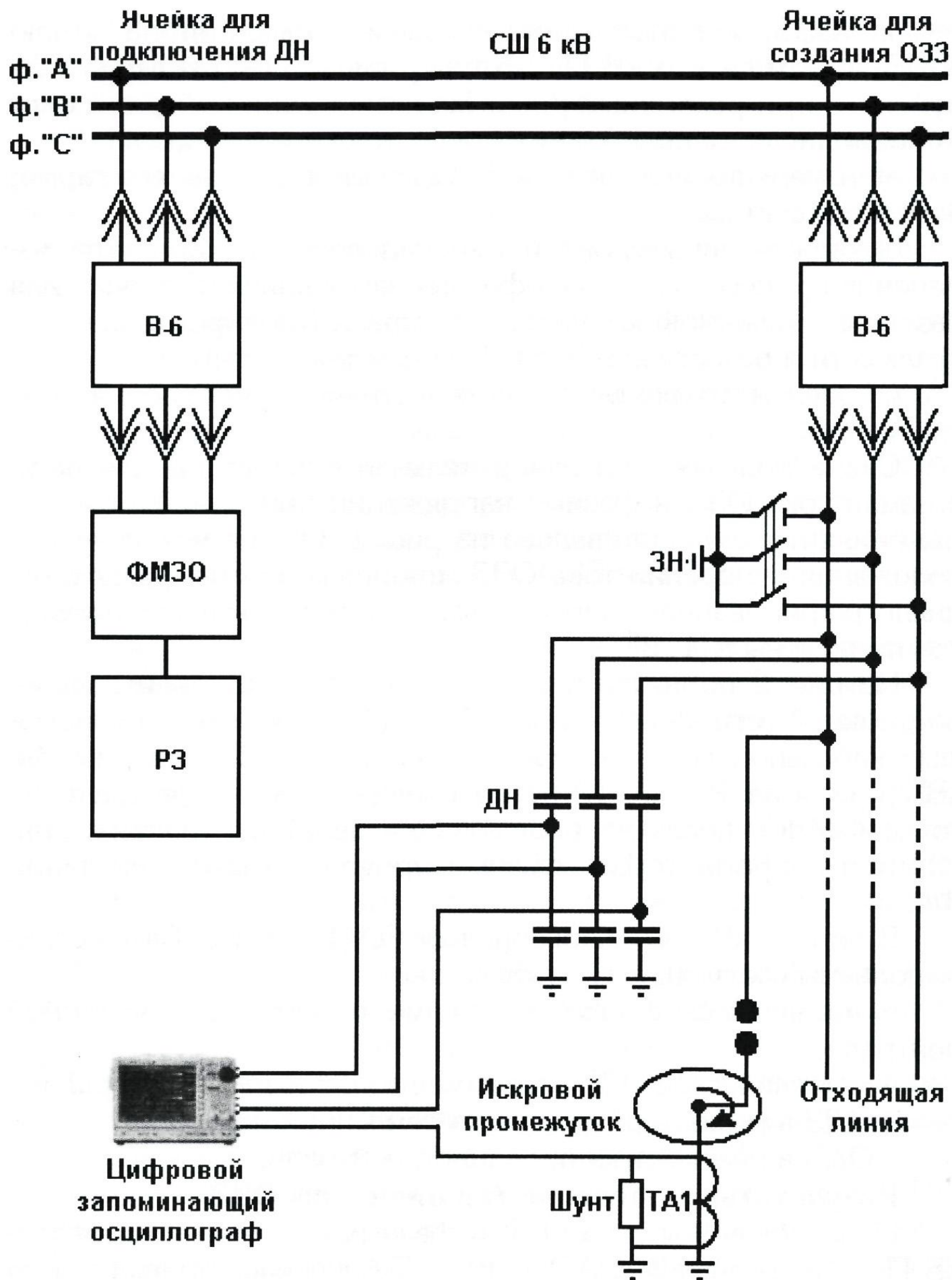


Рис. 1. Схема подключения измерительной аппаратуры при проведении экспериментальных исследований процессов однофазных замыканий на землю в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский»

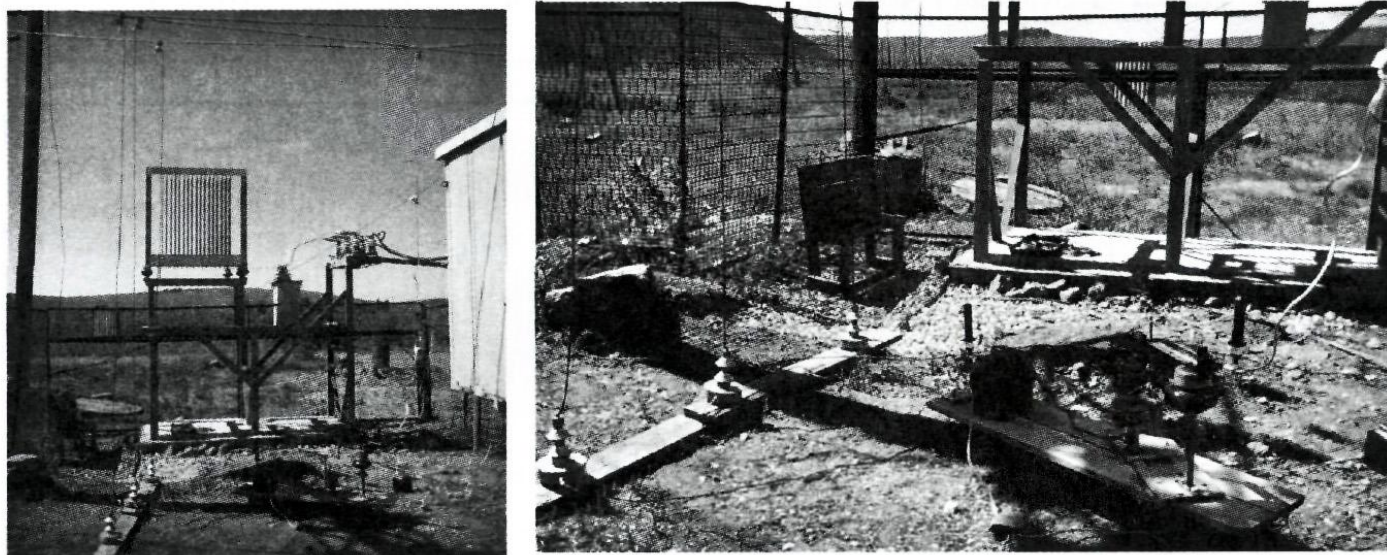


Рис. 2. Внешний вид КРУ-6 кВ, ФМЗО, резистора для заземления нейтрали РЗ-800-15-6 (а) и подключение оборудования для измерения фазных напряжений и тока ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» (б)

Таблица 1

Наиболее выраженные гармоники в токе ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2»

Режим нейтрали	№ гармоники	среднеквадратические значения гармоник №2...40 в % от основной
Резистивно-заземленная	3, 5, 7, 23, 25, 37, 39	12,9 %
Изолированная	3, 5, 7, 9, 11, 21, 23, 25, 35, 37, 39	27,2 %

В результате спектрального анализа был выделен ряд гармоник, наиболее выраженных в токе замыкания на землю в сети 6 кВ ПС "Карьерная-2" в режимах с резистивно-заземленной и изолированной нейтралью (рис. 7).

В табл. 1 представлены наиболее выраженные гармоники и среднеквадратические значения гармоник №2...40 в % от основной в токе ОЗЗ в различных режимах заземления нейтрали.

Таким образом, проведенный анализ в сети 6 кВ ПС "Карьерная-2" показал, что в токе ОЗЗ присутствуют высшие гармоники нечетного ряда, состав и амплитуда которых зависит от режима заземления нейтрали.

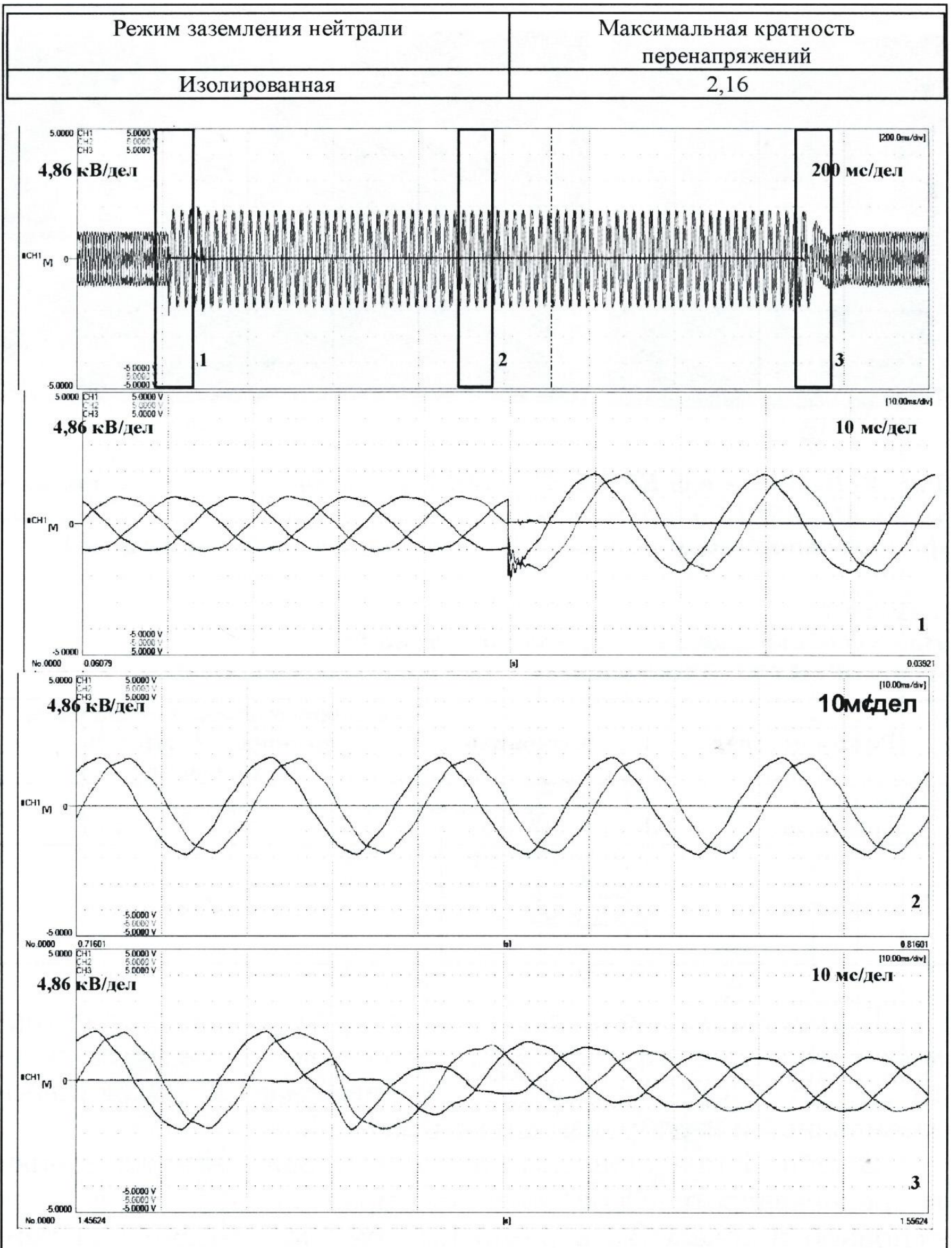
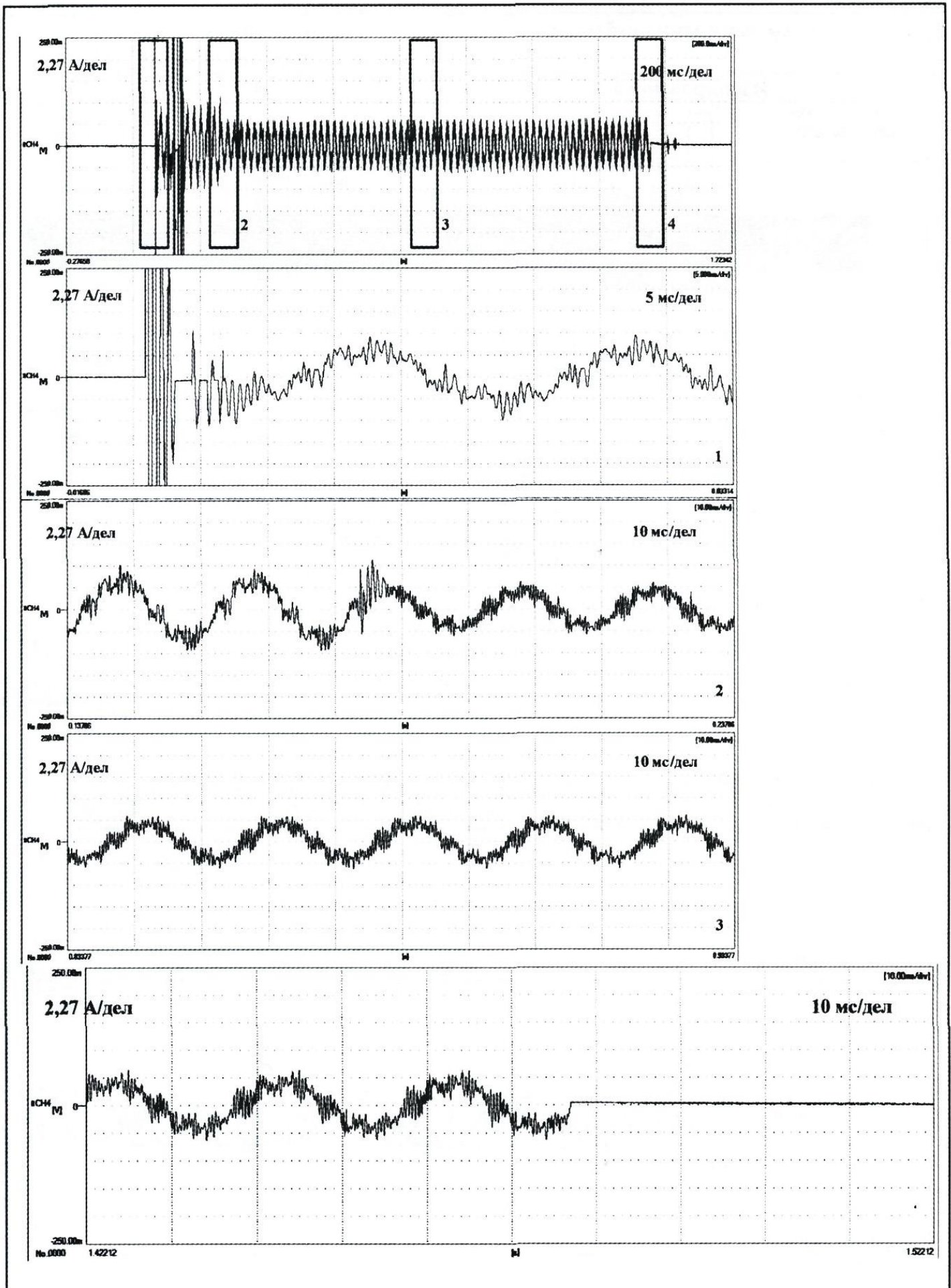
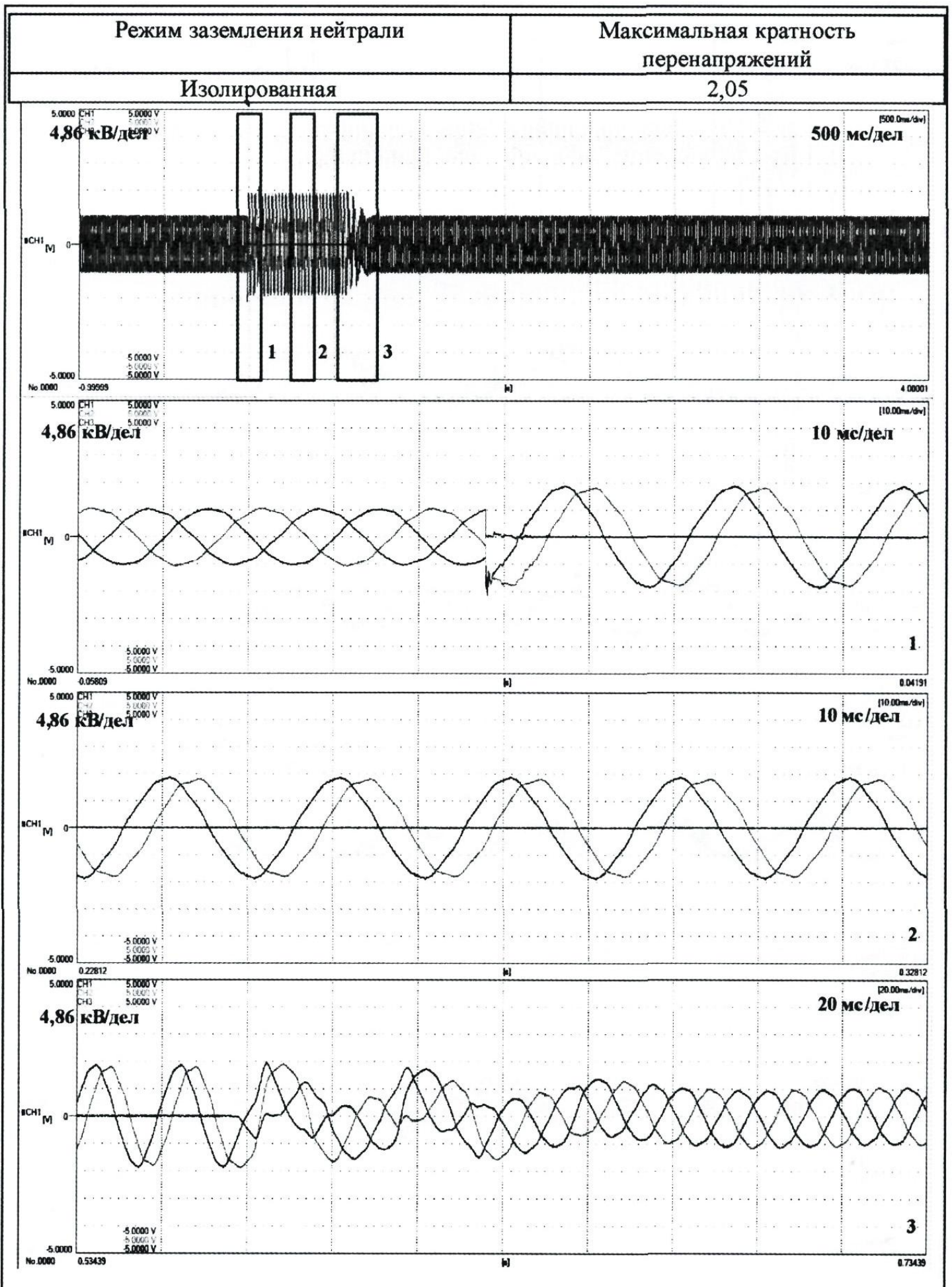


Рис. 3. Осциллограммы фазных напряжений в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский». Нейтраль сети изолированная. Опыт «металлического» ОЗЗ №5



**Рис. 4. Осциллограммы тока ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский». Нейтраль сети изолирована
Опыт «металлического» ОЗЗ №5**



**Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский». Нейтраль сети изолированная
Опыт «металлического» ОЗЗ №7**

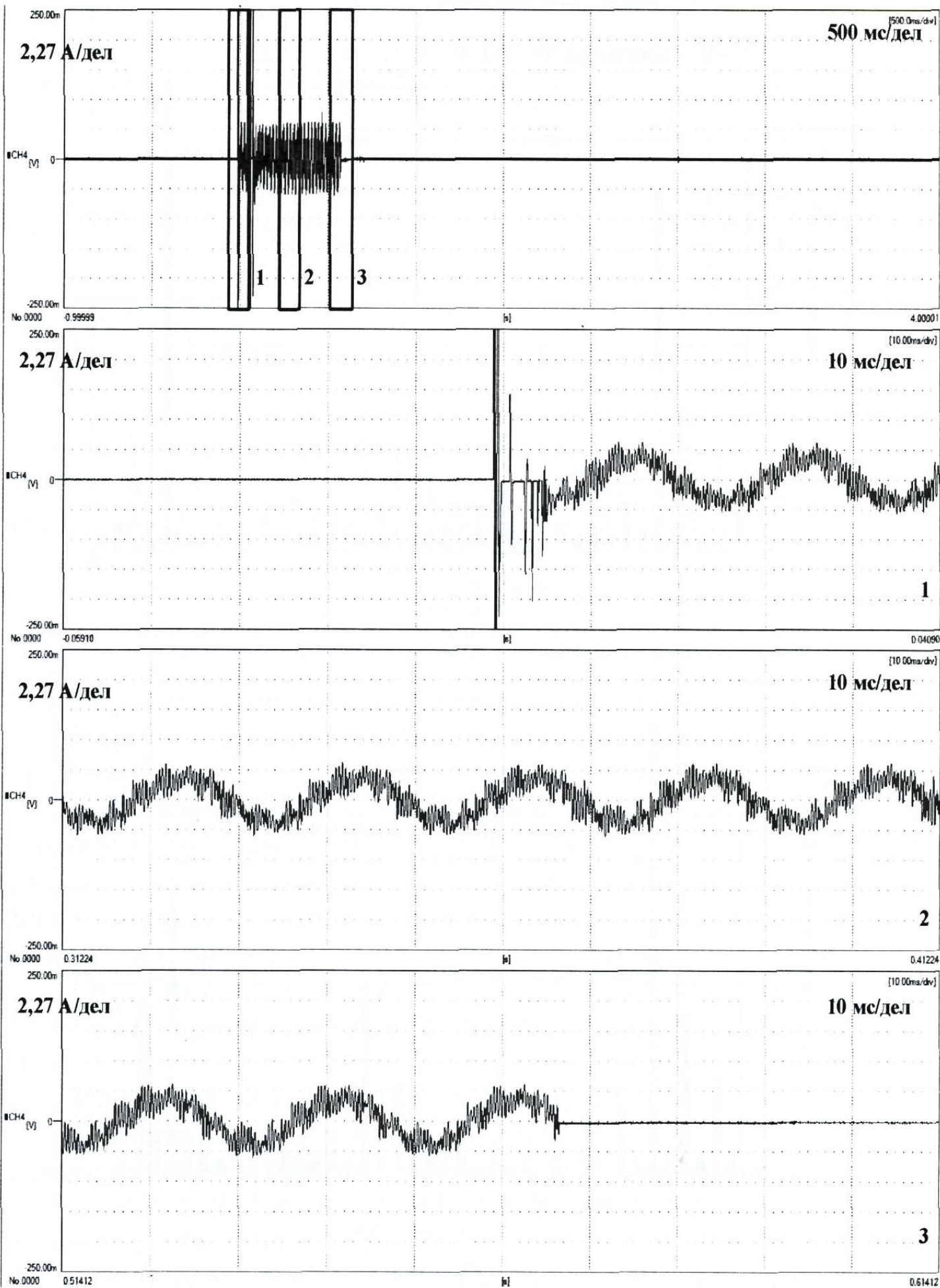
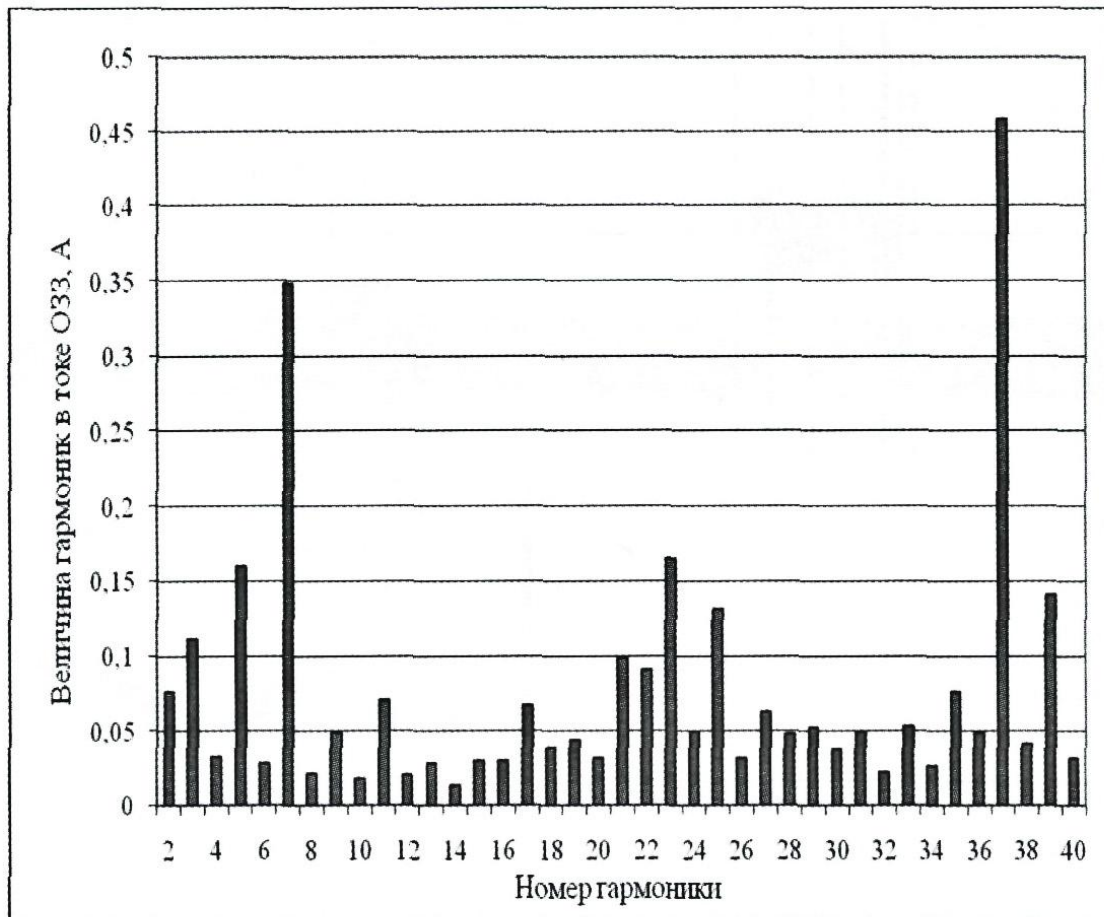
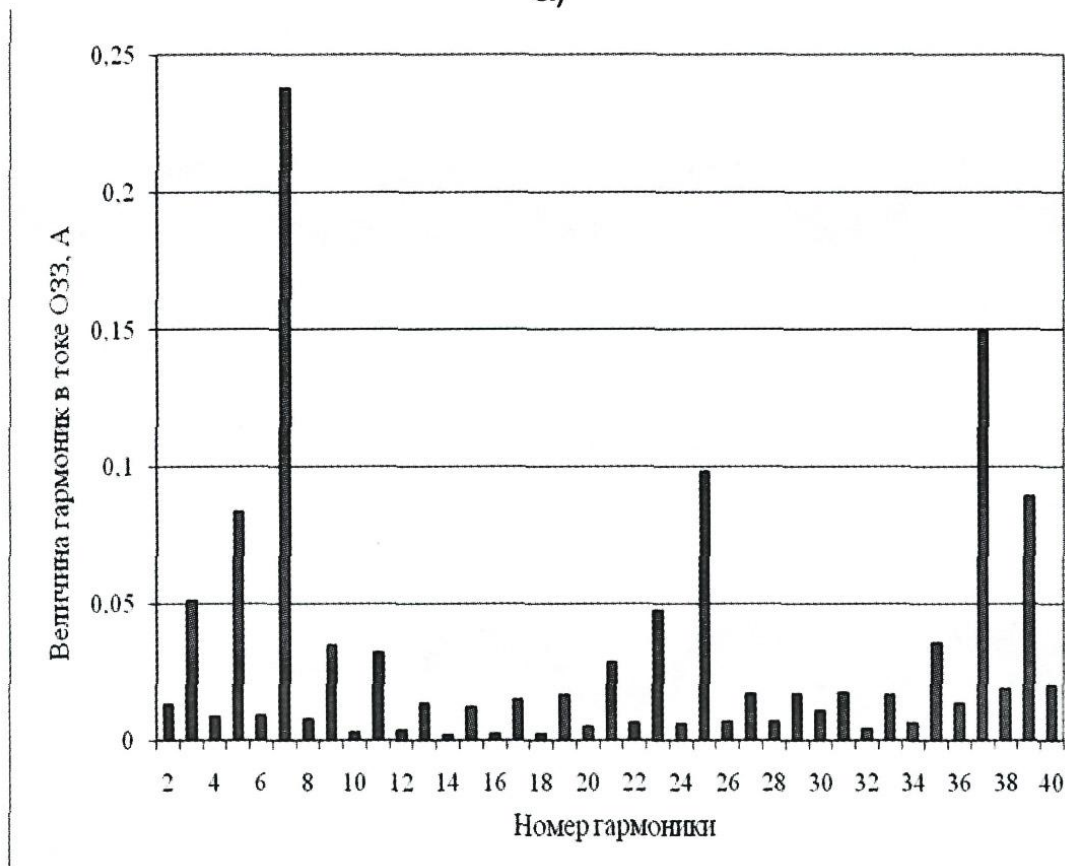


Рис. 6. Осциллограммы тока ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский». Нейтраль сети изолирована Опыт «металлического» ОЗЗ №7



а)



б)

Рис. 7. Действующие значения величин гармоник тока O33 для сети 6 кВ ПС "Карьерная-2" в режиме резистивно-заземленной (а) и изолированной нейтрали (б)

Таблица 2

Измеренный ток ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» при отключенных фидерах №2 и №3

Режим нейтрали	Полный ток ОЗЗ, А	Активный ток, А	Реактивный (емкостный) ток, А
Изолированная	2,1	0,2	2,1
Резистивно-заземленная	5,5	5,1	2,03

Среднеквадратические значения гармоник №2...40 в % от основной в токе ОЗЗ в режиме изолированной нейтрали более чем в 2 раза превышают данный параметр в режиме резистивно-заземленной нейтрали. Такое значительное искажение формы тока ОЗЗ высшими гармониками может быть вызвано наличием в нагрузке частотно-регулируемых приводов карьерных экскаваторов.

Измеренный полный ток ОЗЗ в полной схеме (подключено все оборудование) на момент эксперимента составил 6,6 А, после выделения активной составляющей (5,63 А) емкостный ток ОЗЗ в рассматриваемой конфигурации сети составил 3,52 А.

В табл. 2 приведены измеренные значения тока ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» в режиме с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью для конфигурации сети с отключенными фидерами № 2 и №3. Были выделены активная и реактивная составляющие тока ОЗЗ промышленной частоты для каждого из режимов нейтрали, что позволило определить ёмкостный ток сети при отключенных фидерах №2 и №3.

При отключении дополнительного оборудования (данные по отключенным участкам сети отсутствуют) и фидеров №2 и №3, емкостный ток ОЗЗ в сети 6 кВ составил 1,2 А.

Результаты опытов дуговых ОЗЗ

В соответствии с программой был выполнен ряд опытов искусственного ОДЗ для двух режимов заземления нейтрали:

- нейтраль сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» заземлена через резистор РЗ-800-15-6 Ом (Опыт ОДЗ № 1, Опыт ОДЗ № 2);
- нейтраль сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» изолирована (Опыт ОДЗ № 3, Опыт ОДЗ №4, Опыт ОДЗ № 5).

В каждом опыте организовывалось несколько циклов горения прерывистой дуги.

Таблица 3

**Кратности перенапряжений при ОДЗ
в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2»**

Режим заземления нейтрали	Опыт ОДЗ	Кратность перенапряжений, о.е.	Максимальная кратность перенапряжений, о.е.	Наличие эскалации перенапряжений при ОДЗ
Резистивно-заземленная	№ 1	2,34	2,34	отсутствует
	№ 2	2,31		
Изолированная	№ 3	2,50	2,61*	присутствует
	№ 4	2,51		
	№ 5	2,61		
	№ 6	2,58		

*Примечание: В связи возможностью повреждения изоляции высоковольтного оборудования эксперименты с созданием более высоких кратностей перенапряжений были прекращены.

Изменением зазора и скорости вращения электродов ИП может быть обеспечен достаточно высокий уровень перенапряжений при ОДЗ. Достижение наибольшего уровня перенапряжений требует значительно количества опытов с подбором необходимой величины зазора и скорости вращения.

В связи с явным наличием эскалационного роста перенапряжений процессе ОДЗ при изолированной нейтрали сети и возможностью в связи с этим повреждения оборудования, нарушения жесткого производственного цикла дальнейшие исследования были прекращены.

На момент проведения опытов ОДЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная» присоединения №2 и №3 были отключены.

Осциллограммы переходных процессов при ОДЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» приведены на рис. 8-9.

На приведенных осциллограммах, полученных с помощью осциллографа DL-750: напряжение ф. А – синий (СН1), ф. В – зеленый (СН2), ф. С – красный (СН3). Время записи процесса в каждом опыте – 20 секунд, частота дискретизации – 200 кГц/канал. По результатам опытов дуговых ОДЗ были определены фактические уровни (кратности) перенапряжений в сети на момент проведения измерений (табл. 3).

Гармонический анализ с разложением в ряд Фурье переходного процесса производить нельзя, поскольку, строго говоря, такой процесс не является периодическим.

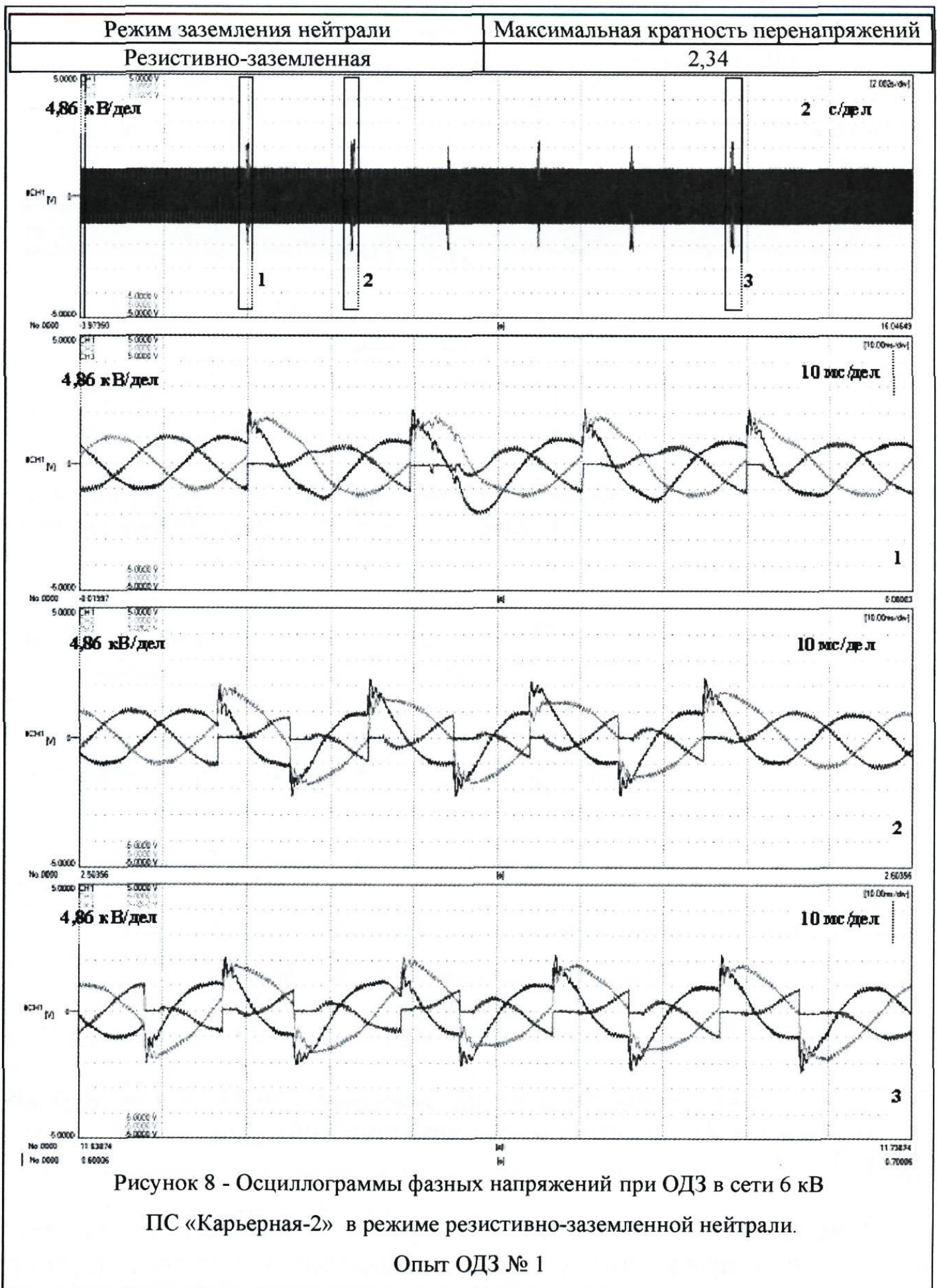


Рис. 8. Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» в режиме резистивно-заземленной нейтрали. Опыт ОДЗ № 1

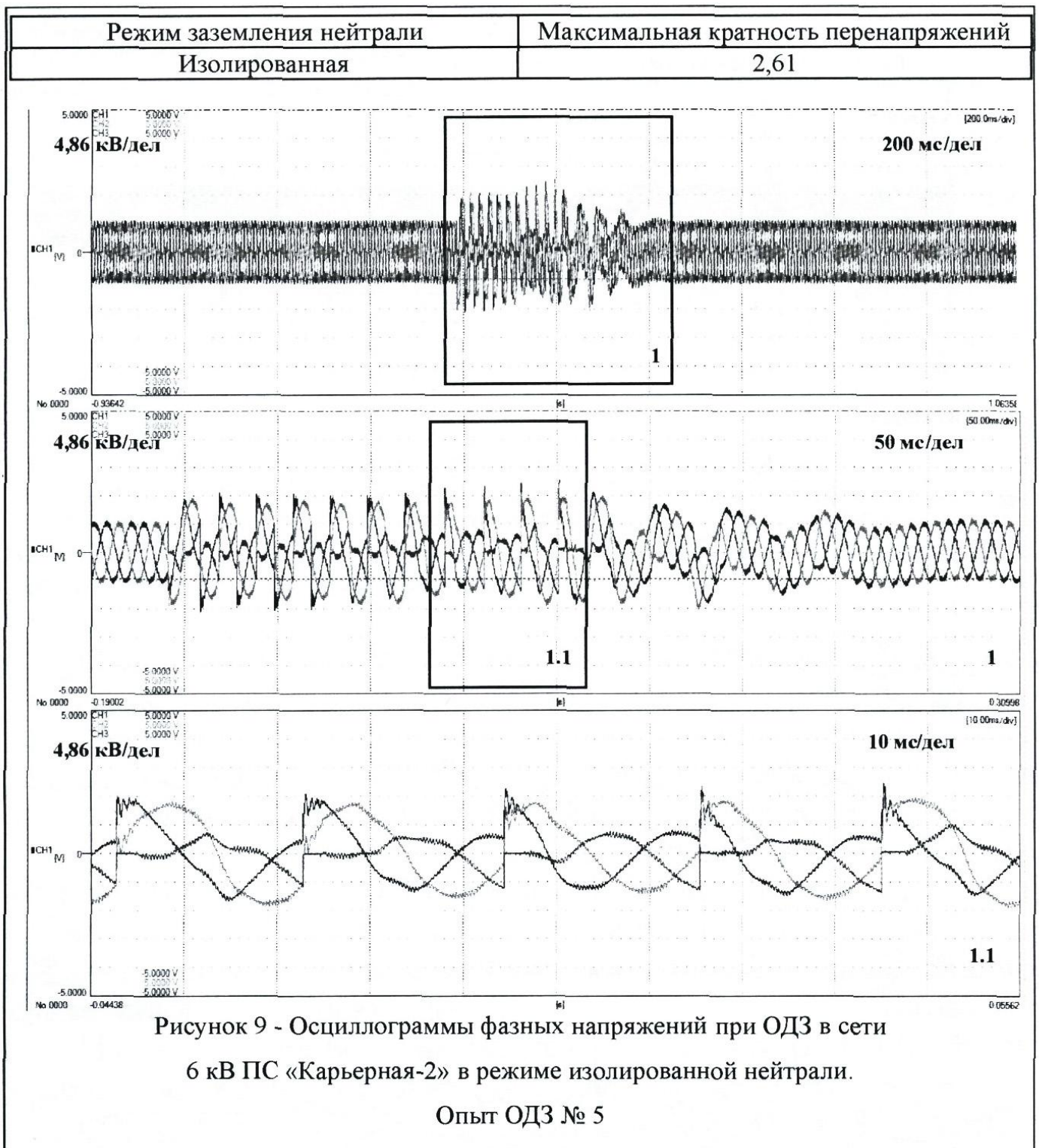


Рис. 9. Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» в режиме изолированной нейтрали Опыт ОДЗ № 5

Тем не менее, известно, что при горении дуги возникают колебания напряжений и токов замыкания в широкой полосе частот: от субгармоник ($\omega/2$, $\omega/3$, ... , единицы герц) до еще различимых, т.е. вполне выраженных в записываемом на осциллограф сигнале, гармоник частотой единицы и десятки килогерц.

В частности, согласно исследованиям [3], ток перемежающейся дуги содержит гармоники вплоть до 20-й и выше, а в частотном спектре этого тока содержится большое количество "интергармоник" (частотой не кратной 50), субгармоник (ниже 50 Гц), составляющих промежуточных частот, т.е практически непрерывный ряд.

Экспериментальные исследования процессов при ОДЗ в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» для разных режимов заземления нейтрали показали следующее.

Режим изолированной нейтрали сети:

- за счет горения перемежающейся дуги возникает эскалация напряжений;
- возможно возникновение опасных для изоляции электрооборудования перенапряжений высокой кратности (из-за возможности повреждения изоляции генерация перенапряжений кратностью более $2,61U_{фмакс}$ не была реализована);
- после устранения ОДЗ возникают феррорезонансные явления с перенапряжениями на частоте 50 Гц, которые также могут привести к повреждению трансформаторов напряжения и другого высоковольтного оборудования.

Режим резистивно-заземленной нейтрали (нейтраль сети заземлена через резистор типа РЗ-800-15-6):

- эскалация напряжений отсутствует;
- максимальная кратность перенапряжений при ОДЗ не превышает $2,34U_{фмакс}$;
- процессы носят аperiodический характер; феррорезонансные явления отсутствуют.

Сравнительный анализ характера процессов и уровней перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в сети с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью свидетельствует об эффективности заземления нейтрали сети 6 кВ ПС «Карьерная» через резистор типа РЗ-800-15-6 как средства ограничения перенапряжений при ОДЗ и устранения феррорезонансных явлений.

Выводы

Проведенные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (устойчивые "металлические", перемежающиеся дуговые) в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2»

для различных режимов заземления нейтрали сети показали, что заземление нейтрали сети через резистор типа РЗ-800-15-6 по сравнению с режимом изолированной нейтрали обеспечивает:

- отсутствие эскалации напряжений при ОДЗ;
- эффективное ограничение перенапряжений при ОДЗ (максимальная кратность перенапряжений при ОДЗ не превышает $2,34U_{ф\max}$);
- подавление феррорезонансных явлений;
- гарантированную (не зависящую от конфигурации сети) величину тока ОЗЗ, необходимую для обеспечения надежной работы защит от замыканий на землю.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность внедрения резистивного заземления нейтрали в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2». Это мероприятие может быть рекомендовано для карьерных распределительных сетей 6-10 кВ всех подстанций ОАО «СУЭК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширковец А.И., Ильиных М.В. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ.//Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – спец. вып. №1. – с. 44-51.

2. Иванов А.В., Сарин Л.И., Ширковец А.И. Исследования параметров тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ Оренбургского ГПЗ.// Газовая промышленность. – 2008. - №12 (625). – с. 79-81.

3. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Влияние электрической дуги на направленные защиты.//Новости ЭлектроТехники. - №1(37). – 2006. **ИТАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ильиных М.В. – начальник научно-исследовательского отдела,
Ширковец А.И. – ведущий инженер научно исследовательского отдела,
Кузьмин А.А. – ведущий инженер научно исследовательского отдела,
ООО «Болид», e-mail: nio_bolid@ngs.ru

Волокитин И.Е. – начальник отдела электро-тепло-водоснабжения и производственно-технологической связи энерго-механического управления, Главный энергетик ОАО «СУЭК», e-mail: volokitin@msk.suek.ru