

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи



Кузьмин Алексей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА  
ПРЕДОТВАЩЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ  
НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ**

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Д.т.н., профессор  
И.А.Ефремов  
Д.ф-м.н., профессор  
С.М.Коробейников

Новосибирск – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕТЕЙ 6-35 кВ .....	12
1.1 О развитии технического оснащения электрооборудования .....	12
1.1.1 Общие положения .....	12
1.1.2 Принципы построения частотно-регулируемого электропривода .	14
1.1.3 Появление гармонических искажений в сети с активными нелинейными сопротивлениями.....	20
1.2 Теория горения дуги .....	27
1.2.1 Общие положения .....	27
1.2.2 Горение дуги при возникновении гармонических искажений.....	30
1.3 Устройства предотвращения дуговых перенапряжений.....	32
1.3.1 Общие положения .....	32
1.3.2 Конструктивное выполнение устройств предотвращения дуговых перенапряжений .....	36
1.3.3 Устройства предотвращения дуговых перенапряжений со ступенчатым регулированием тока компенсации .....	37
1.3.4 Устройства предотвращения дуговых перенапряжений с плавным регулированием тока компенсации.....	39
1.3.5 Экспериментальное исследование эффективности работы устройств предотвращения дуговых перенапряжений с плавным регулированием тока компенсации.....	45
1.3.6 Устройств предотвращения дуговых перенапряжений с полной компенсации тока однофазного замыкания на землю .....	57
1.4 Выводы по первой главе: .....	59
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ СРЕДНЕГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ .....	60

2.1 Общие положения .....	60
2.1.1 Объект исследований.....	60
2.1.2 Методика проведения опыта однофазного замыкания на землю ...	61
2.1.3 Методика компьютерного моделирования процессов однофазного замыкания на землю .....	65
2.2 Статистическая обработка результатов .....	71
2.2.1 Статистическая оценка уровней гармонических искажений тока ОЗЗ в сетях 6-35 кВ различного назначения.....	71
2.2.2 Сравнительная характеристика гармонического состава тока ОЗЗ разных лет.....	79
2.3 Влияние параметров сети на усиление гармонических искажений в токе ОЗЗ.....	82
2.3.1 Экспериментальные исследования усиления гармоник в токе ОЗЗ при изменении конфигурации сети.....	82
2.4 Экспериментальные исследования процессов в сети промышленных предприятий при возникновении ОЗЗ .....	86
2.4.1 Общие положения .....	86
2.4.2 Оценка качества электроэнергии в сети 10 кВ ГРЭС .....	89
2.4.3 Натурные измерения усиления гармонических искажений в токе замыкания на землю .....	92
2.4.4 Методы борьбы с гармоническими искажениями в токе ОЗЗ .....	105
2.5. Выводы по главе.....	115
<b>3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....</b>	<b>117</b>
3.1 Принципиальная схема устройства.....	117
3.1.1 Общие положения нормативных документов.....	117
3.1.2 Требования к разрабатываемому устройству предотвращения дуговых перенапряжений.....	118
3.1.3 Основные функциональные узлы устройства предотвращения дуговых перенапряжений.....	119

3.2 Функциональная схема устройства.....	121
3.2.1 Алгоритм работы устройства.....	121
3.2.2 Общая компоновка устройства.....	127
3.3 Компьютерная апробация устройства предотвращения дуговых перенапряжений.....	128
3.3.1 Основные положения.....	128
3.3.2 Расчет эффективности работы устройства предотвращения дуговых перенапряжений.....	129
3.4 Экономическая эффективность разработки устройства предотвращения дуговых перенапряжений.....	144
3.5 Выводы по третьей главе.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	148
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	150
Приложение А Акты об использовании результатов диссертационной работы.....	162

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Эксплуатационные качества электрической сети, такие как надежность электроснабжения, степень тяжести аварийных повреждений, время ликвидации аварии во многом определяются способом заземления нейтрали. Одним из основных видов повреждений в сетях среднего класса напряжения является возникновение однофазного замыкания на землю. Большую часть таких замыканий составляют дуговые, причем горение дуги является нестабильным. Режим заземления нейтрали оказывает существенное влияние на процессы при возникновении однофазного замыкания на землю. Выбор режима заземления нейтрали является сложной технической задачей. В сетях среднего класса напряжения согласно ПУЭ в России допускается использование следующих режимов заземления нейтрали:

- изолированный;
- заземленной через дугогасящий реактор;
- резистивный;
- комбинированный (заземление нейтрали через дугогасящий реактор и резистор включенные параллельно);

Вопрос исследования эффективности эксплуатации сетей с различным режимом заземления нейтрали насчитывает десятки лет. основополагающие исследования физики процессов проведены Петерсеном (1916г.), Петерсом и Слепяном (1923г.), позднее эти гипотезы были уточнены и дополнены работами Н.Н. Беякова, Ч.М. Джуварлы, М.В. Костенко. Одним из основоположников исследований данного вопроса в России является Ф.А. Лихачев. В проведенных им исследованиях [99,98] проводимых на основании данных ОРГРЭС для сетей среднего класса напряжения, не менее 75% повреждений относятся к однофазным замыканиям на землю, при этом общий недоотпуск электроэнергии по этой причине достигает 30%. В современных публикациях [99] также отмечается, что повреждаемость электродвигателей 6 кВ сетей собственных нужд энергоблоков 300–500 МВт составляет в среднем 7,6 % от

числа установленных в год, а на отдельных энергоблоках достигает 13 %. Первопричиной 84 % этих повреждений являются однофазные замыкания на землю, перешедшие затем в двухфазные, двойные и тройные к. з. на землю.

Предотвращение развития аварии и переход замыкания на землю в многоместное короткое замыкание достигается обеспечением компенсацией емкостного тока замыкания на землю. Согласно результатам многолетних наблюдений [96] в сетях с точной и полной компенсацией тока замыкания на землю удельное число повреждений снижается, что подтверждает преимущество сетей с компенсацией емкостного тока перед сетями с изолированным режимом заземления нейтрали. [1] указывает величины емкостного тока сети, при котором рекомендуется вводить системы компенсации, величины тока представлены в таблице В.1.

Таблица В.1 - Величины емкостного тока замыкания на землю, при которых рекомендуется вводить систему компенсации

Класс напряжения, кВ	Наличие железобетонных опор	Допустимая величина тока замыкания на землю, А
3-6	есть	10
	нет	30
10	есть	10
	нет	20
15-20	есть	10
	нет	15
35	есть	10
	нет	

Для объектов особого назначения, таких как угольные разрезы, предъявляются особые требования к безопасности. Так [2] ограничивает величину емкостного тока в сети 6-10 кВ разрезов величиной 15 А.

Как правило, при рассмотрении процессов при однофазных замыканиях на землю расчет проводится для составляющей 50 Гц. Однако напряжение, в ряде случаев, содержит высшие гармонические составляющие (ВГ),

что приводит к появлению ВГ в токе замыкания. В [99] отмечается, что данное обстоятельство наряду с другими недостатками систем компенсации снижает эффективность компенсации и позволяет обеспечить защиту сети.

В [29,36,37] проводились подробные исследования процессов в сети с гармоническими искажениями. Согласно данным работам основной причиной существенного отличия в переходных процессах при замыканиях на землю являются гармоники. При этом в [34] отмечается что при значениях тока высших гармоник более 8 А, для сети 6 кВ дуга с вероятностью, превышающей 0,5, будет гаснуть не в первый, а в любой из последующих переходов тока через ноль или вообще гореть длительно.

Исследования и разработка системы компенсации тока замыкания на землю позволит повысить эффективность эксплуатации сетей, а также снизить аварийность.

**Целью работы** является повышение надежности электроснабжения электрических сетей среднего класса напряжения, разработка системы заземления нейтрали, средств и методов компенсации гармонических искажений в токе ОЗЗ сети среднего класса напряжения.

В соответствии с целью поставлены и решены следующие **научные задачи**:

- критический обзор и анализ существующих технических решений системы заземления нейтрали в части компенсации тока ОЗЗ, использующие дугогасящие реакторы;
- анализ влияния тенденции развития уровня технического оснащения промышленных предприятий на уровень гармонических искажений в токе ОЗЗ;
- анализ уровней гармонических искажений в токе ОЗЗ в сетях среднего класса напряжения различного назначения;
- натурные исследование уровней гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов энергетики различного назначения;

- исследование влияния параметров сети на уровень гармонических искажений в токе ОЗЗ;

- разработка основных принципов организации компенсации гармонических искажений тока однофазного замыкания на землю для сети с компенсированным заземлением нейтрали.

- разработка и проведение компьютерной проверки и анализ эффективности разработанного устройства.

**Объектом исследования** являются трехфазные электрические сети среднего класса напряжения имеющие в составе потребителей объекты городского и промышленного электроснабжения.

**Предметом исследования** являются дугогасящие катушки среднего класса напряжения.

**Методы исследования.** Материалы диссертации получены экспериментальным путем исследований в действующих электрических системах. Результаты получены с использованием аналитических, численных и численно-аналитических методов расчета и анализа с применением компьютерного моделирования.

**Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами и научно-исследовательскими работами электросетевых компаний.**

Работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899) раздел 8: «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика Государственная программа РФ от 27.12.2010 «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»; подпрограмма- энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электроэнергетике. Перечень критических технологий Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899). Раздел 26 - технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

Также данная работа соответствует научному направлению программы научно-исследовательских, опытно-конструкторских технологических работ ПАО «МРСК-Волги»: «Разработка и исследование системы заземления нейтрали распределительной сети с компенсацией полного тока замыкания на «землю» и активным принудительным гашением дуги в месте повреждения» для нужд филиала ПАО «МРСК Волги» - «Оренбургэнерго».

**Научная и практическая ценность** диссертации состоит в том, что впервые:

- впервые исследовано, путем анализа частотного спектра, что причиной появления высших гармоник в токе ОЗЗ в сети с нагрузкой в режиме многократных коммутаций является возникновение свободных составляющих переходного процесса;
- приведены статистические исследования по влиянию нелинейной нагрузки на гармонические искажения в токе ОЗЗ по обширному числу объектов энергоснабжения;
- впервые экспериментально зарегистрировано, что при появлении ОЗЗ в сети с нелинейной нагрузкой возникают перенапряжения уровня  $2,61 \cdot U_{ф\max}$  за счет резонанса на одной из высших гармоник.
- впервые предложен и опробован способ предотвращения перенапряжений при ОЗЗ в сетях с ЧРП за счет непосредственного подключения дополнительного частотного преобразователя, управляемого с помощью контроллера.

**Личный вклад.** Постановка научно-исследовательских задач их решение, научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается использованием экспериментальных данных: отбором значимых для проведения научных исследований процессов и достоверных средств измерения и осциллографирования переходных процес-

сов; удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований с результатами экспериментов, выполненных в реальных сетях;

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– показана невозможность предотвращения дуговых перенапряжений в связи с увеличением гармонических искажений в токе ОЗЗ.

– показано увеличение перенапряжений при появлении в токе ОЗЗ гармоник на частоте собственных колебаний контура.

– разработан, смоделирован и опробован алгоритм и схема работы устройства предотвращения дуговых замыканий на основе непосредственного подключения частотного преобразователя в системе компенсации, управляемого с помощью контроллера.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались и одобрены на конференциях: XIX конференции ТРАВЭК 2012 г., Интерра 2013 г., конкурс муниципальных грантов мэрии г. Новосибирска молодым ученым и специалистам 2014 г, XI Международный форум по стратегическим технологиям IFOST-2016.

В рамках практической реализации основных результатов работы, для ПС «Кировская» реализовано устройство компенсации тока однофазного замыкания на землю.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований нашли отражение в 12 печатных работах, в том числе 6 статьях периодических изданий по перечню ВАК. Подана 1 заявка на изобретение.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, список использованных источников из 104 наименований, одного Приложения; изложена на 164 страницах печатного текста, включая 50 рисунок и 28 таблиц.

**Во введении** обосновывается актуальность работы и формулируются цель работы и научные задачи, отражается научная новизна и практическая ценность результатов.

**Первый раздел** посвящен описанию механизма возникновения гармонических искажений в питающем напряжении, описана математическая модель контура протекания гармоник в токе однофазного замыкания на землю. Рассмотрены различные системы компенсации тока однофазного замыкания на землю, проведен сравнительный анализ. В ходе обобщения теоретических и экспериментальных данных выявлены недостатки существующих систем.

**Второй раздел** посвящен экспериментальному исследованию действующих электрических сетей. Проведенные исследования выявили тенденции роста гармонических искажений, определили зависимости уровней гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю. Компьютерное моделирование позволило установить влияние систем заземления нейтрали на частоту и амплитуду искажений тока замыкания на землю.

**Третий раздел** посвящен разработке системы полной компенсации емкостного тока однофазного замыкания на землю. Сформулированы основные требования к разрабатываемой системе. Разработан алгоритм работы и функциональная схема системы компенсации. Проведен компьютерный расчет процессов в сети горнодобывающего предприятия при возникновении замыкания на землю при установке в нейтрали сети системы полной компенсации.

**В заключении** приводятся основные результаты исследований работы.

# 1 НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕТЕЙ 6-35 кВ

## 1.1 О развитии технического оснащения электрооборудования

### 1.1.1 Общие положения

Конец XX века ознаменовался многими техническими достижениями и революционными открытиями в различных отраслях электроэнергетики. На основе результатов научных исследований созданы и усовершенствованы различные электротехнические устройства, получившие качественно новые характеристики. Вместе с тем их внедрение поставило новые вопросы. Одним из таких вопросов стало качество электроэнергии.

В 2006-2007 г.г. в странах Европейского союза ущерб потребителей электроэнергии и электроснабжающих организаций от низких показателей качества электрической энергии таких как:

- провалы напряжения,
- кратковременные и длительные перерывы электропитания,
- высшие гармоники,
- перенапряжения,
- доза фликера,
- проблемы ЭМС,

составили более 150 млрд евро [3]. В России такие оценки не проводятся.

Нормы качества электроэнергии приводятся в ряде документов [4-6]. В связи с развитием экономической и технической ситуации в России нормативные документы обновляются. Так на смену ГОСТ 13109-97 пришел ГОСТ Р 54149-2010, нормы которого ближе требованиям европейского стандарта EN50160. Новый ГОСТ изменен в части требований по системе измерения показателей качества, содержания гармонических составляющих (соответствует международному стандарту IEC 61000-4-7), введены новые понятия, например, интергармонические составляющие напряжения, а также ряд других

вопросов подвергся изменению. Своевременное обновление нормативных документов подтверждает актуальность темы ухудшения качества электроэнергии.

За последние 20 лет существенно возрос уровень технического оснащения энергосистем. Получили техническую доступность новые направления, такие как вставки постоянного тока, частотно-регулируемое управление двигателя, системы управления компенсацией реактивной мощности. Во многом развитие энергетики определялось качественным прорывом технологий производства полупроводниковых устройств. В большинстве своем технологические процессы получили автономность от оператора. Вместе с тем возросла доля нелинейных элементов в технологических устройствах. Достаточно хорошо изучено влияние нелинейных индуктивностей на надежность электроснабжения [7-12]. Однако внедрение новых технологий привело к существенному увеличению нелинейных активных сопротивлений.

К традиционным нелинейным активным сопротивлениям, можно отнести: электрическую дугу, лампы накаливания и другие; в настоящее время добавились различные полупроводниковые элементы: диоды, транзисторы и тиристоры. На их основе построен широкий спектр устройств:

- частотно-регулируемые электроприводы;
- преобразователи линий постоянного тока;
- источники бесперебойного питания;
- системы управления конвейерных устройств.

Данные устройства имеют нелинейные активные сопротивления, что приводит к появлению гармонических искажений в напряжении нормального режима. Развитие аппаратов данного класса и их внедрение приводит к появлению новых проблем.

Рассмотрим более подробно основные положения построения частотно-преобразовательной техники.

### 1.1.2 Принципы построения частотно-регулируемого электропривода

В процессе развития электроэнергетики, мощности установок неуклонно росли, появлялись все новые технологические процессы, в которых такие установки участвовали. В основе большинства промышленных производств используются двигатели. Для любого двигателя процесс пуска и регулирования момента на валу сопряжен с определенными проблемами. Как известно, момент сил, развиваемый электродвигателем, пропорционален квадрату приложенного к нему напряжения, что создает резкие рывки ротора при пуске и остановке двигателя, которые, в свою очередь, вызывают большой индукционный ток.

В настоящий момент в промышленности используются два типа мощных двигателей: асинхронный и постоянного тока. Системы регулирования скорости двигателя постоянного тока просты, но сам электродвигатель дорог и ненадежен. При работе возможно искрение щеток, а также под воздействием электроэрозии изнашивается коллектор. Определенный ряд производств не может использовать данный тип двигателя. Асинхронные двигатели просты по устройству и надежны, имеют меньшие по сравнению с двигателями постоянного тока массо-габаритные показатели. Асинхронные двигатели просты в эксплуатации.

Для регулирования скорости вращения асинхронных двигателей разработаны устройства, с различными принципами построения, как механическими, так и электрическими. Механические устройства непосредственно противодействуют резкому нарастанию скорости двигателя. Для этого используют тормозные колодки, жидкостные муфты, магнитные блокираторы и другие принципы.

Электрические устройства позволяют за счет регулирования тока или напряжения регулировать скорость двигателя. Для управления электрическими параметрами используются устройства частотного регулирования, а систему частотного регулирования двигателя называют частотно-регулируемым приводом (ЧРП).

Теория построения ЧРП создана в 30-х годах 20 века. В семидесятые годы создавались первые быстродействующие системы управления скоростью асинхронного двигателя. В [13] описан электропривод с частотно-токовым управлением, использующий быстродействующие релейные гистерезисные регуляторы фазных токов. Впервые в 1977 г. на выставке Электро-77 был представлен опытный образец регулируемого электропривода переменного тока. Силовая часть частотного преобразователя была построена на базе двухзвенной транзисторной схемы с широтно-импульсной модуляцией [14].

Условно устройство частотного преобразования можно разделить на силовую часть, к которой относятся полупроводниковые ключи преобразователя и логическую - систему управления ключами.

Современный частотный преобразователь построен на базе активных нелинейных силовых полупроводниковых элементов: диодов, тиристоров, транзисторов. Данный класс элементов имеет полупроводниковую проводимость, основу которой составляет многослойная структура, способная переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот. Однако дороговизна и ненадежность элементной базы существенно сдерживали развитие данного направления.

Преобразователи частоты, применяемые в регулируемом электроприводе, в зависимости от структуры и принципа работы силовой части разделяются на два класса:

- преобразователи частоты с явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока;
- преобразователи частоты с непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока).

Каждый из существующих классов преобразователей имеет свои достоинства и недостатки, которые определяют область рационального применения каждого из них. Исторически первыми появились преобразователи с непосредственной связью, на рисунке 1.1 показан пример подобной схемы), в которых силовая часть представляет собой управляемый выпрямитель и

выполнена на незапираемых тиристорах. Система управления поочередно отпирает группы тиристоров и подключает статорные обмотки двигателя к питающей сети.

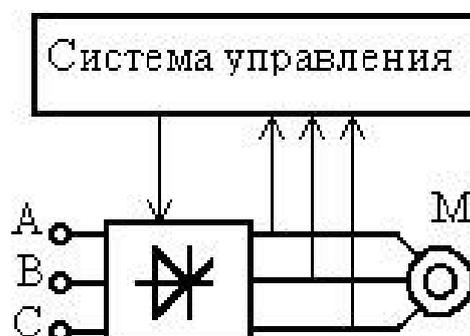


Рисунок 1.1 - Система преобразования частоты с непосредственной связью

Для включения тиристора достаточно подать короткий импульс на управляющий вывод, но для выключения необходимо либо приложить на него обратное напряжение, либо снизить коммутируемый ток до нуля. Для этого в тиристорном преобразователе частоты требуется сложная и громоздкая система управления.

Выходное напряжение преобразователя формируется из участков синусоид входного напряжения. На Рисунке 1.2 показан пример формирования выходного напряжения для одной из фаз нагрузки. На входе преобразователя действует трехфазное синусоидальное напряжение  $u_a, u_b, u_c$ .

Из рисунка видно, что частота выходного напряжения не может быть равна или выше частоты питающей сети. Она находится в диапазоне от 0 до 30 Гц. Как следствие - малый диапазон управления частоты вращения двигателя (не более 1: 10). Это ограничение не позволяет применять такие преобразователи в современных частотно регулируемых приводах с широким диапазоном регулирования технологических параметров.

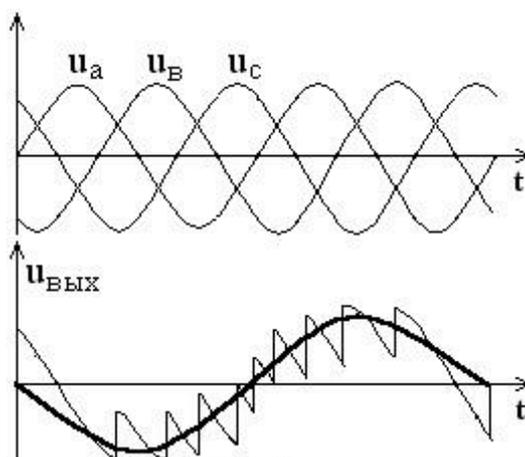


Рисунок 1.2 - Осциллограмма трехфазного питающего напряжения и выходного напряжения тиристорного преобразователя

Использование незапираемых тиристоров требует относительно сложных систем управления, которые увеличивают стоимость преобразователя.

Выходное напряжение преобразователя насыщено высшими гармониками, которые вызывают дополнительные потери в электрическом двигателе, перегрев электрической машины, снижение момента, очень большие искажения в питающей сети.

Наряду с недостатками, преобразователи с непосредственной связью, имеют определенные достоинства. К ним относятся:

- практически самый высокий КПД относительно других преобразователей (98,5% и выше),
- способность работать с большими напряжениями и токами, что делает возможным их использование в мощных высоковольтных приводах,
- относительная дешевизна, несмотря на увеличение абсолютной стоимости за счет схем управления и дополнительного оборудования.

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых приводах находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока (Рисунок 1.3)

В частотных преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (В),

фильтруется фильтром ( $\Phi$ ), сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором ( $\Pi$ ) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению КПД и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

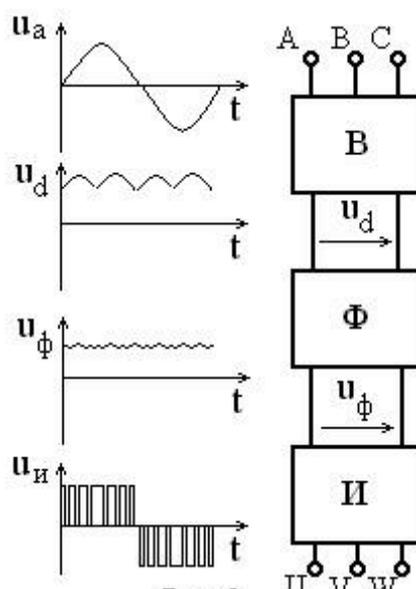


Рисунок 1.3 - Эпюра преобразования напряжения

Для формирования синусоидального переменного напряжения используются автономные инверторы напряжения и автономные инверторы тока.

В качестве электронных ключей в инверторах применяются запираемые тиристоры GTO и их усовершенствованные модификации GCT, IGCT, SGCT, и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT. Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT отличается от тиристоров полная управляемость, простая неэнергоёмкая система управления, самая высокая рабочая частота.

Вследствие этого преобразователи частоты на IGBT позволяют расширить диапазон управления скорости вращения двигателя, повысить быстродействие привода в целом [12, 15].

Главным достоинством тиристорных преобразователей частоты, как и в схеме с непосредственной связью, является способность работать

с большими токами и напряжениями, выдерживая при этом продолжительную нагрузку и импульсные воздействия.

Они имеют более высокий КПД (до 98%) по отношению к преобразователям на IGBT транзисторах (95 – 98%).

Преобразователи частоты на тиристорах в настоящее время занимают доминирующее положение в высоковольтном приводе в диапазоне мощностей от сотен киловатт и до десятков мегаватт с выходным напряжением 3 — 10 кВ и выше. Однако их удельная цена на один кВт выходной мощности самая большая в классе высоковольтных преобразователей.

Существуют различные алгоритмы управления ЧПП, в зависимости от типов преобразовательной части и требований предъявляемых к работе двигателя. Хорошо изучен вопрос влияния метода модулирования управляющего сигнала на качество выходного напряжения, величину потребляемой энергии, эффективность использования двигателя [16-20]. В процессе совершенствования ЧП уделялось внимание улучшению системы управления. В ряде последних работ предлагаются новые более эффективные методы управления ключами [21-24]. На сегодняшний день большее распространение получил метод векторной широтно-импульсной модуляции [25-26]. В [27] делается существенный вывод о положительном влиянии увеличения периода повторения сигнала предмодуляции на область существования комбинационных гармоник. Вопрос выбора оптимального алгоритма управления инвертором подробно рассмотрен в [28].

Однако при разработке систем управления, как правило, рассматривается вопрос влияния работы инвертора на качество питающего двигателя напряжения. В то время как, оказывается существенное воздействие на питающую сеть. В [24] отмечается существенное влияние частотно-преобразователя на форму питающего напряжения при переходе по току через нуль. По оценкам длительность перехода составляет около 500 мкс.

Анализ устройства ЧП показывает необходимость учета в процессе исследования появления искажений построения силовой и логической схемы управления частотного преобразователя на искажения.

### **1.1.3 Появление гармонических искажений в сети с активными нелинейными сопротивлениями**

Для оценки влияния ЧРП на гармонические искажения напряжения питающей сети проведены натурные исследования в сети 1 СШ 10 кВ компрессорной станции. Цель исследования - анализ влияния параметров схемы электроснабжения на искажения в сети с мощным ЧРП.

Питание 1СШ 10 кВ компрессорной станции осуществляется от ПС 220/110/10 по ВЛ 10 кВ. Непосредственный ввод питания в ЗРУ 10 кВ осуществляется при помощи КЛ, соединяющихся с ВЛ 10 кВ.

От 1СШ 10 кВ состоит из 8 присоединений. Данные кабельных линий Представлены в таблице 1.1. Кроме того на каждой СШ установлено по два комплекта ТН.

Также на 1 СШ 10 кВ установлено по одной установке КРМ мощностью 1350 кВар, предназначенных для повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий и распределительных сетей напряжением 6-10 кВ частоты 50 Гц. Для наглядности дальнейшего анализа проведем расчет для случая с отключенным КРМ.

Величина ёмкостного тока ОЗЗ сети 1СШ 10 кВ компрессорной станции составляет 2,116 А.

Таблица 1.1 - Расчётные значения ёмкостных токов ОЗЗ сети 1СШ 10 кВ компрессорной станции

№ присоед..	Марка ВЛ / КЛ	Сечение ВЛ / КЛ	Длина трассы, км	$C_{уд}$ , мкФ/км	$C_{\phi}$ , мкФ	$I_{с.фид}$ , А
1	ПвЭВнгд	3*50	0,065	0,251	0,016	0,093
2	ПвЭВнгд	3*50	0,220	0,251	0,055	0,315
3	ПвЭВнгд	3*50	0,140	0,251	0,035	0,201
4	ПвЭВнгд	3*50	0,015	0,251	0,004	0,022
5	ПвЭВнгд	3*50	0,370	0,251	0,093	0,530
6	ПвЭВнгд	3*50	0,230	0,251	0,058	0,330
7	ПвЭВнгд	3*630	0,150	0,680	0,102	0,582
	АС	600	1,500	0,005	0,008	0,043

В данной сети работают два электроприводных газоперекачивающих агрегата (ЭГПА) мощностью 4 МВт каждый; высокоскоростной асинхронный электродвигатель (АД) и преобразователь частоты (ПЧ), которые образуют совместно частотно-регулируемый электропривод. ПЧ производства немецкой фирмы Siemens предназначен для питания и управления АД и построен на базе мощных высокоэффективных полупроводниковых ключей. ПЧ работает с АД по методу векторного управления без датчика скорости. Обеспечивает регулировку частоты выходного напряжения в пределах 0...150 Гц, регулировку величины выходного напряжения в пределах 0...3300 В. Питание ПЧ производится через 24-пульсную схему выпрямления от двух согласующих трансформаторов, соединенных с ПЧ при помощи четырёх трёхфазных силовых шин. Нейтраль сети изолирована.

Для данной сети производился мониторинг фазных напряжений нормального режима, осциллограмма проявления гармонических искажений в напряжении показана на рисунке 1.4. В напряжении хорошо видны периодически возникающие гармонические искажения. Уровни наиболее характерных гармонических составляющих напряжения (больше 10 В), приведены в таблице 1.2 Периодичность их появлений соответствует схеме работы ПЧ.

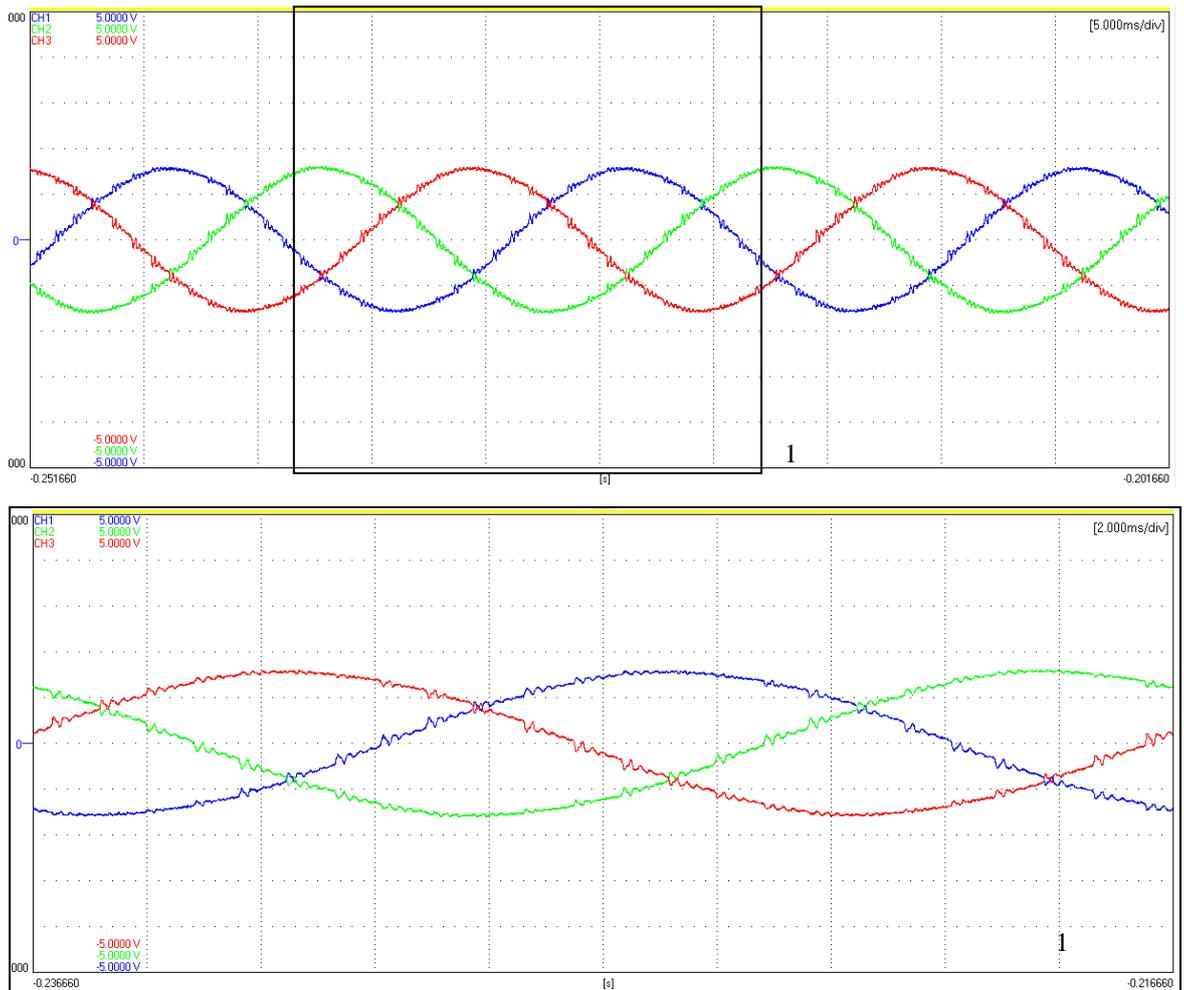


Рисунок 1.4 - Осциллограммы тока ОЗЗ и фазных напряжений при измерениях на 1СШ 10 кВ компрессорной станции. Масштаб по оси напряжений – 4,8 кВ/дел.

Для оценки качества электроэнергии проведен замер прибором ЭРИС-КЭ.02. Согласно полученным результатам измерений показателей качества в сети 10 кВ компрессорной станции подтверждено соответствие требованиям ГОСТ - напряжение нормального режима по коэффициенту искажения синусоидальности.

В напряжении видны затухающие высокочастотные процессы обусловленные работой частотно-регулируемого электропривода. Число таких «колебаний» за период совпадает с пульсностью схемы. Следовательно, появление гармонических искажений в напряжении нормального режима связано с работой частотного преобразователя.

Таблица 1.2 - Характерные гармонические составляющие напряжения нормального режима сети 10 кВ компрессорной станции

<b>№ гарм.</b>	<b>Величина напряжения, В</b>
1	5845,272
3	35,688
5	43,629
7	14,209
13	13,930
19	12,548
23	52,806
25	51,084
43	11,439
47	30,961
49	30,453
51	12,218
53	10,438
67	17,919
71	27,202
73	32,306
75	19,985
77	13,479
79	13,314
89	14,511
91	39,891
93	12,418
95	36,888
97	55,514
99	51,830
$U_{\text{действ.100}}$	<b>157,785</b>

В рамках продолжения исследования проводился опыт однофазного замыкания на землю с одновременным осциллографированием трехфазного питающего напряжения сети и тока ОЗЗ (подробнее на методике проведения эксперимента остановимся в разделе 2.1.2). На рисунке 1.5 приведена осциллограмма тока ОЗЗ.

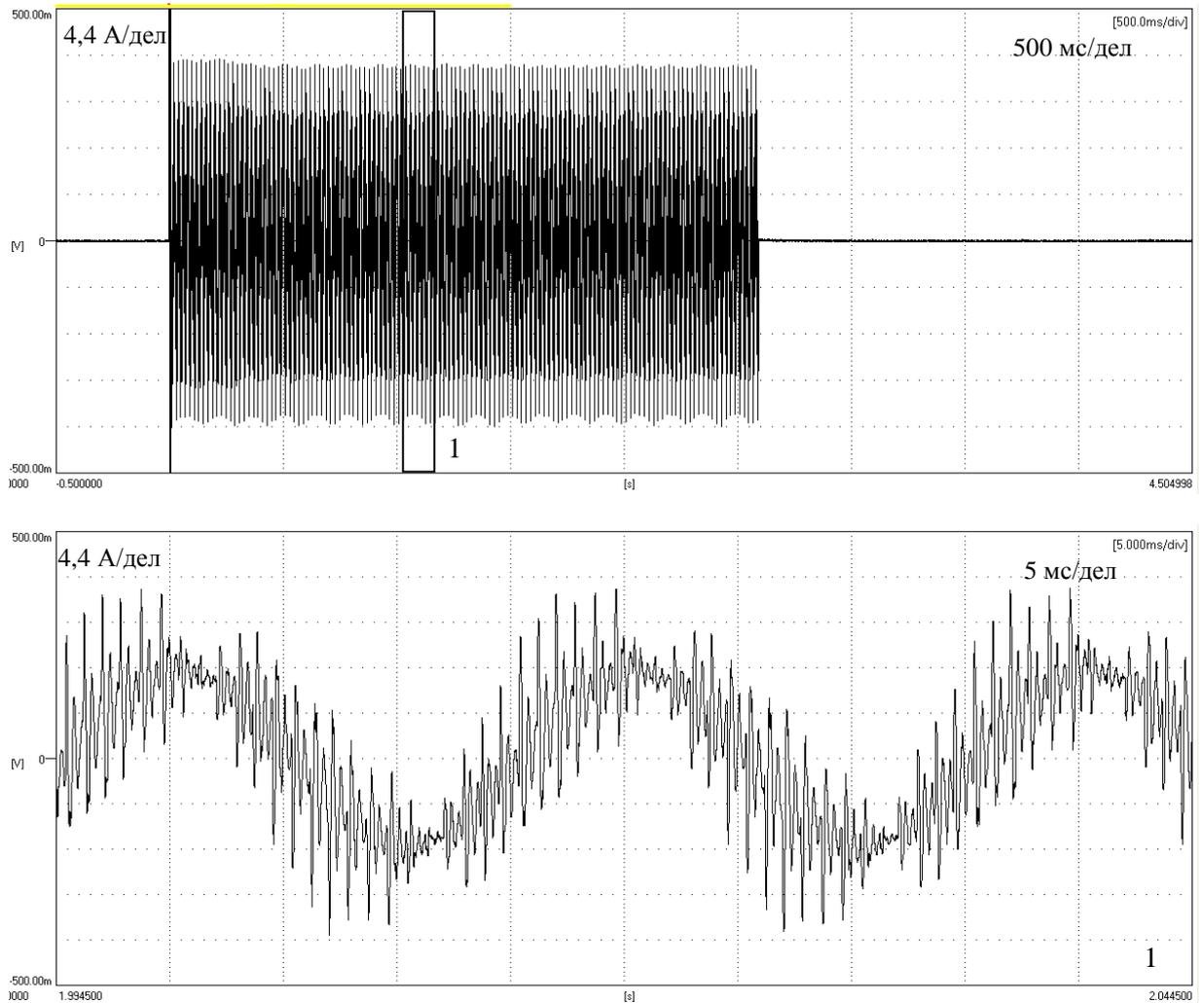


Рисунок 1.5 - Натурная осциллограмма тока однофазного замыкания на землю сети 10 кВ

Величина тока замыкания на землю частоты 50 Гц составляет 2,04А. В токе видны гармонические искажения аналогичные искажениям в напряжении. Согласно натурной осциллограмме один период колебаний ВГ в токе ОЗЗ составляет 185 мкс, что соответствует частоте 5400 Гц. Оценим влияние параметров сети на появление ВГ, для этого рассчитаем частоту свободных составляющих переходных процессов в сети электроснабжения ЭГПА. Относительно протекания ВГ основные элементы контура представлены на рисунке 1.6.

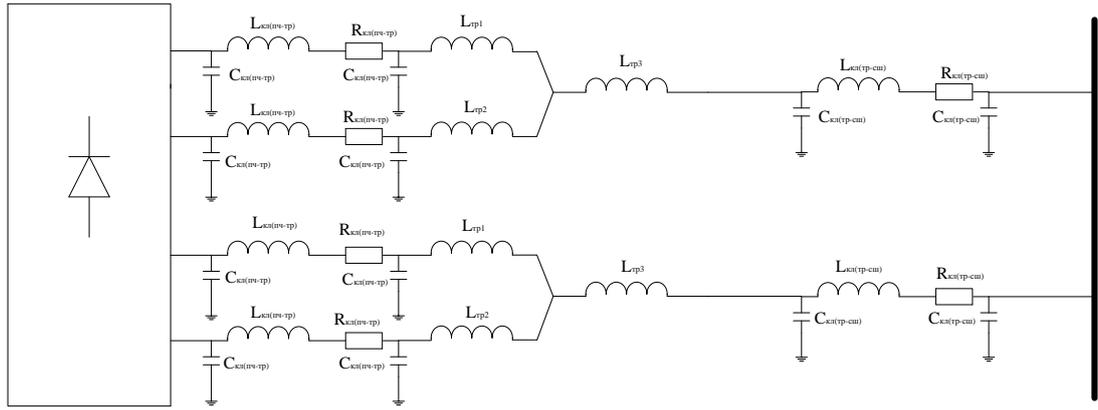


Рисунок 1.6 - Принципиальная однолинейная схема замещения электроснабжения преобразователя частоты ЭГПА

На схеме:

$L_{\text{кл(пч-тр)}}$  – индуктивность кабеля связывающего преобразователь частоты и согласующий трансформатор;

$R_{\text{кл(пч-тр)}}$  – активное сопротивление кабеля связывающего преобразователь частоты и согласующий трансформатор;

$C_{\text{кл(пч-тр)}}$  – емкость кабеля связывающего преобразователь частоты и согласующий трансформатор;

$L_{\text{кл(тр-сш)}}$  – индуктивность кабеля связывающего согласующий трансформатор и секции шин;

$R_{\text{кл(тр-сш)}}$  – активное сопротивление кабеля связывающего согласующий трансформатор и секции шин;

$C_{\text{кл(тр-сш)}}$  – емкость кабеля связывающего согласующий трансформатор и секции шин;

$L_{\text{тр1}}$  – индуктивность третичной обмотки трансформатора;

$L_{\text{тр2}}$  – индуктивность вторичной обмотки трансформатора;

$L_{\text{тр3}}$  – индуктивность первичной обмотки трансформатора;

Длина шины связывающей преобразователь частоты и согласующий трансформатор составляет единицы метров (около 10), поэтому не имеет существенного влияния на рассматриваемые процессы.

Питание согласующих трансформаторов осуществляется при помощи кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена ПвЭВнгд 3×50 длиной 370 метров.

Исходя из сделанных допущений, перейдем к следующей схеме замещения представленной на рисунке 1.7.

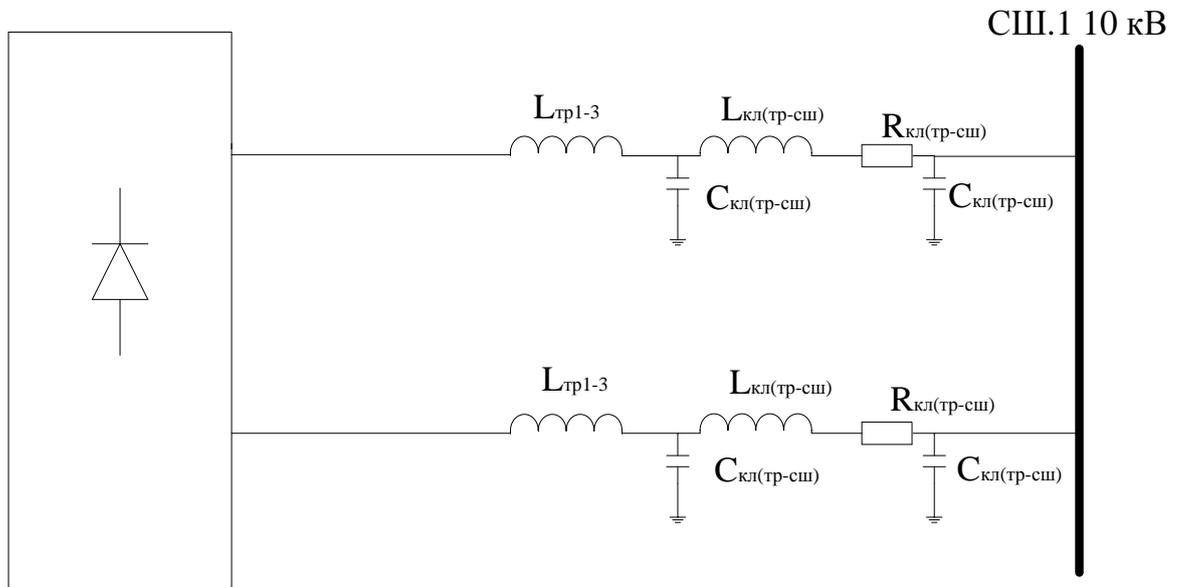


Рисунок 1.7 - Эквивалентная схема замещения электроснабжения преобразователя частоты ЭГПА

На схеме:

$L_{\text{кл(тр-сш)}}$  – индуктивность кабеля связывающего согласующий трансформатор и секции шин;

$R_{\text{кл(тр-сш)}}$  – активное сопротивление кабеля связывающего согласующий трансформатор и секции шин;

$C_{\text{кл(тр-сш)}}$  – емкость кабеля связывающего согласующий трансформатор и секции шин;

$L_{\text{тр1-3}}$  – индуктивность трансформатора;

Каждый ключ при коммутации создает собственное возмущение, поэтому при расчете следует учитывать каждую ветвь отдельно.

Частота свободных составляющих может быть определена исходя из выражения:

$$\frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \omega \quad (1.1)$$

Где, L – эквивалентная индуктивность сети, Гн

C – эквивалентная емкость сети, Ф

Емкость сети, исходя из величины тока, составляет 0,0825 мкФ. Индуктивность контура складывается из индуктивностей кабеля и трансформатора. Согласно произведенным расчетам величина индуктивности составляет 18 мГн.

Согласно выражению (1.1) расчетная частота свободной составляющей переходного процесса равна 5830 Гц, что качественно и количественно соотносится с результатами натурных измерений. Погрешность определения частоты составляет 7,3%.

Таким образом, ВГ в токе ОЗЗ являются свободными составляющими переходного процесса возникающего из-за коммутации полупроводниковых ключей преобразователя при ненулевом значении тока. В таком случае параметры ВГ: амплитуда и частота определяется параметрами сети и ЧП. Схема сети в течение дня может значительно меняться и тем самым влиять на ВГ.

## 1.2 Теория горения дуги

### 1.2.1 Общие положения

Согласно статистике, основным видом повреждений для сетей среднего класса напряжения являются однофазные замыкания на землю. При длительном существовании замыкания, более 60% однофазных повреждений переходят в многоместные пробой изоляции, по причине воздействий перенапряжений. Принято считать, что порядка 30% из них возникают вследствие воздействий на изоляцию нестабильного горения дуги, а более 50% по причине появления перенапряжений высокой кратности [29]. По данным [30] в угольной промышленности 35,5% пожаров в подземных выработках шахт происходило

от тепловых импульсов электрической энергии, выделяющихся в рудничную атмосферу при эксплуатации электрических сетей.

При возникновении ОЗЗ происходит ударный перезаряд емкости эквивалентной сети, что приводит к существенному всплеску напряжения на неповрежденных фазах. В отдельных случаях уровень всплеска (уровень перенапряжений) может достигать  $2,1-2,2 U_{\text{фmax}}$ , что является опасным для некоторых типов оборудования. Процесс замыкания может быть как устойчивым, так и сопровождаться возникновением дуги. В процессе развития аварии возможно возрастание напряжения на нейтрали (эскалация), что приводит к росту перенапряжений.

Основные положения горения дуги изложены в [31-32]. Основу теории горения дуги заложил в 1916 г. Петерсен. В своей работе он изложил физическую сущность процесса и определил предельные значения перенапряжений. Чуть позже Петерс и Слепьян предложили иную концепцию теории горения дуги. Многие ученые, такие как И.М. Сирота, Ф.А. Лихачев, М.Х. Зихерман и многие другие дополняли и уточняли теории на основании лабораторных исследований и теоретических расчетов. В 1957 г. Н.Н. Беляков опубликовал теорию возникновения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю.

Отличительными предположениями теории горения дуги Петерсена являются следующие:

- замыкание на землю рассматривается в виде непосредственного контакта токоведущей части с землей. В действительности дуга представляет собой нелинейное сопротивление и имеет динамический характер, т.е. напряжение на дуге не имеет четко выраженных пиков гашения, как это принято считать для статической характеристики;

- повторные зажигания имеют строгую периодичность, каждый полупериод промышленной частоты, при максимальном напряжении на поврежденной фазе. Для такого случая определена максимальная кратность перенапряжений относительно фазного напряжения: 7,5;

- для каждого цикла повторного зажигания принята одинаковая, равная полупериоду промышленной частоты длительность горения дуги. Однако, лабораторные исследования показывают увеличения величины тока и скорости его изменения;

- каждый цикл зажигания – погасания дуги приводит к эскалации напряжения на нейтрали;

- каждый полупериод перенапряжения изменяет свой знак.

В теории Петерса и Слепяна:

- повторные зажигания, представлены в виде «металлического» замыкания. Период повторного зажигания принят через каждый период;

- длительность горения дуги также принята за полупериод промышленной частоты;

- гашение дуги происходит при каждом переходе тока ОЗЗ промышленной частоты через нулевое значение;

- перенапряжения знак не меняет.

Теория горения дуги Белякова значительно отличается от двух других теорий. В ней основным отличительным моментом является непериодичность повторных зажиганий. Процесс повторных зажиганий представлен в виде условия конкуренции восстанавливающегося напряжения на фазе и электрической прочности места пробоя.

Также Беляковым было выделено следующее:

- для обеспечения достаточной величины первого пика восстанавливающегося напряжения необходимо, чтобы замыкание произошло раньше максимума фазы;

- для увеличения кратности перенапряжений необходимо, чтобы последующее замыкание произошло при напряжении поврежденной фазы больше чем при первом зажигании.

Последняя теория представляет собой более приближенное к эксплуатационной практике видение процесса. В частности, процесс восстановления

электрической прочности и устойчивости горения дуги зависит от различных факторов:

- величины тока однофазного замыкания на землю;
- среда в которой произошел пробой: температура и давление.

Компенсация емкостных токов однофазного замыкания на землю, широко применяемая в настоящее время с целью повышения надежности электрических сетей напряжением 6-35 кВ, позволяет уменьшить ток в месте повреждения и, тем самым, повысить вероятность погасания дуги и ликвидации аварии в сети.

Система компенсации емкостного тока замыкания на землю представляет собой регулируемую индуктивность. На особенностях систем компенсации подробно остановимся в разделе 1.3.

### **1.2.2 Горение дуги при возникновении гармонических искажений**

Основным назначением катушки компенсации емкостного тока является снижение тока промышленной частоты в месте замыкания, при строгой настройке в резонанс, до нуля и отсутствии активной составляющей тока нулевой последовательности замыкания на землю.

На практике точная настройка практически неосуществима. В месте замыкания протекает небольшой остаточный ток замыкания на землю первой гармоники, ток активных утечек, а также присутствуют высшие гармоники различной величины [33].

При возникновении замыкания на землю, напряжение на неповрежденных фазах по отношению к земле поднимается до линейного напряжения. В случае замыкания фазы на землю, ток замыкания на землю зависит от сопротивления эквивалентного генератора, которое определяется параметрами контура протекания токов нулевой последовательности, т.е. относительно места замыкания.

В результате наложения нескольких частотных составляющих в напряжении или токе, среднее значение гармонических искажений за период опре-

делится как корень квадратный из суммы квадратов всех действующих значений частотных составляющих.

Одна из первых работ рассматривавших вопрос возникновения гармонических искажений в токе замыкания на землю является [100]. В работе отмечается возможность компенсации в отдельных случаях компенсации высших гармоник. Однако, рост нелинейной нагрузки потребителей в последнее десятилетие и развитие оснащения сетей обусловили рост гармонических искажений и как следствие необходимости разработки системы компенсации тока гармонических искажений.

В [29] проводится исследование влияния ВГ на переходные процессы при учете гармонических искажений в токе ОЗЗ. Согласно проведенным расчетам делается следующий вывод: «основной причиной существенного отличия в переходных процессах следует считать наличие большого процента гармоник в фазных токах в интервале времени прохождения минимума нагрузки».

Следует отметить, что на уровень гармонических искажений при возникновении замыкания влияет переходное сопротивление в месте дугового замыкания. Данный параметр имеет крайне нелинейный характер.

При наличии в токе ОЗЗ значительной доли высших гармоник вероятность повторных пробоев, а, следовательно, и ускоренный рост перенапряжений, при дуговом замыкании повышается, а значит растет вероятность повреждения изоляции. Это объясняется тем, что результат процесса горения дуги зависит от величины и состава тока ОЗЗ в точке замыкания. При значениях этого тока более 8-15 А дуга с вероятностью, превышающей 0,5, будет гаснуть не в первый, а в любой из последующих переходов тока через ноль или вообще гореть длительно[34].

Сети промышленных предприятий имеют, как правило, крупную разветвленную схему кабельных линий, что обуславливает существенный рост тока однофазного замыкания на землю. Для сетей 6-10 кВ с токами замыкания свыше 50А, и большим числом параллельных фидеров высока вероят-

ность развития суб- и ультрагармонических резонансных процессов [35], и, вместе с тем, данные сети, как правило, имеют большое число нелинейных нагрузок. Вопросы гармонических резонансов в токе и напряжении нормального режима представлены в [36,37].

### 1.3 Устройства предотвращения дуговых перенапряжений

Согласно исследованиям ОРГРЭС по данным 2005 г. Из 25264 секций шин сети 6-35 кВ, компенсация тока ОЗЗ требуется на 2632 секциях. На момент проведения исследований в сети были установлены 2419 секций, т.е. 91,9%.

#### 1.3.1 Общие положения

Появление однофазного замыкания на землю не оказывают влияния на питание электроэнергией потребителей, поэтому данный вид повреждений не подлежит немедленному отключению. Общепринятой мерой [1] по снижению аварийности является оснащение нейтрали сети дугогасящей катушкой. Устройства компенсации емкостного тока предназначены для снижения тока протекающего в месте возникновения замыкания [38].

При появлении однофазного замыкания на землю возникает напряжение смещения нейтрали, равное напряжению поврежденной фазы:  $U_0 = - U_A$  (Рисунок 1.8). При этом индуктивный ток дугогасящего реактора  $I_p$  равен:

$$I_p = j \cdot \frac{3 \cdot U_\phi}{3 \cdot \omega \cdot L_p + \omega \cdot L_T},$$

где  $L_p$  и  $L_T$  - индуктивности дугогасящего реактора и трансформатора соответственно;

$U_\phi$  - фазное напряжение.

Согласно [40] допускается эксплуатация сети в режиме однофазного замыкания на землю на время поиска и отключения оперативным персоналом поврежденного присоединения.

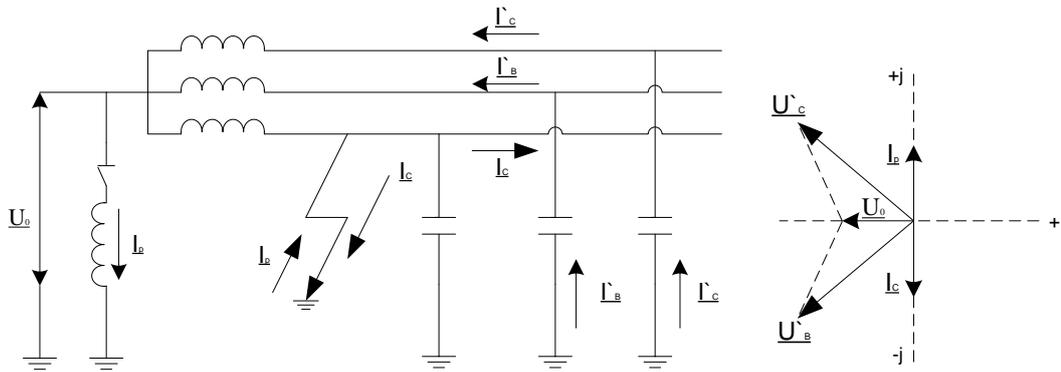


Рисунок 1.8 - Замыкание фазы на землю в сети с компенсацией емкостных токов

При  $I_P = I_C$  емкостная составляющая тока 50 Гц замыкания на землю в месте замыкания полностью компенсируется индуктивным током реактора - возникает резонанс токов. С точки зрения увеличения вероятности погасания дуги, дугогасящий реактор, как правило, должен иметь резонансную настройку.

Отклонение от резонансной настройки называют расстройкой компенсации. Согласно пункту 1.5 [40] допускается настройка с перекомпенсацией, при которой индуктивная составляющая тока замыкания на землю не превышает 5 А, а степень расстройки – 5 %. Если установленные в сетях 6-20 кВ дугогасящие реакторы со ступенчатым регулированием индуктивности имеют большую разность токов смежных ответвлений, допускается настройка с индуктивной составляющей тока замыкания на землю не более 10 А. В сетях 35 кВ при емкостном токе менее 15 А допускается степень расстройки не более 10 %. В воздушных сетях 6-10 кВ с емкостным током замыкания на землю менее 10 А степень расстройки не нормируется. Настройка с недокомпенсацией допускается только при недостаточной мощности дугогасящего реактора и при условии, что любые аварийно возникающие несимметрии емкостей фаз сети (обрыв проводов, растяжка жил кабеля) не могут привести к появлению напряжения смещения нейтрали, превышающего 70 % фазного напряжения. При недокомпенсации расстройка не должна превышать 5 %.

Следует отметить, в сетях Мосэнерго и Вологдаэнерго зафиксированы перенапряжения при двухфазных КЗ на землю при определенных настройках реактора.

С точки зрения гашения дуги, оптимальной, все же, является резонансная настройка. Всякая расстройка компенсации ведет к увеличению величины тока в месте замыкания, и поэтому не рекомендуется.

Одной из основных проблем резонансной настройки тока компенсации является возможность возникновения резонансного увеличения напряжения на нейтрали.

При установке дугогасящего реактора в нейтраль сети схема представляет собой резонансный контур, в котором возможны значительные повышения напряжения на индуктивности катушки. В нормальном режиме эксплуатации напряжение смещения нейтрали в сети с ДГР может возникнуть из-за напряжения несимметрии на нейтрали, связанного в основном с различием емкости фаз на землю (характерно для ВЛ), но возможно возникновение значительного напряжения несимметрии на нейтрали из-за несимметричной нагрузки, либо фазных ЭДС, а также по ряду других причин. В цепь протекания токов входит индуктивность трансформатора, в нейтраль которого подключен ДГР.

При резонансном заземлении и большой добротности реактора  $q = X_p/R_p$  напряжение на нейтрали может быть определено упрощенно по выражению  $U_N \approx q \cdot U_{Nxx}$ . Поскольку добротность современных ДГР весьма велика (50-100), то даже при небольшой несимметрии сети при точной настройке дугогасящего реактора (или при попадании настройки дугогасящего реактора в резонанс), на нейтрали и, следовательно, на фазах могут возникнуть опасные перенапряжения.

В качестве примера можно привести результаты замеров напряжения смещения нейтрали в распределительной сети 35 кВ. Сеть состоит из воздушных линий, общей протяженностью 144 км. Для компенсации тока однофазного замыкания на землю в сети установлена ступенчатая катушка типа ЗРОМ-275/35. В нормальном режиме при отключенной катушке напряжения смещения нейтрали составляет 766,96 В. Зависимость напряжения смещения нейтрали от тока компенсации представлена в таблице 1.3. Фактический ток

замыкания на землю, во время проведения опыта, согласно предварительным замерам прямым способом, составил 8,86 А. При настройке катушки близкой к резонансу – 9 А, напряжение смещения нейтрали составило 9049,15 В.

Таблица 1.3 - Напряжение смещения нейтрали сети 35 кВ

Положение отпайки ДГР	Без ДГР	1	2	3	4	5
Ток ДГР, А	-	6,6	7,5	9	10,8	12,6
Напряжение на нейтрали, В	766,97	3400,41	7503,97	9049,15	2871,91	1491,76

На рисунке 1.9 приведена резонансная кривая напряжения смещения нейтрали при варьировании тока компенсации сети 35 кВ.

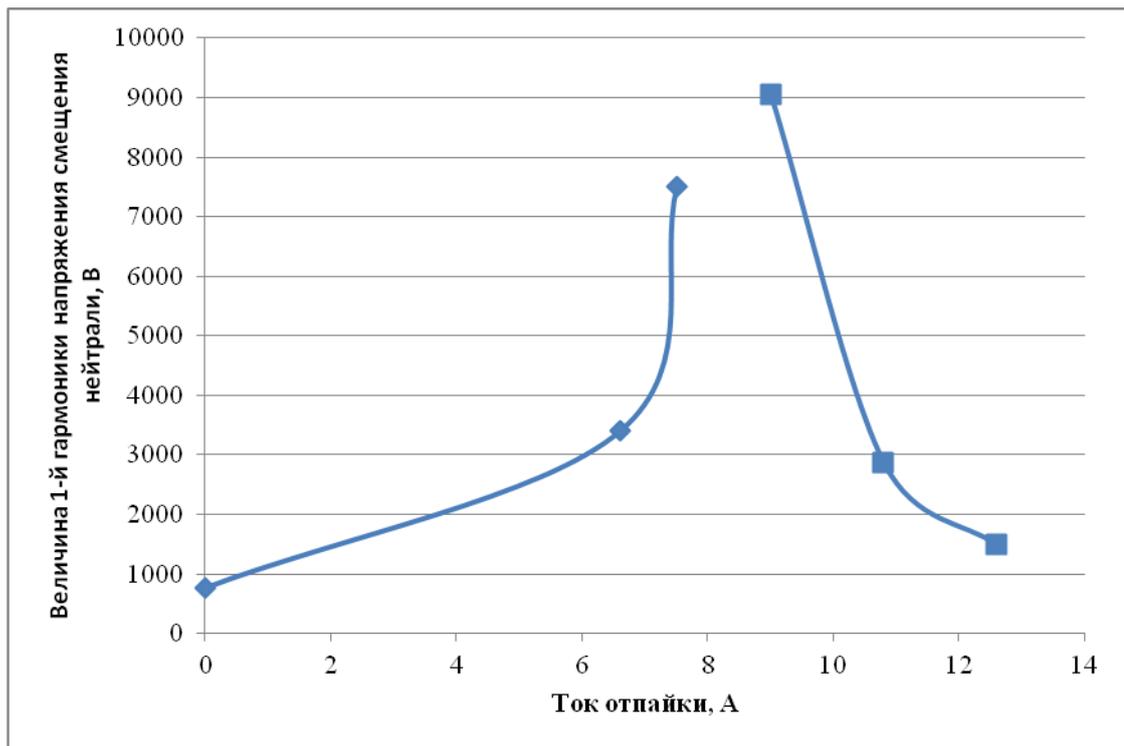


Рисунок 1.9 - Напряжение смещения нейтрали 50 Гц в зависимости от тока ДГР

При проведении расчетов выявлено, что точная настройка в резонанс приводит к увеличению напряжения смещения нейтрали до полного фазного напряжения. Что в свою очередь обуславливает появление установившихся перенапряжений величиной  $1,73 \cdot U_{\text{наиб}}$ .

### 1.3.2 Конструктивное выполнение устройств предотвращения дуговых перенапряжений

Дугогасящий реактор, в общем случае, представляет собой индуктивную обмотку, непосредственно создающую ток компенсации, расположенную на стальном магнитопроводе. Наличие магнитопровода обуславливает необходимость учета нелинейного характера аппарата. Нелинейная характеристика намагничивания в пределах изменения напряжения на нейтрали в режиме замыкания на землю, должна быть минимальной, иначе индуктивность катушки, а значит, и установленная степень настройки будут меняться в зависимости от приложенного напряжения. Линейность характеристики намагничивания может быть обеспечена наличием воздушных зазоров, распределенных более или менее равномерно по магнитопроводу, и таким выбором сечения, чтобы магнитная индукция была меньше индукции насыщения.

Изоляция обмотки выполняется так же, как изоляция силовых трансформаторов. Обмотка помещена в бак, заполненный маслом. Некоторые катушки имеют встроенный в бак трансформатор тока. Все типы катушек снабжаются расширителем с масломерным стеклом и термометром с сигнальным контактом [41].

Согласно пункту 1.3 [40] для компенсации емкостного тока замыкания на землю должны применяться дугогасящие заземляющие реакторы с плавным или ступенчатым регулированием индуктивности. Исторически первыми возникли катушки со ступенчатым принципом регулирования, требующие ручного управления тока компенсации. Однако в настоящий момент устройства компенсации представляют собой сложные системы, позволяющие производить автоматическую настройку тока компенсации. Условно катушки можно разделить на катушки с автоматическим (плунжерные и с подмагничиванием) и ручным (ступенчатым) управлением тока компенсации [42]. Рассмотрим подробнее принцип построения систем компенсации различного принципа.

### 1.3.3 Устройства предотвращения дуговых перенапряжений со ступенчатым регулированием тока компенсации

Согласно пункту 1.4 [40] в электрических сетях, где в процессе эксплуатации емкостный ток замыкания на землю изменяется не более чем на  $\pm 10\%$ , рекомендуется применять дугогасящие реакторы со ступенчатым регулированием индуктивности.

Для регулирования тока компенсации ступенчатой ДГР внутри бака помещен переключатель ответвлений, с помощью которого можно изменять ток компенсации. Привод переключателя выведен наружу на крышку бака либо имеет штурвал с фиксатором положения.

Катушки со ступенчатым регулированием позволяют изменять ток в диапазоне от 50—100% номинального тока катушки. Для этого дугогасящие катушки имеют пять, шесть или девять ответвлений.

Катушка снабжена сигнальными обмотками на 110 В и 10 А, которые служат для питания цепей сигнализации и контроля работы. Сигнальные обмотки, так же как и главные, имеют ответвления, выведенные на переключатель, с тем, чтобы при изменении настройки коэффициент трансформации сигнальной обмотки оставался неизменным. На сегодняшний день наиболее распространены ступенчатые катушки, изготовленные Московским электрозаводом, типа РЗДСОМ (защитный реактор однофазный масляный).

Рабочие токи катушек типа РЗДСОМ выбираются так, чтобы минимальный ток был равен половине нормального. Интервалы между промежуточными ответвлениями приблизительно одинаковы.

В таблице 1.4 приведены основные данные реакторов конструкции РЗДСОМ Московского электрозавода, предназначенных для компенсации емкостного тока при однофазном замыкании на землю.

Недостаток ее состоит главным образом в том, что регулировка производится вручную, только в обесточенном состоянии катушки. Возможности своевременного регулирования тока компенсации в сети с большим числом

рабочих переключений очень ограничены: ток изменяется ступенями и число ответвлений незначительно.

В настоящее время катушки со ступенчатым регулированием имеют узкую область эффективного использования. Согласно пункту 1.4 [40] в электрических сетях, где в процессе эксплуатации емкостный ток замыкания на землю изменяется более чем на  $\pm 10\%$ , рекомендуется применять реакторы с плавным регулированием индуктивности, настраиваемые вручную или автоматически. Автоматическая настройка компенсации рекомендуется в сетях 35 кВ при емкостном токе замыкания на землю более 10 А и в сетях 6-10 кВ при емкостном токе более 50 А. Для этого в процессе эксплуатации катушки должны сочетаться с автоматическими регуляторами, которые могли бы при любых коммутационных изменениях схемы сети поддерживать заданный уровень компенсации, обеспечивающий наибольшую надежность работы сети.

Автоматический регулятор тока компенсации должен обеспечивать плавное изменение тока компенсации. Конструктивное решение этой задачи может быть получено с использованием двух основных принципов изменения индуктивности катушки: изменение рабочей индуктивности катушки, за счет изменения геометрии магнитной цепи аппарата (воздушного зазора в магнитопроводе - плунжерные дугогасящие катушки); внесением дополнительного магнитного потока, при помощи дополнительного подмагничивания магнитопровода аппарата (катушки с подмагничиванием). Следует отметить, что, согласно исследованию ОРГРЭС, 75,5% от общего числа установленных дугогасящих реакторов составляют ступенчатые реакторы.

Таблица 1.4. - Основные параметры реакторов типа РЗДСОМ производства Московского электрозавода

Тип	Номинальное напряжение реактора,	Напряжение сигнальной обмотки,	Предельные токи реактора,
	кВ	В	А
РЗДСОМ-115/6 У1	$6,6/\sqrt{3}$	100	25 - 12,5
РЗДСОМ-230/6 У1	$6,6/\sqrt{3}$		50 - 25
РЗДСОМ-460/6 У1	$6,6/\sqrt{3}$		100 - 50
РЗДСОМ-920/6 У1	$6,6/\sqrt{3}$		200 - 100
РЗДСОМ-190/10 У1	$11/\sqrt{3}$		25 - 12,5
РЗДСОМ-380/10 У1	$11/\sqrt{3}$		50 - 25
РЗДСОМ-760/10 У1	$11/\sqrt{3}$		100 - 50
РЗДСОМ-1520/10 У1	$11/\sqrt{3}$		200 - 100
РЗДСОМ-115/15,75 У1	$15,75/\sqrt{3}$		10-5,0
РЗДСОМ-155/20 У1	$22/\sqrt{3}$		10-5,0
РЗДСОМ-310/35 У1	$38,5/\sqrt{3}$		12,5 - 6,25
РЗДСОМ-620/35 У1	$38,5/\sqrt{3}$		25 - 12,5
РЗДСОМ-1240/35 У1	$38,5/\sqrt{3}$		50 - 25

Увеличение кабельного хозяйства в последние десятилетия привело к необходимости реконструкции или модернизации существующих ступенчатых систем компенсации и обеспечения автоматического плавного регулирования тока компенсации.

### 1.3.4 Устройства предотвращения дуговых перенапряжений с плавным регулированием тока компенсации

Конструкции катушек с плавным регулированием подробно описаны в [37-40, 59]. К катушкам плунжерного типа следует отнести конструкции типа РДМР, РЗДПОМ и другие. Конструкция катушки позволяет плавно изменять ток компенсации в очень широком диапазоне без отключения катушки от сети, в нормальном режиме. Терминалы управления вынесены в помещение подстанции, что позволяет осуществлять контроль и настройку дистанционно, что в сочетании с телемеханическими устройствами позволяет удаленному оператору контролировать систему компенсации.

Изменение индуктивности катушки обеспечивается благодаря изменению воздушного зазора в магнитопроводе.

Поскольку катушки управляются электрическим приводом, для стабильной работы требуется обязательное резервирование питания цепей управления.

Ток катушки при постоянных витках и частоте сети для сравнительно небольших значений магнитной индукции в магнитопроводе прямо пропорционален приложенному напряжению и воздушному зазору, что очень важно для удобства автоматического регулирования компенсации.

Обмотка катушки выполняется иначе, чем в конструкции ЗРОМ. Главная обмотка (силовая) состоит из двух частей: главной нерегулируемой, без всяких ответвлений, с изоляцией, рассчитанной на полное фазное напряжение сети, и дополнительной, рассчитанной на 20% номинальной мощности катушки (на время 60 с). Дополнительная обмотка используется для автоматики. Кроме того, есть сигнальная измерительная обмотка на 100 В класса точности 1 или 2. Последовательно с обмотками включается встроенный в катушку измерительный трансформатор тока класса точности 1. Имеются механические и дистанционные электрические указатели положения ответвлений, т. е. уставок катушки по току, а также датчики температуры и концевые выключатели, не допускающие перехода за крайние положения.

Параметры катушек, изготавливаемых в России приведены в таблице 1.5. К достоинствам катушек этой конструкции нужно отнести линейность вольт-амперной характеристики (характеристики намагничивания). Также эффективное использование активных материалов, экономичность: однажды установленная индуктивность удерживается далее без затрат энергии и дополнительных внешних воздействий; простота математического описания тока компенсации и лёгкость управления.

Таблица 1.5 - Основные параметры реакторов типа РДМР

Номинальное напряжение, кВ	Тип катушки	Мощность, кВ.А	Пределы регулирования тока компенсации, А	
			В трехчасовом режиме работы	В шестичасовом режиме работы
6	РДМР-300/6	300	5-80	5-80
	РДМР -360/6	360	5-100	5-100
	РДМР -440/6	440	6-120	6-120
	РДМР -490/6	490	7-135	7-135
10	РДМР -300/10	300	3-50	3-50
	РДМР -485/10	485	5-80	5-70
	РДМР -610/10	610	5-100	5-90
	РДМР -730/10	730	6-120	6-95
	РДМР -820/10	820	7-135	7-100

Плунжерные катушки работают с различными автоматическими регуляторами: РНДК, БАНК, БАПК, УАРК и др. Следует отметить, особенностью работы автоматики управления плунжерной катушки является блокировка изменения уставки тока компенсации при возникновении замыкания.

Также широкое распространение получили катушки с дополнительным подмагничиванием магнитопровода. Дугогасящие реакторы типа РУОМ производства ОАО "Раменский электротехнический завод (РЭТЗ) "Энергия" являются управляемые подмагничиванием реакторами с глубоким насыщением магнитной цепи [43-44].

Принцип действия, теория работы и основные функциональные возможности этих устройств изложены, в частности, в [45-52].

Реактор типа РУОМ состоит из двух основных функциональных блоков: электромагнитной части и тиристорного преобразователя. Электромагнитная часть и тиристорный преобразователь расположены в общем маслонаполненном баке и предназначены для эксплуатации на открытой площадке.

Реакторы в обязательном порядке комплектуются специально разработанной под них электронной системой управления, без которой нормальное функционирование дугогасящего реактора невозможно. Система управления скомпонована в одном корпусе и предназначена для эксплуатации в закрытом отапливаемом помещении.

Для РУОМ, согласно указанным выше публикациям, устранены присутствующие в работе ранее выпускавшихся дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием, такие существенные недостатки: значительное искажение формы тока высшими гармониками, длительный переходный процесс выхода на требуемый режим работы.

«Дугогасящий реактор работает следующим образом. Пока мгновенное значение напряжения нулевой последовательности на вторичной обмотке трансформатора напряжения (например, типа НАМИ производства ОАО «РЭТЗ Энергия») не достигло критического значения, равного 0,15 максимума номинального напряжения этой обмотки, система управления воспринимает это как нормальный режим работы сети. В этом режиме системой управления через сигнальную обмотку РУОМ генерируются в сеть импульсы тока длительностью порядка 1 мс. Интервал повторений импульсов тока зависит от мощности, реактора, состояния сети и находится в пределах от 0,1 до 0,3 с. Импульс тока подзаряжает емкость сети, что вызывает последующее резонансное затухающее колебание напряжения между емкостью и реактором. По характеру колебательного процесса можно, в принципе, определить емкость сети, индуктивность реактора и добротность контура замыкания токов нулевой последовательности. В самом деле, емкостная проводимость сети обратно пропорциональна скорости нарастания напряжения на нейтрали. Отношение частоты свободных колебаний к рабочей частоте сети показывает степень расстройки реактора от резонанса. Скорость затухания колебаний характеризует добротность сети, по этому показателю устанавливается минимально допустимый интервал между соседними импульсами тока.» [50].

«Информация, полученная при измерении емкости сети, используется системой управления для выработки двух типов командных сигналов. Один из них задает и поддерживает неограниченно долго требуемую для точной резонансной настройки с емкостью сети проводимость реактора. Второй обеспечивает смещение рабочей точки магнитных потоков в стержнях реактора в такое положение, при котором свободные составляющие переходного процесса в реакторе будут равны нулю, и при возникновении замыкания на землю в нем сразу же возникает установившийся режим, соответствующий точной настройке реактора на режим компенсации тока дуги. Командные сигналы первого типа воздействуют на тиристоры преобразователя реактора, второго — на его магнитную систему.» [50].

«При возникновении замыкания на землю и возникновении напряжения на нейтрали более 15% фазного генерация импульсов системой управления прекращается и в реакторе устанавливается индуктивная проводимость, равная последнему перед замыканием значению емкостной проводимости сети.»

«Компенсация основной гармоники реактивной составляющей емкостного тока происходит мгновенно, остаточный ток дуги в случае использования РУОМ несколько искажен высшими гармониками, однако их значения не превышают активной составляющей тока реактора и суммарный остаточный ток не превышает 3 А (действующее значение). В случае исчезновения замыкания реактор продолжает сохранять проводимость неизменной и частота свободных колебаний напряжения на реакторе остается равной частоте сети. Это обеспечивает плавное восстановление напряжения в фазах без каких-либо перенапряжений.» [50].

Основные технические данные управляемых подмагничиванием дугогасящих реакторов типа РУОМ приведены в таблице 1.6 [50].

Таблица 1.6 - Основные технические данные управляемых подмагничиванием дугогасящих реакторов типа РУОМ приведены в табл. 1 (частота 50(60) Гц)

Номинальная мощность, кВтА	Номинальное напряжение, кВ	Диапазон регулирования тока компенсации (в длительном режиме)	Ток, А		Габариты ВхLхН и установочные размеры А1хА2 мм	Масса, кг	
			в режиме двухчасовой компенсации	реактора, остаточный, в точке замыкания		полная	масла
190	11,0/√3	2,5÷25,0	30	<2,0	1030х1165х1690 550х660	1200	
	6,6/√3	4,25÷42,5	50	<2,75			
300	11,0/√3	4÷40	48	<2,75	1180х1240х1890 550х820	1650	
	6,6/√3	6,6÷66,0	80	<3,5			
480	11,0/√3	6,3÷63,0	76	<3,5	1280х1320х1990 660х820	2450	
	6,6/√3	10,5÷105	126	<5,0			
840	11,0/√3	11÷110	132	<5,0	1980х1160х1950 1070х820	3500	1000

«Широкий диапазон изменения индуктивности в процессе подмагничивания для реакторов типа РУОМ достигается тем, что магнитная система реактора выполнена плоскошхтованной без воздушных зазоров. При отсутствии постоянных потоков подмагничивания (режим холостого хода) и номинальном напряжении рабочей обмотки ни в одном из сечений магнитопровода индукция не превышает значения индукции насыщения стали. В результате ток холостого хода не превышает 1-2% номинального тока.» [51].

«Существенное снижения содержания высших гармоник в токе реактора достигается за счет использования последовательного насыщения нескольких участков уменьшенного поперечного сечения магнитной цепи.

Природа процессов в реакторах типа РУОМ такова, что индуктивность реактора до замыкания на землю системой САНК «подготовлена» к такому замыканию, т.е. она вовсе не бесконечна. Поэтому при возникновении замыкания на землю и, следовательно, при появлении напряжения на реакторе через очень небольшое время после начала замыкания на землю (менее 0,01 с) реактор выходит на режим компенсации емкостного тока, а далее и на режим, при котором его индуктивность соответствует емкостному сопротивлению сети.

Из известных дугогасящих реакторов с подмагничиванием только в реакторах типа РУОМ осуществлен описанный выше алгоритм подготовки к безинерционному выходу на режим.»[50]

Безинерционный выход на режим компенсации и работа в режиме ОЗЗ обеспечивается реализацией достаточно сложного алгоритма работы всей системы РУОМ + САНК(либо САМУР). Отклонение в работе какой-либо части системы может приводить к ее неэффективности либо на отдельных стадиях процесса ОЗЗ, либо в целом.

Производство катушек с подмагничиванием налажено в России, Казахстане, Китае и других странах. Наибольшее распространение в России получили катушки с подмагничиванием выполненные Раменским Электрозаводом.

### **1.3.5 Экспериментальное исследование эффективности работы устройств предотвращения дуговых перенапряжений с плавным регулированием тока компенсации**

Для оценки работоспособности систем компенсации проведем анализ опытов однофазного замыкания на землю в сети с различными типами катушек: РДМР, РУОМ, УДГР, WF-PXB.

#### **Плунжерная катушка типа РДМР**

Объектом исследования является катушка типа РДМР-360/6 установленная в сети 6 кВ нефтеперерабатывающего завода. Согласно проведенным экспериментам величина тока 50 Гц однофазного замыкания на землю для данной сети с изолированной нейтралью составляет 39,48 А.

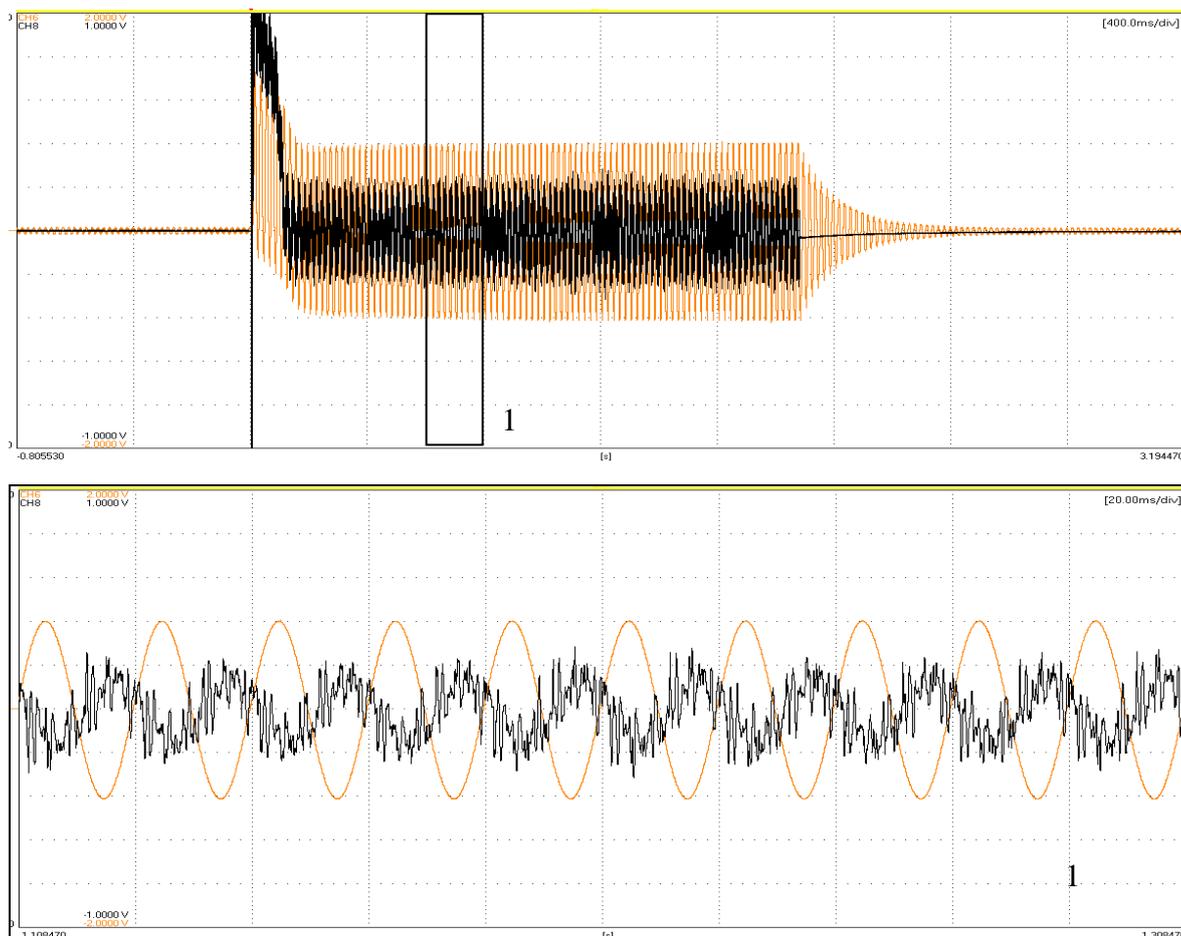


Рисунок 1.10 - Осциллограммы остаточного тока ОЗЗ и тока компенсации ДГР при измерениях в сети с компенсацией катушки типа РДМР-360/6  
 Масштабы по осям ординат: по оси « $I_{OЗЗ}$ » – 8,2 А/дел, по оси « $I_{ДГР}$ » – 24,0 А/дел

На рисунке 1.10 представлена осциллограмма натурального эксперимента однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью и автоматической настройкой тока компенсации. На осциллограмме показан остаточный ток однофазного замыкания на землю (черный цвет) и ток компенсации катушки (оранжевый цвет). Величина тока компенсации составляет 34,52 А, т.е. остаточный ток в месте замыкания 3,74 А (точность 9,5%). Гармонический состав составляющих токов представлен в таблице 1.7 (представлены гармоники свыше 0,1 А). Величина раскомпенсации определяется неточностью настройки дугогасящего реактора, токами активных утечек и гармоническими искажениями.

Таблица 1.7 - Действующие значения гармоник остаточного тока ОЗЗ и тока ДГР для сети 6 кВ, полученные в экспериментах «металлических» замыканий на землю

Номер гармоники	$I_{\text{ОЗЗост}}, \text{A}$	$I_{\text{ДГР}}, \text{A}$	$I_{\text{ОЗЗ}}, \text{A}$
1	3,737	34,523	39,476
3	0,204	0,138	0,204
5	0,712	0,032	0,719
7	1,289	0,031	1,373
9	0,169	0,005	0,153
11	0,755	0,005	0,770
13	0,626	0,004	0,701
15	0,641	0,003	0,625
16	0,106	0,001	0,102
17	1,797	0,006	1,797
18	0,105	0,001	0,083
19	0,732	0,001	0,782
21	0,429	0,001	0,395
25	0,415	0,001	0,411
29	0,18	0,001	0,218
31	0,37	0,001	0,381
33	0,071	0,001	0,065
35	0,231	0,001	0,238
36	0,219	0,001	0,214
37	0,511	0,001	0,567
38	0,117	0,001	0,112
40	0,1	0,001	0,103
$I_{\text{действ.2-40}}$	3,02	0,153	3,073

Как видно из таблицы, ток компенсации катушки типа РДМР практически не имеет высших гармоник. Время выхода тока компенсации на установившееся значение составляет 80 мс. за счет появления апериодической составляющей тока компенсации. В целом плунжерные катушки хорошо зарекомендовали себя в российских электрических сетях. Что подтверждается эксплуатационной практикой [53].

### **Катушка с подмагничиванием типа РУОМ**

Объектом исследования является катушка типа РУОМ-840/11 установленная в сети 10 кВ подстанции городских распределительных сетей. Согласно проведенным экспериментам величина тока 50 Гц однофазного замыкания на землю для данной сети с изолированной нейтралью составляет 83,93 А.

На рисунке 1.11 представлена осциллограмма натурального эксперимента однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью и автоматической настройкой тока компенсации. На осциллограмме показан остаточный ток однофазного замыкания на землю (черный цвет) и ток компенсации катушки (фиолетовый цвет). Величина тока компенсации составляет 142,89 А, т.е. остаточный ток в месте замыкания 49,92А (точность 59,47%). Гармонический состав составляющих токов представлен в таблице 1.8 (представлены гармоники свыше 0,1 А). Величина раскомпенсации определяется неточностью настройки дугогасящего реактора, токами активных утечек и гармоническими искажениями.

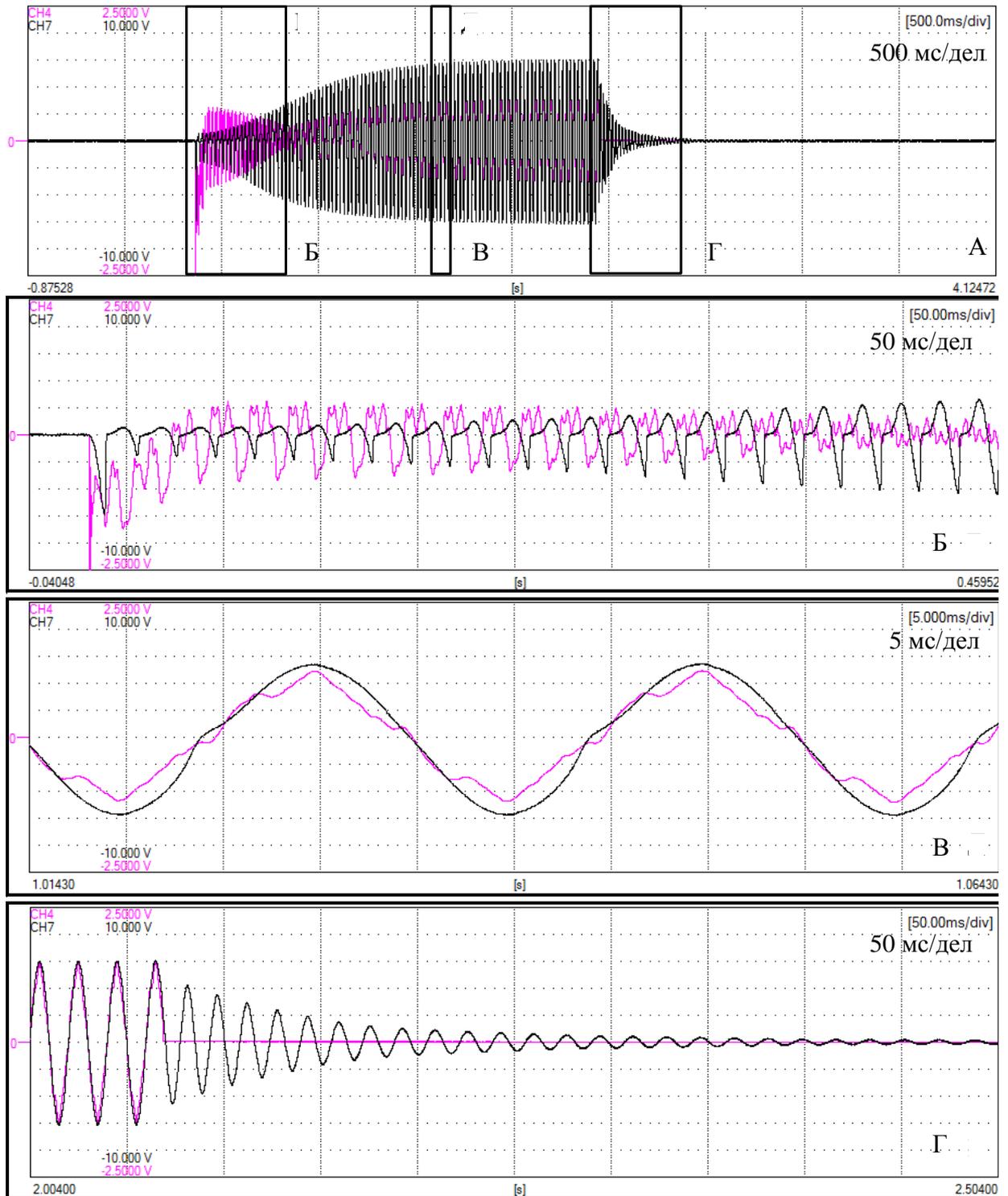


Рисунок 1.11 - Осциллограммы тока ДГР и остаточного тока замыкания на землю при ОЗЗ в сети 10 кВ

Масштабы по осям ординат:  $I_{\text{ДГР}}$  — 67 А/дел,  $I_{\text{ОЗЗ}}$  — 31 А/дел.

А – общая осциллограмма процесса искусственного однофазного замыкания на землю, Б – осциллограмма процесса возникновения замыкания на землю, В – осциллограмма установившегося процесса замыкания на землю, Г – процесс ликвидации замыкания на землю

Как видно из таблицы, ток компенсации катушки типа РУОМ содержит высшие гармоники. Время выхода на режим составляет 700 мс., в том числе апериодическая составляющая.

В целом накоплен значительный отрицательный опыт эксплуатации катушек типа РУОМ. В ряде организаций, таких как: РУП «Минскэнерго», ОАО «МРСК Волги» (с 2010 г.), ОАО «МРСК Северного Кавказа» (филиал «Ставропольэнерго»), ОАО «МОЭСК» (2011 г.) и других.

Таблица 1.8 - Действующие значения гармоник остаточного тока ОЗЗ и тока ДГР для сети. 10 кВ, полученные в экспериментах «металлических» замыканий на землю (в амперах)

Номер гармоники	$I_{\text{ОЗЗост. А}}$	$I_{\text{ДГР, А}}$	$I_{\text{ОЗЗ, А}}$
1	49,923	142,892	83,931
3	1,001	1,061	0,922
4	0,108	0,007	0,095
5	4,989	1,357	6,129
7	2,314	1,036	2,283
9	0,218	0,244	0,242
11	0,361	0,305	0,555
13	1,032	0,13	0,937
15	0,326	0,081	0,225
17	0,521	0,087	0,466
19	0,601	0,132	0,435
23	0,109	0,066	0,216
25	0,218	0,084	0,168
29	0,157	0,052	0,151
$I_{\text{действ.2-40}}$	5,775	2,067	6,746

### **Катушка с подмагничиванием типа УДГР**

Объектом исследования является катушка типа УДГР установленная в сети 6 кВ нефтеперерабатывающего завода. Согласно проведенным экспериментам, величина тока 50 Гц однофазного замыкания на землю для данной сети с изолированной нейтралью составляет 18,5 А.

На рисунке 1.12 представлена осциллограмма натурального эксперимента однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью и автоматической настройкой тока компенсации. На осциллограмме показан остаточный ток однофазного замыкания на землю (черный цвет) и ток компенсации катушки (фиолетовым цвет). Величина тока компенсации составля-

ет 9,38 А, т.е. остаточный ток в месте замыкания 9,12 А (точность 49,3%). Гармонический состав составляющих токов представлен в таблице 1.9 (представлены гармоники свыше 0,1 А). Величина раскомпенсации определяется неточностью настройки дугогасящего реактора, токами активных утечек и гармоническими искажениями.

Как видно из таблицы, ток компенсации катушки типа УДГР практически не имеет высших гармоник. Время выхода тока компенсации на установившееся значение составляет 300 мс. в том числе аperiodическая составляющая.

Таблица 1.9 - Действующие значения величин гармоник тока ОЗЗ и тока ДГР для сети 6 кВ, полученные в экспериментах «металлических» замыканий на землю

№ гармоники	$I_{\text{ОЗЗост. А}}$	$I_{\text{ДГР. А}}$	$I_{\text{ОЗЗ. А}}$
1	9,119	9,383	18,502
2	1,899	2,405	0,033
3	5,453	6,815	0,025
4	1,017	1,309	0,02
5	2,827	3,683	0,493
6	0,19	0,26	0,017
7	0,871	1,29	0,764
8	0,25	0,278	0,014
9	0,134	0,151	0,019
10	0,243	0,277	0,011
11	0,353	0,268	0,454
13	0,372	0,204	0,372
23	0,2	0,011	0,188
25	0,286	0,016	0,268
Идейств.2-40	6,947	8,754	1,119

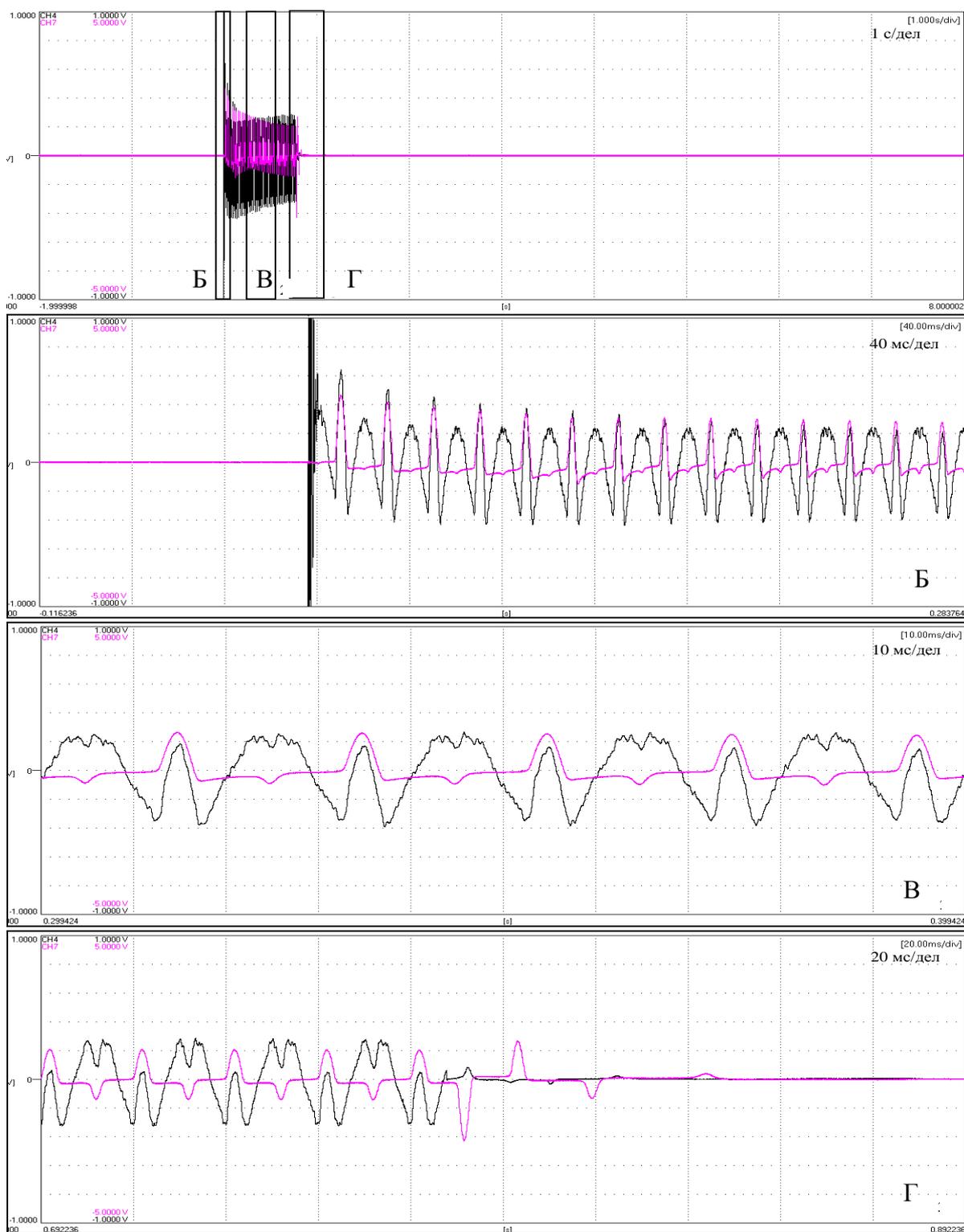


Рисунок 1.12 - Осциллограммы остаточного тока замыкания на землю и тока ДГР при ОЗЗ в сети 6 кВ. Масштабы по осям ординат:

по оси остаточного тока ОЗЗ – 12,35 кВ/дел, по оси тока ДГР – 33,33 А/дел

А – общая осциллограмма процесса искусственного однофазного замыкания на землю, Б – осциллограмма процесса возникновения замыкания на землю, В – осциллограмма установившегося процесса замыкания на землю, Г – процесс ликвидации замыкания на землю

Катушки УДГР мало распространены в России, поэтому сложно сделать однозначный вывод о качестве их работы. В настоящее время катушки типа УДГР сняты с производства. Вместо них разработана новая система компенсации типа УДГР-М мощностью до 400 кВар. Усовершенствованная система компенсации отличается способом определения тока замыкания на землю.

Для определения тока замыкания на землю катушка типа УДГР получала информацию о положении выключателей в сети и, по заранее рассчитанным токам ОЗЗ, устанавливала ток компенсации. В усовершенствованной системе используются эксплуатируемые в настоящий момент принципы определения тока. Как заявляет производитель система может работать по двум принципам:

1. Введение искусственной поперечной асимметрии.
2. Подключение между нейтралью и землей источника напряжения промышленной частоты.

Также присутствуют незначительные изменения в конструкции самой катушки, в основном обусловленные изменениями принципов определения тока компенсации.

### **Катушка с подмагничиванием типа WF-PXB**

Объектом исследования является катушка типа WF-PXB-11/500 производства Baoding Weifan Electric and Technology Co., установленная в сети 10 кВ подстанции городских распределительных сетей. Подробно механизм ее работы изложен в [102]. Согласно проведенным экспериментам, величина тока 50 Гц однофазного замыкания на землю для данной сети с изолированной нейтралью составляет 79,693 А.

На рисунке 1.13 представлена осциллограмма натурального эксперимента однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью и автоматической настройкой тока компенсации. На осциллограмме показан остаточный ток однофазного замыкания на землю (черный цвет) и ток ком-

пенсации катушки (оранжевый цвет). Величина тока компенсации составляет 17,45 А, т.е. остаточный ток в месте замыкания 62,25 А (точность 78,1%). Гармонический состав составляющих токов представлен в таблице 1.10 (представлены гармоники свыше 0,1 А). Величина раскомпенсации определяется неточностью настройки дугогасящего реактора, токами активных утечек и гармоническими искажениями.

Как видно из таблицы, ток компенсации катушки типа WF-PXB насыщен высшими гармониками. Следует отметить, в данном случае источником роста гармонических искажений является сама катушка. Время выхода на режим составляет 800 мс, в том числе апериодическая составляющая.

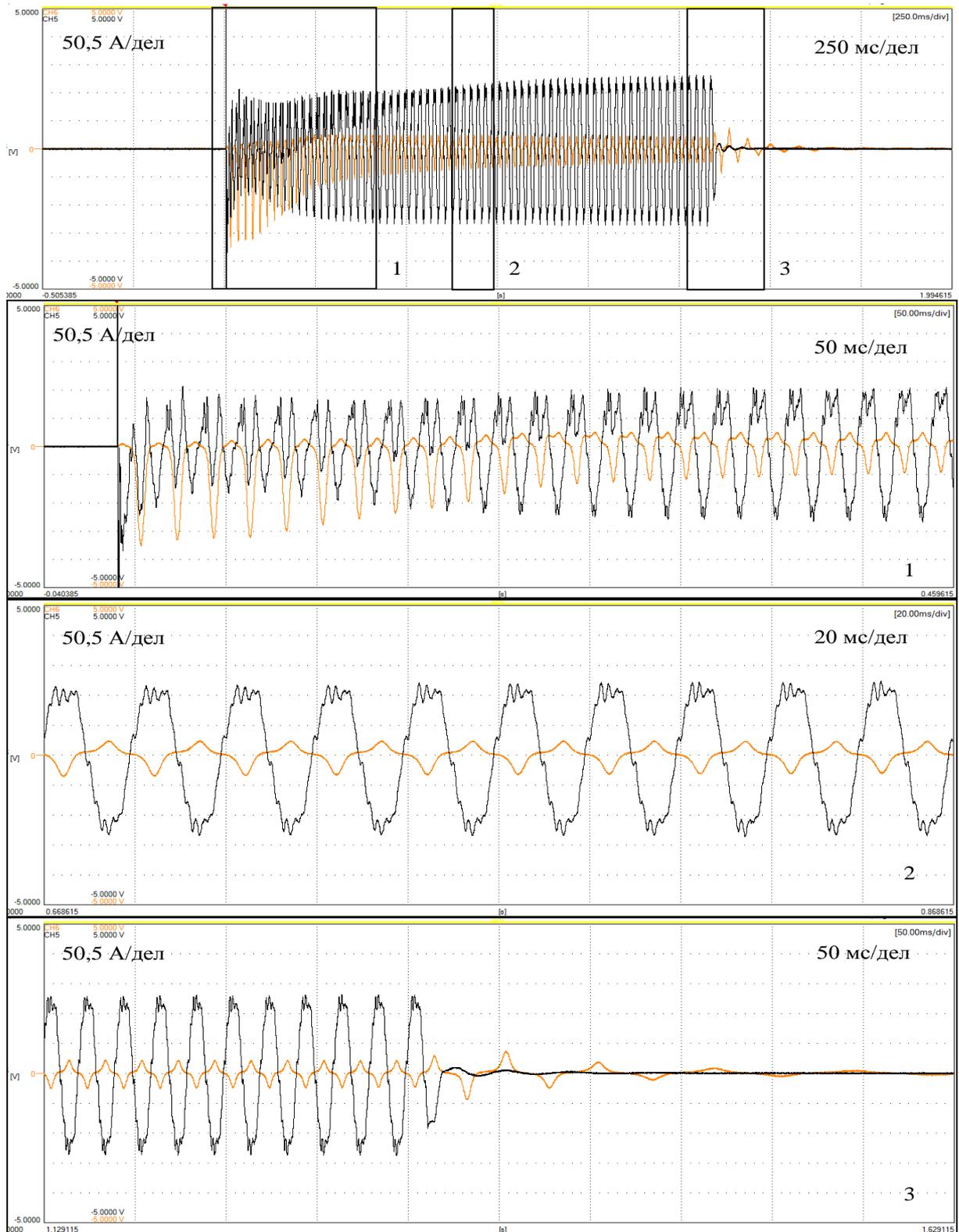


Рисунок 1.13 - Осциллограммы остаточного тока замыкания на землю и тока ДГР при ОЗЗ в сети 6 кВ. Масштабы по осям ординат:

по оси остаточного тока ОЗЗ – 12,35 кВ/дел, по оси тока ДГР – 33,33 А/дел

1 – осциллограмма процесса возникновения замыкания на землю, 2 – осциллограмма установившегося процесса замыкания на землю, 3 – процесс ликвидации замыкания на землю

Таблица 1.10 - Действующие значения величин гармоник тока ОЗЗ и тока ДГР для сети 10 кВ, полученные в экспериментах «металлических» замыканий на землю

№гарм	$I_{OЗЗ}, A$	$I_{OЗЗост}, A$	$I_{ДГР}, A$
1	79,693	62,248	17,445
2	2,775	2,586	1,367
3	1,897	12,644	8,921
4	2,378	0,463	0,384
5	2,036	5,399	1,713
6	0,799	0,431	0,088
7	5,613	3,178	0,447
8	2,354	0,539	0,037
9	1,235	0,792	0,112
10	1,597	0,605	0,031
11	1,468	2,995	0,060
12	0,719	0,559	0,012
13	2,088	4,846	0,037
14	0,468	0,204	0,015
15	0,169	0,501	0,030
16	0,331	0,216	0,011
17	0,416	0,755	0,012
18	0,355	0,163	0,010
19	0,365	0,394	0,013
20	0,296	0,141	0,009
21	0,229	0,263	0,010
22	0,208	0,117	0,013
23	0,442	0,201	0,009
24	0,167	0,089	0,011
25	0,410	0,418	0,010
26	0,139	0,063	0,009
27	0,178	0,205	0,011
28	0,089	0,067	0,012
29	0,153	0,199	0,009
30	0,125	0,060	0,012
31	0,140	0,230	0,013
35	0,067	0,138	0,011
37	0,181	0,304	0,011
$I_{действ.2-40}$	8,452	15,556	9,207

В результате проведенных исследований выявлен ряд недостатков работы систем компенсации тока однофазного замыкания на землю: появление апериодической составляющей в токе ДГР, медленный выход на установившийся режим тока компенсации, невысокая точность настройки ДГР и появление в остаточном токе высших гармоник, источником которых является сам ДГР.

Обобщенные результаты исследований катушек различного типа удобно представить в виде таблицы 1.11:

Таблица 1.11 - Результаты натуральных исследований систем компенсаций разного типа

Тип ДГР	РДМР	РУОМ	УДГР	WF-PXB
Точность, %	9,7	59,47	49,3	37,1
Гармоники тока ДГР, А	0,153	2,067	8,754	9,207
Время выхода на режим, мс	80	700	300	800
Наличие апериодической составляющей	да	да	да	да

### **1.3.6 Устройств предотвращения дуговых перенапряжений с полной компенсации тока однофазного замыкания на землю**

В отечественной практике поднимался вопрос создания системы полной компенсации тока ОЗЗ. Первая в отечественной практике система полной компенсации тока ОЗЗ типа УАРК.2 разработана для сети 6 кВ, рассчитанная на емкостные токи до 100 А, испытана и внедрена на подстанции «Смолянка-220» в 1985 году в Донецке. Межведомственная комиссия рекомендовала оставить в эксплуатации опытные образцы производства Прокопьевского завода шахтной автоматики (Кузбасс). Первая аналогичная шведская система-РСС была испытана в 1992 году в сети 10 кВ на острове Готланд (п/ст. 10 кВ Roma) [54,55]. В обеих разработках использовался инвертор на 60-63 кВА для управления компенсацией активных и остаточных токов соответственно. Высокоомность достигалась тем, что инвертор в УАРК.2 включался последовательно с ДГР плунжерного типа. Высокоомность в системе-РСС достигалась за счет параллельного подключения к низковольтной обмотке ДГР источника тока, управляемого сигналами с датчиков тока присоединений.

Однако существующий опыт эксплуатации таких устройств показывает крайне низкий показатель качества. Так в 1994 году в сети 6 кВ Свердловской ТЭЦ была установлена система УАРК.2. Эксплуатация данного комплекса в течение 3 лет выявила следующие недостатки:

- сложность микропроцессорной системы автоматического подавления дуговых замыканий и необходимость авторского надзора за ее работой;
- сложность эксплуатации данных устройств для оперативного персонала, заключающейся в сборе статистической информации о режимах сети и работе УАРК;
- ложная работа ЗЗМ-3 при возникновении ОЗЗ.

Впоследствии УАРК.2 был выведен из работы.

В последнее время на западе возобновляется интерес к проекту «Шведская нейтраль» [42, 56, 57]. Целью проекта было создание устройства полной компенсации тока замыкания на землю: емкостной и активной составляющей 50 Гц, а также 3,5,7 гармоники. Для компенсации более высокочастотных составляющих требуется установка дополнительных блоков. Подробной информации об эффективности использования данной системы в открытой печати нет.

#### 1.4 Выводы по первой главе:

1. В настоящее время техническое оснащение электрических сетей промышленного назначения существенно усложнилось. Появились новые энергоустановки, имеющие в своем составе активные нелинейные элементы. Рост нелинейных нагрузок обусловил рост гармонических искажений питающего напряжения.
2. Одной из причин появления гармонических искажений в напряжении нормального режима является возникновение переходных процессов на полупроводниковых ключах частотных преобразователей.
3. Значительное влияние на частоту и амплитуду гармонических искажений оказывает силовая и логическая схема частотного преобразователя.
4. Появление в напряжении нормального режима гармонических искажений приводит к утяжелению процессов при возникновении однофазного замыкания на землю, за счет появления гармонических искажений в токе ОЗЗ.
5. Подавляющее большинство эксплуатируемых систем компенсации тока ОЗЗ не компенсируют ток гармонических искажений в токе ОЗЗ. Некоторые типы дугогасящих реакторов являются источниками высших гармоник. В связи с чем невозможно предотвращение дуговых перенапряжений.
6. Резонансная настройка системы компенсации тока ОЗЗ приводит к появлению существенного напряжения смещения нейтрали. Необходима разработка мер по снижению напряжения смещения нейтрали в нормальном режиме до допустимого уровня.
7. Существующие системы компенсации тока гармонических искажений не удовлетворяют требованиям полной и точной компенсации тока гармонических искажений ОЗЗ. В следствии чего, не позволяют надежно подавлять дуговые перенапряжения.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ СРЕДНЕГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ

### 2.1 Общие положения

#### 2.1.1 Объект исследований

С 2009 года исследовано 62 объекта энергохозяйства среднего класса напряжения. Исследуемые сети относятся к сетям промышленных предприятий, а также крупным городским сетевым подстанциям. Исследуемые сети можно разделить по отраслям производства и классам напряжения (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Объекты рассматриваемых сетей 6-35 кВ, различных отраслей

Класс напряжения/ Тип предприятия	6 кВ	10 кВ	35 кВ
Городские распределительные сети	8	23	4
Нефтехимическое производство	0	4	0
Горнодобывающие предприятия	1	1	0
Металлургические предприятия	4	1	0
Газодобывающие площадки	2	1	2
Прочие отрасли	0	1	1
Генерация	4	4	1

К объектам городских распределительных сетей относятся, как сети крупных распределительных подстанций имеющих трансформаторную связь с сетями 110 кВ, так и подстанции класса напряжения 110/10 кВ. Исследуе-

мые сети нефтехимических, горно-обогатительных и металлургических – сети цехов производств. Для предприятий генерации измерения производились в сети собственных нужд.

География проведенных измерений обширна, в рамках исследования проводились измерения по территории всей России: Москва, Вологда, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Чита, Новосибирск, Иркутск, Салехард, Краснодар, Старый Оскол и многие другие. Также выполнены измерения в сетях Беларуси, Монголии и Казахстана.

В процессе исследования проводились натурные измерения тока однофазного замыкания на землю путем прямого замыкания фазы на землю. При этом производилось осциллографирование фазных напряжений, тока однофазного замыкания на землю, а для сетей с компенсированным и комбинированным заземлением нейтрали – тока ДГР.

Таким образом, получены гармонические составы токов однофазного замыкания на землю для основных электрических отраслей.

### **2.1.2 Методика проведения опыта однофазного замыкания на землю**

Измерение ёмкостного тока ОЗЗ сети проводилось методом искусственного замыкания фазы сети на землю, изложенным в РД 34.20.179. Данный метод является прямым и позволяет измерить значение ёмкостного тока однофазного замыкания на землю для текущей конфигурации сети с учетом гармонических искажений. При измерениях данным методом создается искусственное «металлическое» однофазное замыкание на землю. Для сетей с компенсированным режимом заземлением нейтрали выполнялось осциллографирование как тока ОЗЗ, так и тока ДГР.

По результатам обработки осциллограмм определялась величина тока ОЗЗ и тока ДГР (гармонический состав установившегося тока ОЗЗ и тока ДГР; количественные величины гармонических составляющих, включая основную – 50 Гц).

На отходящем присоединении, предназначенном для создания искусственного замыкания на землю, в цепь однофазной закоротки на землю для измерения тока ОЗЗ устанавливался трансформатор тока необходимого номинала, с классом точности 0,2. К выводам вторичной обмотки трансформатора тока, зашунтированной нагрузочным сопротивлением, через измерительный кабель подключался цифровой запоминающий осциллограф для регистрации тока ОЗЗ.

Регистрация фазных напряжений производилась с помощью высоковольтных делителей напряжения (Рисунок 2.1) производства компании ООО «Болид». ДН подключались к шинам за отдельным выключателем, как будет показано ниже. ДН подсоединялись высоковольтными проводами. Делители напряжения откалиброваны в Новосибирском Центре стандартизации и метрологии.



а)



б)

Рисунок 2.1 - Внешний вид ДН 6-10 кВ (а) и 35 кВ (б)

#### *Основные технические характеристики ДН 6-10 кВ:*

- Номинальное рабочее напряжение – 10 кВ;
- Интервал рабочих температур –  $25 \div +40$  °С при относительной влажности  $\leq 90$  %;

- Номинальный диапазон рабочих частот –  $0,02 \div 500$  кГц;
- Коэффициент деления по напряжению в номинальном диапазоне рабочих частот  $K_{дн}=4200$ ;
- Ёмкость верхнего плеча делителя относительно заземляющего контакта – 120 пФ;
- $tg\delta$  (тангенс угла диэлектрических потерь)  $\leq 0.002$ ;
- Класс точности – 1,5;

*Основные технические характеристики ДН 35 кВ:*

- Номинальное рабочее напряжение – 35 кВ;
- Интервал рабочих температур –  $25 \div +40$  °С при относительной влажности  $\leq 90$  %;
- Номинальный диапазон рабочих частот –  $0,02 \div 500$  кГц;
- Коэффициент деления по напряжению в номинальном диапазоне рабочих частот  $K_{дн}=10000$ ;
- Ёмкость верхнего плеча делителя относительно заземляющего контакта – 60 пФ;
- $tg\delta$  (тангенс угла диэлектрических потерь)  $\leq 0.002$ ;
- Класс точности – 1,5;

Для записи переходных процессов использовался осциллограф-регистратор DL-750 Scope Corder («Yokogawa Electric Corporation», Япония)

Цифровой запоминающий осциллограф DL750 корпорации YOKOGAWA ELECTRIC – многоканальная компьютеризированная система сбора, обработки и хранения данных, 8 аналоговых каналов, максимальная частота выборки 10 МВЫБ/с, память 25 миллионов точек на канал, вертикальное разрешение 12 бит.

Схемы подключения измерительной аппаратуры для регистрации тока ОЗЗ, остаточного тока ОЗЗ, тока ДГР и фазных напряжений при «металлическом» замыкании на землю приведены на рисунках 2.2–2.3.

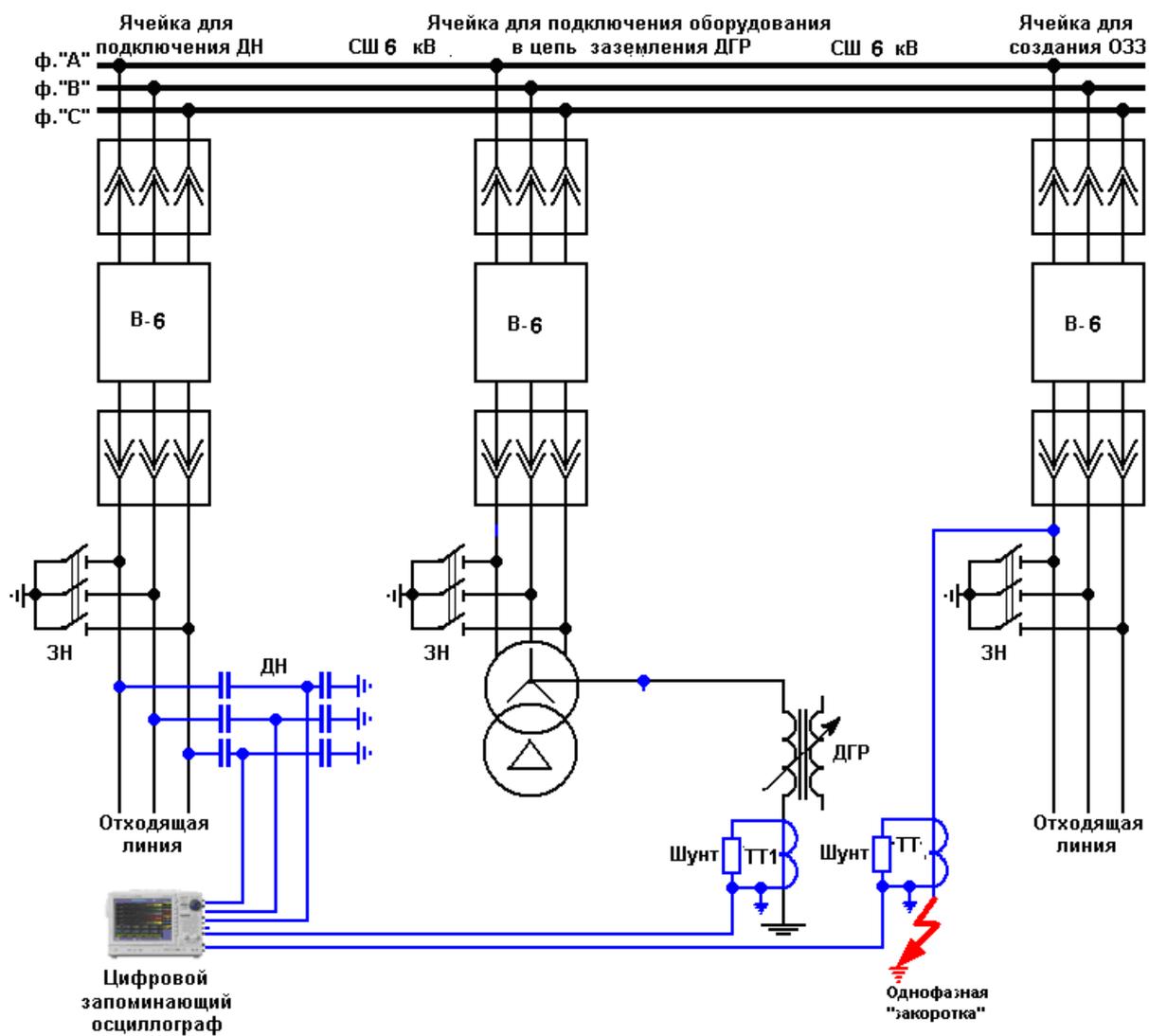


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при измерении ёмкостного тока ОЗЗ в сети с комбинированным заземлением нейтрали

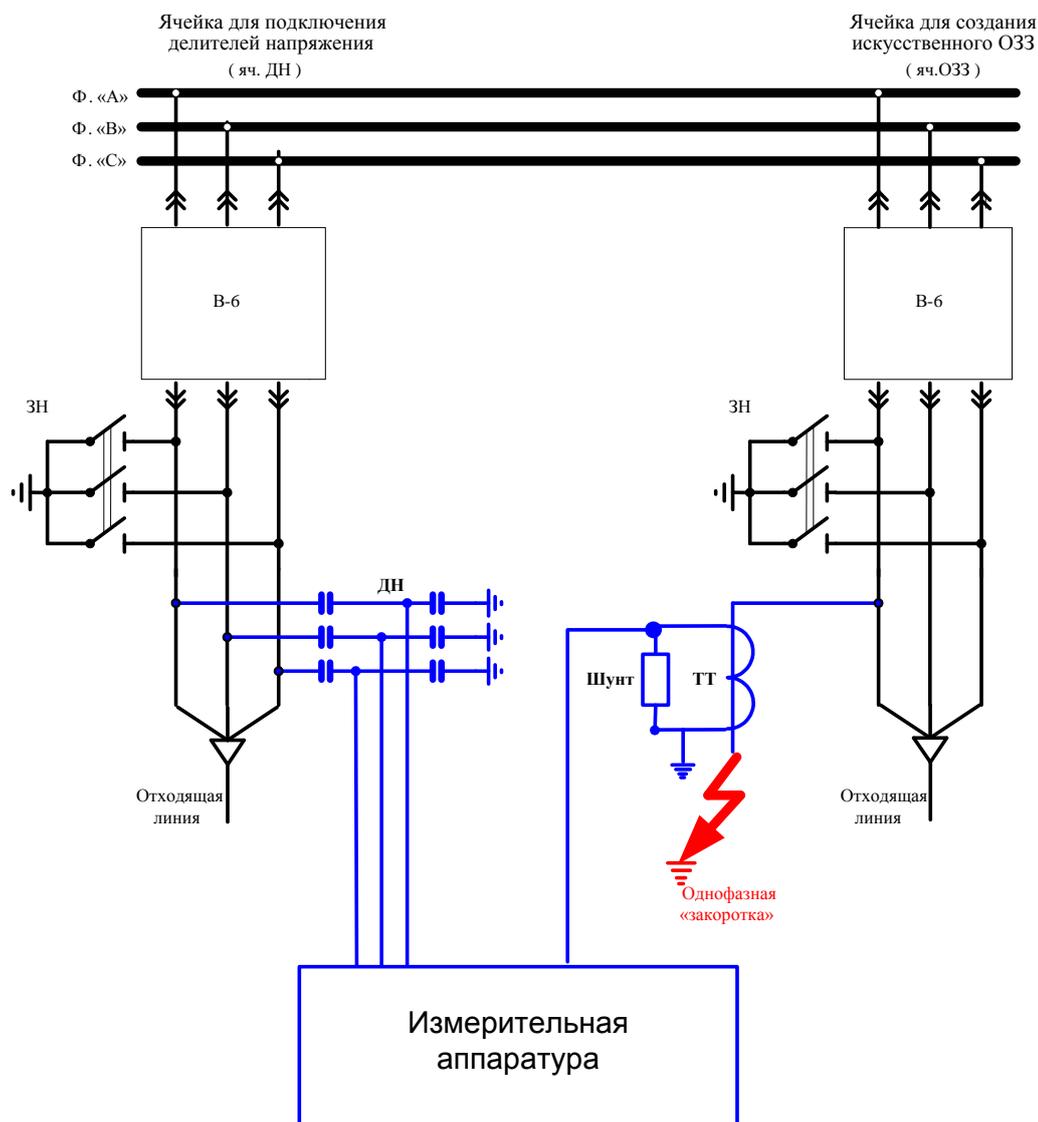


Рисунок 2.3 - Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при измерении ёмкостного тока ОЗЗ в сети в сети с изолированной нейтралью

### 2.1.3 Методика компьютерного моделирования процессов однофазного замыкания на землю

Для аналитического расчета процессов в сетях с нелинейными нагрузками есть два основных подхода. Возможно составить систему нелинейных дифференциальных уравнений, которая описывала бы электромагнитные переходные процессы. Существует множество методов численного решения систем таких уравнений: Тейлора, Эйлера, Рунге и т.д. Также возможно заместить сами источники гармоник источниками тока и напряжения. Этот метод позволяет

рассчитывать спектральный состав токов и напряжений последовательным и независимым расчетом их действующих значений [59]. В [60] сформулированы основные требования к методике аналитического расчета.

В настоящий момент разработано достаточно много математических моделей описывающих электромеханические переходные процессы [61,62]. Однако расчет современных, сложных многоузловых схем аналитическим путем является крайне громоздким и трудоемким. Погрешность расчета в значительной мере определяется постановкой задачи. В процессе сбора данных возможно существенное отклонение параметров электрооборудования. В [63] приводится оценка погрешностей номинальных параметров некоторых видов электрооборудования.

Как показывают статистические расчеты, приведенные в [63], математическое ожидание погрешности находится в диапазоне 0,23-0,52, при этом СКО около 0,1, что говорит о том, что погрешность может значительно превысить 5%. Ряд теоретических задач допускает расчет с существенной долей погрешности. Однако для оценки значений токов и напряжений высших гармоник при возникновении режима резонанса необходимо обеспечить высокую точность расчета. Для этого удобнее использовать электронные вычислительные комплексы.

Компьютерное моделирование энергетических систем на основе эффективных методов численного интегрирования позволяет без больших экономических затрат проводить численные расчеты на ЭВМ [64]. При этом важное значение имеет быстродействие метода численного интегрирования [65,66]. Большинство методов численного интегрирования используют как постоянный, так и переменный шаг. Системы с переменным шагом обеспечивают большую устойчивость решения. Также в современных вычислительных системах используются числа с плавающей точкой двойной точности, что позволяет дополнительно снизить погрешность округления.

В настоящее время имеется широкий спектр программных продуктов отечественных и зарубежных разработчиков, позволяющих производить расче-

ты электромеханических переходных процессов. Исследователи электроэнергетики широко используют программу расчета электромагнитных переходных процессов Electromagnetic Transients Program (EMTP).

EMTP – универсальная система программирования для цифрового моделирования переходных явлений как электромагнитного, так и электромеханического характера. С помощью этой программы могут моделироваться сложные сети и системы управления произвольной структуры. EMTP используется для анализа коммутационных и грозовых перенапряжений, исследования координации изоляции и вращательных колебаний электрических машин, моделирования релейной защиты и гармонического анализа, изучения проблем качества электроэнергии и электромагнитной совместимости и т.д. Программа полностью написана на алгоритмическом языке Фортран.

Как правило, в одном расчетном комплексе реализовано несколько математических моделей, предназначенных для расчета различных видов процессов. Поэтому при проведении расчетов требуется правильный выбор модели, особенно это актуально для проведения расчетов процессов в сети содержащие генераторы и двигатели.

Частотно-регулируемый электропривод является сложной системой и требует комплексного рассмотрения совместно с частотным преобразователем. В [68-73] подробно рассмотрены модели частотно-регулируемых приводов и работы электрических машин. Для вентильного преобразователя идеальные вентили в замкнутом положении имеют нулевое сопротивление. При моделировании необходимо учитывать полную схему преобразования. Особое влияние оказывает правильный учет снабберной цепочки элемента, защищающей тиристор от перенапряжения, учитывающей процессы заряда конденсатора в процессе запирающего тиристора.

Когда величина тока снижается, тиристор закрывается, и обратный ток тиристора достигает необходимого для коммутации значения, в контуре возникает перенапряжение вызванное коммутацией индуктивного элемента. Расчет

элементов снабберной цепочки возможно провести согласно методике, описанной в [73].

Качественная имитация работы электропривода возможна при условии, что для вращающихся машин выбраны адекватные модели [74]. В [75-77] приведены математические модели, предназначенные для расчета различных режимов двигателя. В настоящей работе рассматривается только установившийся режим двигателя.

В [78,79] предложены методики определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Асинхронный двигатель в рассматриваемых процессах возможно представить трансформаторной цепью. Обычно сопротивление ветви намагничивания на порядок больше сопротивления статора и ротора, поэтому в схеме замещения его можно не учитывать.

Полное сопротивление асинхронного двигателя можно представить:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \text{ где}$$

$R$ ,  $X$ ,  $Z$  – соответственно активное, индуктивное и полное сопротивление двигателя.

Согласно [80] сопротивление асинхронного двигателя можно принимать чисто реактивным. Значение этого сопротивления с погрешностью в 7% можно определить по каталожным данным как:

$$X = \frac{U_{\text{фном}}}{I_{\text{фном}}}, \text{ где}$$

$U_{\text{фном}}$  – номинальное фазное напряжение двигателя, кВ;

$I_{\text{фном}}$  – номинальный фазный ток двигателя, кВ;

Одним из основных элементов схемы питания является трансформатора. В электроэнергетических системах применяются двух- и трех- обмоточные трансформаторы и специальные трансформаторы (разделительные, трансформаторы с расщепленной низкой обмоткой).

Все параметры трансформатора, как правило, приводятся к высшему напряжению [81]. В каталоге трансформатора указываются:  $S_{\text{ном}}$  — номинальная мощность трансформатора, кВА;  $U_{\text{в.н.}}$ ,  $U_{\text{н.н.}}$  — номинальные напряжения обмо-

ток, кВ;  $U_{к\%}$  — напряжение короткого замыкания в процентах от номинального высшего напряжения;  $\Delta P_{к.з}$  — потери короткого замыкания, кВт;  $I_{х.х\%}$  — ток холостого хода в процентах от номинального тока обмотки высшего напряжения;  $\Delta P_{х.х}$  — потери холостого хода, кВт.

Активное и индуктивное сопротивления трансформатора обусловлены соответственно нагревом обмоток и наличием поля рассеяния.

Потери активной мощности (трехфазные) можно выразить через каталожные параметры трансформатора, Ом:

$$R_T = \frac{\Delta P_{к.з} \cdot U_H^2}{S_{НОМ}^2}, \text{ где}$$

где  $U_H$  — номинальное линейное (обычно высшее) напряжение обмотки, к которой приводится сопротивление;  $S_{НОМ}$  — номинальная трехфазная мощность трансформатора.

У современных крупных трансформаторов ( $S_{НОМ} > 1$  МВА) активное сопротивление существенно меньше реактивного.

Реактивное сопротивление по каталожным данным, Ом:

$$X_T = \frac{U_{к\%} \cdot U_H^2}{100 \cdot S_{НОМ}}, \text{ где}$$

$U_{к\%}$  — напряжение короткого замыкания (в %),  $U_H$  — номинальное напряжение обмотки;  $S_{НОМ}$  — номинальная мощность обмотки трансформатора;

Активная и индуктивная проводимости трансформатора обусловлены соответственно нагревом стали за счет вихревых токов и потерями на намагничивание.

Потери активной мощности можно выразить через активную проводимость:

$$\Delta P_{х.х.} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot \frac{1}{G_T} = U_{в.н.}^2 \cdot G_T$$

отсюда, См:

$$G_T = \frac{\Delta P_{х.х.}}{U_{в.н.}^2}$$

Все параметры входят в каталожные.

Выражение  $B_T$  через каталожные данные тогда, См:

$$B_T = \frac{i_{\text{кк}}\% S_{\text{ном}}}{100 \cdot U_{\text{в.н.}}^2}$$

Для улучшения качества электроэнергии в современных схемах используются 12-, 24-пульсные схемы работы ЧП; для реализации таких схем используются трансформаторы с расщепленными обмотками. Схемы замещения и расчет параметров аналогичен приведенному.

Сопротивление нагрузки возможно представить эквивалентным суммарным комплексным сопротивлением. Для оценки  $\cos(\varphi)$  нагрузки в [82] приведена статистическая информация для различных типов производств.

Сопротивление токоограничивающего реактора можно определить исходя из его паспортных характеристик:

$$X_p = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Q_{\text{ном}}}, \text{ где}$$

$U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение реактора, кВ;  $Q_{\text{ном}}$  - номинальная мощность реактора, кВар.

Тогда активное сопротивление реактора:

$$R_p = \frac{X_p}{Q}, \text{ где}$$

$X_p$  – реактивное сопротивление реактора, Ом;  $Q$  – добротность реактора.

На практике, на качество расчета оказывает значительное влияние правильная оценка и учет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) линий электропередач. Они должны определяться с учетом не только поверхностного эффекта, но и эффекта близости, распределенности параметров и других факторов. Данная задача является весьма сложной и в ряде случаев неоднозначной. В литературе нет однозначных рекомендаций по оценке [82].

В [83-87] даны рекомендации российских и канадских ученых для учета АЧХ.

## **2.2 Статистическая обработка результатов**

### **2.2.1 Статистическая оценка уровней гармонических искажений тока ОЗЗ в сетях 6-35 кВ различного назначения**

Для каждого класса напряжения характерны отличительные особенности проблем появления гармонических искажений.

Сети 6-10 кВ, как правило, состоят из кабельных линий, имеют значительную параллельную протяженность сети, при этом небольшую длину отдельных присоединений. Нелинейные нагрузки подключаются напрямую, без трансформаторной связи.

Сети 35 кВ выполняются кабельно-воздушными линиями, с преимуществом воздушных. Имеют большую протяженность отдельных присоединений, по сравнению с сетями 6-10 кВ и небольшую разветвленность. Кроме объектов металлургии источники гармонических искажений в таких сетях располагаются за трансформаторной связью.

При анализе уровней гармонических искажений в токе ОЗЗ следует обратить внимание на отраслевую принадлежность объектов энергохозяйства. Отличительной чертой нагрузок промышленных предприятий перерабатывающих и добывающих отраслей является большое количество мощных электроприводов, требующих частотного регулирования.

В последние годы отмечается значительное увеличение нелинейной нагрузки в распределительной городской сети: персональные компьютеры, серверы, принтеры, блоки бесперебойного питания, а также системы освещения на основе люминесцентных ламп или светодиодных светильников; нагрузка располагается за одной-двумя трансформаторными связями, однако может существенно ухудшать качество электроэнергии.

Для систематизации уровней гармонических искажений в токе ОЗЗ на различных объектах введем следующие оценочные критерии:

1. Значение тока ОЗЗ превышает установленные ПУЭ нормы – ВГ превышают рекомендованный согласно таблице В.1 уровень в токе ОЗЗ.

При таком уровне гармонических искажений полностью теряется эффект компенсации. В сети возможно возникновение резонансных перенапряжений.

2. Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ – ВГ имеют величину 8-15 А для сети 6-10 кВ, 5А для сети 35 кВ. Как отмечено в пункте 1.2.2 при данных уровнях гармонических искажений дуговое замыкание существует.
3. Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ – уровень ВГ в токе ОЗЗ для сети 6-10 кВ от 4,5 до 8 ампер, и от 2 до 4 ампер для сети 35 кВ.
4. Отсутствие значимого гармонического фона в токе ОЗЗ.

В ходе обобщения результатов по всем типам объектов получены таблицы 2.2-2.5; результаты показаны на гистограммах 2.4-2.12.

Таблица 2.2 - Результаты исследований возникновения гармонических искажений в сети 6-35 кВ по всем типам объектов

По классам напряжения, кВ	6	10	35
Всего объектов	19	35	8
Значение тока ОЗЗ превышает установленные ПУЭ нормы	0	3	1
Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ	4	8	2
Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ	5	9	0
Отсутствие проблем	10	15	5



Рисунок 2.4 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ всех исследованных объектов сети 6 кВ



Рисунок 2.5 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ всех исследованных объектов сети 10 кВ



Рисунок 2.6 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ всех исследованных объектов сети 35 кВ

Как видно из приведенной статистики по всем исследованным объектам вопрос гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю актуален. 4 объекта (6,5%) содержат в своих спектрах величины гармонических искажений, превышающие нормы ПУЭ, что делает невозможным выполнение условия компенсации обычными системами компенсации. Рассматривая все исследованные объекты нужно подчеркнуть, что 32 объекта (51,6%) содержат токи высших гармоник, в величине достаточной для неустойчивого горения дуги.

Среди объектов класса 6-10 кВ 54% содержат гармоники в величине превышающей 4,5 А, в то время как в сети 35 кВ величина аналогичных критериев содержится у 37,5 %.

Таблица 2.3 - Результаты исследований возникновения гармонических искажений в сети промышленных предприятий

По классам напряжения, кВ	6	10	35
Всего объектов	11	12	4
Значение тока ОЗЗ превышает установленные ПУЭ нормы	0	3	1
Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ	3	2	2
Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ	2	3	0
Отсутствие проблем	6	4	1



Рисунок 2.7 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов промышленного назначения сети 6 кВ



Рисунок 2.8 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов промышленного назначения сети 10 кВ



Рисунок 2.9 - Анализ гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов промышленного назначения сети 35 кВ

В связи со спецификой топологии промышленной сети, а также большого сосредоточения нелинейной двигательной нагрузки, 25% сетей класса 10 и 35 кВ промышленных предприятий имеют в своем спектре величины гармоник превышающие нормы установленные [1]. При этом всего меньше половины (48%) объектов не имеют проблем с высшими гармониками в токе ОЗЗ.

Таблица 2.4 - Результаты исследований возникновения гармонических искажений в сети промышленного назначения напряжения 6-35 кВ

По классам напряжения, кВ	6	10	35
Всего объектов	8	23	4
Значение тока ОЗЗ превышает установленные ПУЭ нормы	0	0	0
Существенное содержание гармоник в токе ОЗЗ	1	6	0
Значительное содержание гармоник в токе ОЗЗ	3	6	0
Отсутствие проблем	4	11	4



Рисунок 2.10 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов городского назначения сети 6 кВ



Рисунок 2.11 - Анализ содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов городского назначения сети 10 кВ

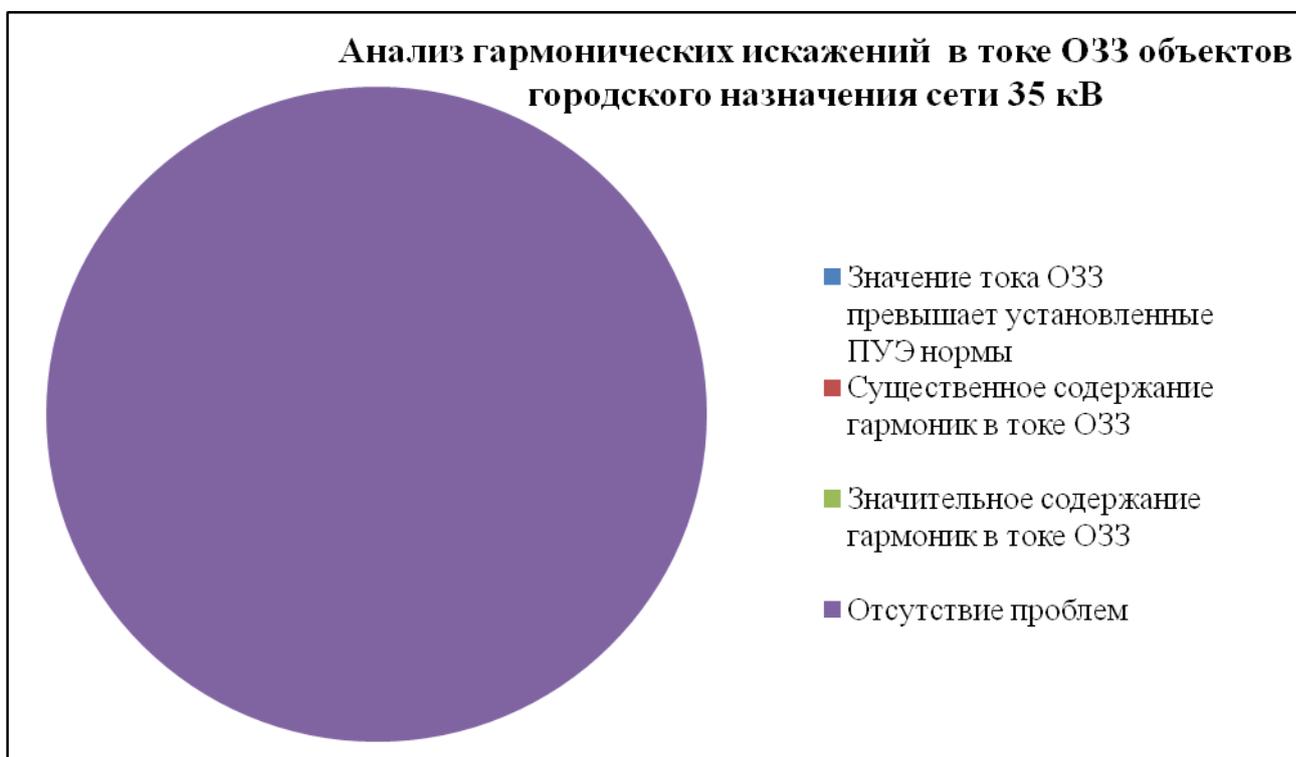


Рисунок 2.12 - Анализ гармонических искажений в токе ОЗЗ объектов городского назначения сети 35 кВ

Для сетей городского назначения, также характерно значительное содержание высших гармоник в токе ОЗЗ, 45% исследованных объектов сетей 6-10 кВ городской инфраструктуры содержат токи высших гармоник усугубляющих процессы при ОДЗ.

Следует отметить, что наличие трансформаторной связи с сетью 35 кВ существенно ослабляет влияние нелинейных нагрузок, потому в распределительной сети 35 кВ городского назначения существенных гармоник в токе ОЗЗ не наблюдается.

### **2.2.2 Сравнительная характеристика гармонического состава тока ОЗЗ разных лет**

Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ обязывает промышленные предприятия вводить меры повышения энергоэффективности. К данным мерам можно также отнести внедрение частотно-регулируемой техники. В [88, 89] подробно рассматривается вопрос эффективности внедрения. Для оценки роста уровня гармонических искажений в токе ОЗЗ проведены сравнения гармонических составов для различных лет для одних и тех же предприятий.

Первый объект анализа – сеть 6 кВ тепловой энергетической станции. Замеры в сети проводились с интервалом в один год в 2011 и 2012 годах. Полученные результаты показывают рост уровня гармонических искажений в три раза. Выяснить подробно причины ухудшения гармонического состава не удалось.

Второй объект анализа – сеть 6 кВ нефтеперерабатывающего завода. Замеры проводились с интервалом в два года в 2012 и 2014 годах. Полученные результаты показывают незначительный рост уровня гармонических искажений около 30%. Причиной этому послужила установка в 2013 году в сети 6 кВ семи частотно-регулируемых электроприводов производства Siemens общей мощностью 350 кВт. Преобразователи основаны на микропроцессорном управлении

ключами на базе IGBT транзисторов с изолированным управляющим электродом. При включении частотных преобразователей не было принято дополнительных мер повышения качества электроэнергии.

Исследования показывают увеличение гармонических искажений. В таблице 2.5 приведено сравнение гармонических составов двух промышленных предприятий различного типа производств. Уровни гармоник приведены относительно уровня тока первой гармоники.

С 2013 по 2014 год зафиксировано три случая повреждения установок компенсации реактивной мощности по причине перегрева конденсаторов. В настоящее время рассматривается возможность применения дополнительных мер повышения качества электроэнергии.

Таблица 2.5 - Сравнение гармонических искажений в токе ОЗЗ для различных лет в процентах относительно основной составляющей 50 Гц

Объект	Сети собственных нужды ТЭЦ		Сети собственные нужды нефтеперерабатывающего завода	
	2011	2012	2012	2014
Год сравне- Номер гар-	$I_{OЗЗ}, \%$	$I_{OЗЗ}, \%$	$I_{OЗЗ}, \%$	$I_{OЗЗ}, \%$
2	0,812	0,589	0,011	0,021
3	30,710	21,037	0,346	0,229
4	0,852	3,008	0,005	0,008
5	4,349	27,337	3,526	4,650
6	0,337	1,463	0,005	0,005
7	39,153	158,557	3,742	12,114
8	12,234	24,146	0,005	0,006
9	4,055	12,967	0,047	0,490
10	1,193	3,293	0,013	0,008
11	16,238	14,776	10,191	0,942
12	0,816	1,037	0,023	0,011
13	6,536	12,378	11,139	6,024
14	0,218	0,467	0,163	0,023
15	0,504	1,829	1,351	1,293
16	0,729	0,630	1,794	0,032
17	0,870	5,020	9,393	13,708
18	0,243	0,935	0,253	0,162
19	2,477	3,110	4,733	3,275
20	1,570	1,382	0,155	0,135
21	0,671	0,874	0,862	11,495
22	0,410	1,484	0,155	0,270
23	1,701	2,175	0,682	6,161
24	0,131	0,508	0,123	0,151
25	0,229	1,992	0,970	6,581
26	0,225	0,285	0,131	0,249
27	0,167	0,610	0,169	1,472
28	0,080	0,346	0,071	0,398
29	0,181	0,894	0,875	21,258
30	0,062	0,203	0,067	0,125
31	0,083	0,508	0,236	1,885
32	0,076	0,346	0,047	0,093
33	0,109	0,671	0,116	0,704
34	0,065	0,183	0,060	0,052
35	0,102	0,732	0,202	0,389
36	0,080	0,183	0,104	0,145
37	0,392	0,610	0,380	7,462
38	0,098	0,122	0,062	0,236
39	0,123	0,142	0,093	0,381
40	0,127	0,122	0,250	0,751
$I_{\text{действ.2-40}}$	54,638	165,931	7,249	10,168

## **2.3 Влияние параметров сети на усиление гармонических искажений в токе ОЗЗ**

### **2.3.1 Экспериментальные исследования усиления гармоник в токе ОЗЗ при изменении конфигурации сети**

В [35] приводится допустимый уровень нелинейной нагрузки подключаемой к трехфазной сети, в пределах допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности напряжения, определенного ГОСТ. Однако, как было показано выше, на величины высших гармоник в токе ОЗЗ имеют значительное влияние параметры контура протекания тока.

Для оценки возможности появления значительных искажений проведен анализ процессов при возникновении однофазного замыкания на землю в сети 35 кВ с изолированной нейтралью при различных конфигурациях схемы электроснабжения. Исследование проводилось в распределительной сети 35 кВ нефтеперерабатывающего завода.

Распределительная сеть 35 кВ получает питание от 8 турбогенераторов номинальной мощностью 25 МВт, напряжением 10,5 кВ. Генераторная сеть построена по блочной схеме. Питание сети 35 кВ осуществляется через повышающие трансформаторы типа ТРДНС-40000-35/10. Трансформатор имеет расщепленную обмотку низкого напряжения. Сеть 35 кВ состоит из четырех секций шин. Каждая секция шин получает питание от двух энергоблоков. Секции объединены между собой через секционные выключатели. Для ограничения тока короткого замыкания сети 35 кВ между секциями шин включены токоограничивающие реакторы типа РТСТГ-35-2500-2,03. Секции шин в нормальном режиме работают совместно.

Распределительная сеть 35 кВ состоит из 28 кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена. Кабельные линии имеют существенное сечение и протяженность; общая протяженность кабельных линий превышает 80 км. При из-

вестных марках, сечениях и длинах линий фидеров [90-92] емкостный ток однофазного замыкания на землю может быть определен расчетным путем.

Расчетная величина тока замыкания на землю в объединенном режиме составляет 378,66А. Проведение натурных опытов при объединении всей сети небезопасно. Для экспериментов были выделены 4 кабельные линии. Для обеспечения бесперебойности работы потребителей, на время проведения замеров питание потребителей переводилось на другие секции. Схема проведения опытов приведена 2.13.

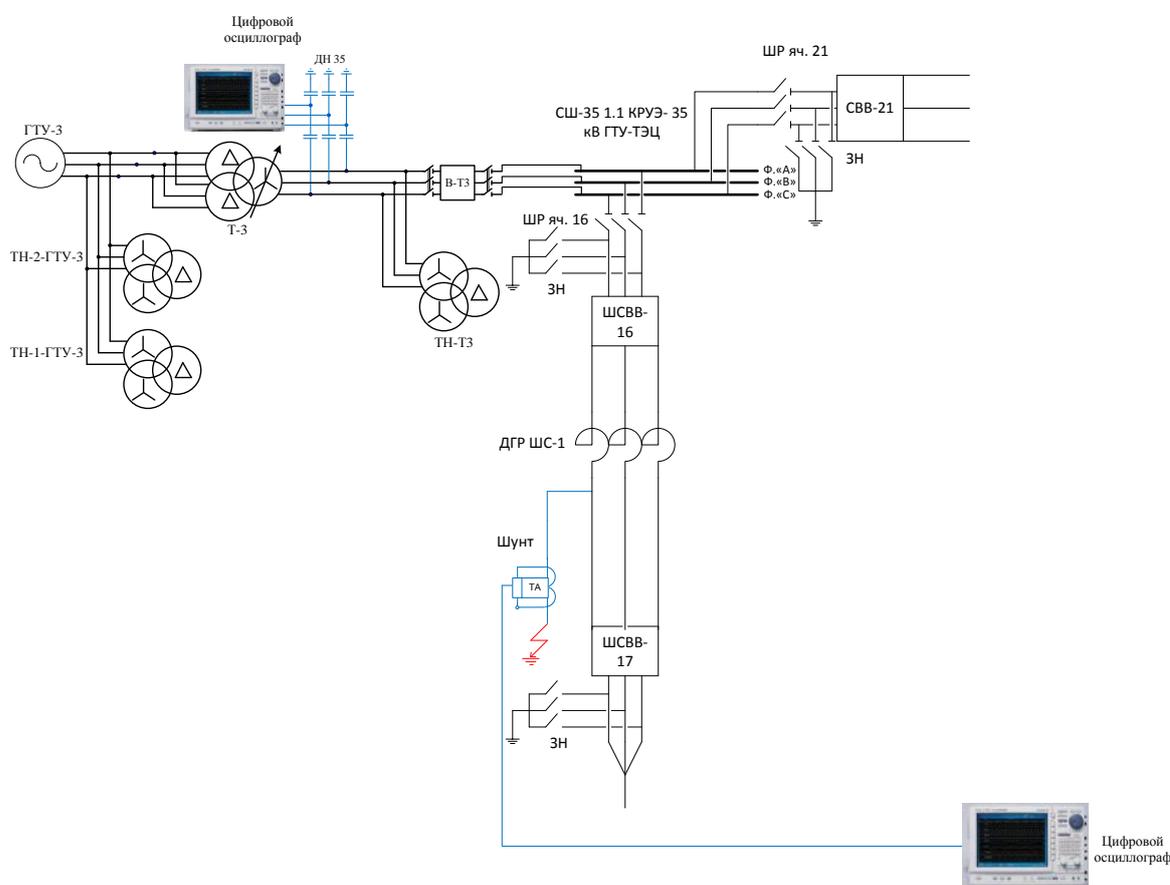
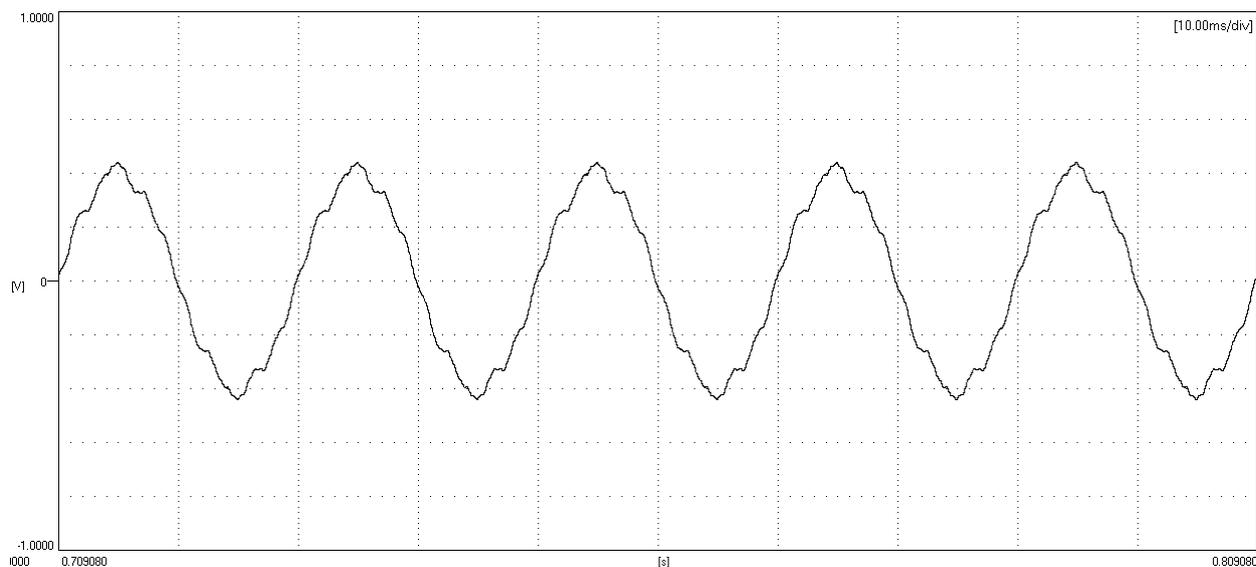


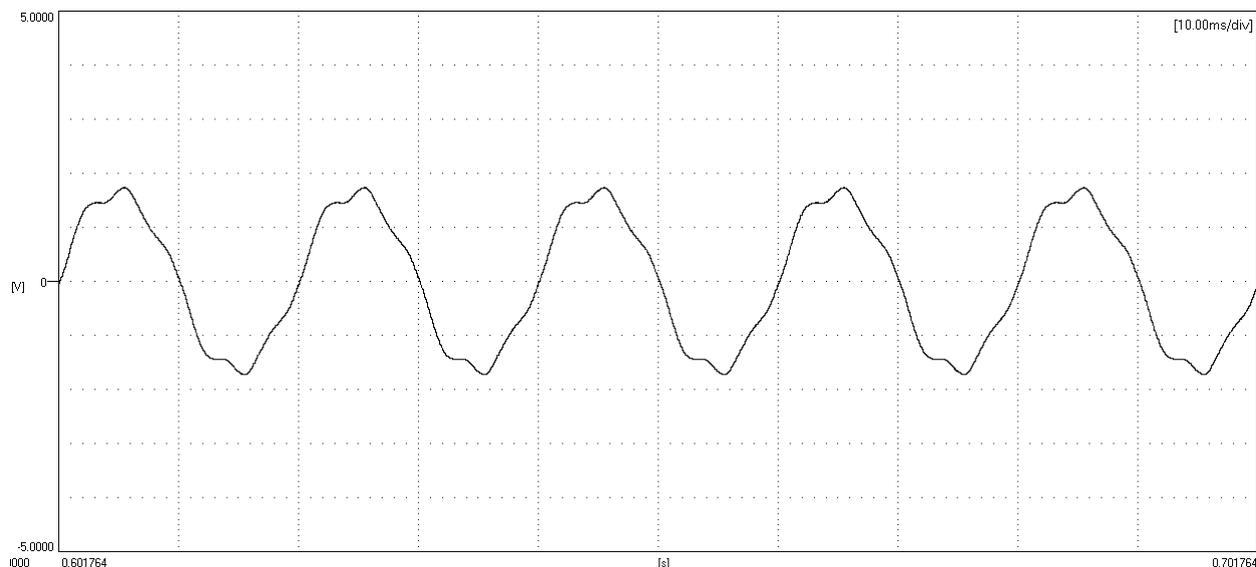
Рисунок 2.13 - Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при измерении ёмкостного тока ОЗЗ в сети 35 кВ КРУЭ-35 ГТУ-ТЭЦ

На рисунке 2.14 представлена осциллограмма тока ОЗЗ: (а) – для сети с 2 кабелями, (б) – для сети с 4 кабелями. Гармонический состав токов ОЗЗ приведен в таблице 2.6. В минимальном режиме величина тока составила 17,83 А. В токе содержится незначительная составляющая тока гармонических искажений, в основном 3 и 11 гармоники. При подключении четырех кабелей величина то-

ка ОЗЗ увеличилась в 4 раза и составила 72,49 А, при этом гармонические искажения увеличились в 5,8 раз.



а



б

Рисунок 2.14 - Натурная оциллограмма тока однофазного замыкания на землю сети 35 кВ, при различных конфигурациях сети; а – 17,83А (включены две линии), б – 72,49А (включены четыре линии)

На рисунке 2.15 проведено сравнение действующих значений гармоник в токе ОЗЗ для двух конфигураций сети. В минимальном режиме присутствуют две частоты, на которых наблюдались значительные искажения: 250 и 550 Гц. При увеличении емкостного тока существенные искажения наблюдаются на частоте 250 Гц, при этом появляется составляющая 150 Гц.

Таблица 2.6 - Действующие значения гармоник тока ОЗЗ в сети ЗРУ-35 кВ ГТУ-ТЭЦ, полученные в эксперименте «металлического» замыкания на землю (в амперах). Опыты №№1 и 2

Номер гармоники	Опыт 1	Опыт 2
<b>1</b>	<b>17,832</b>	<b>72,492</b>
2	0,001	0,016
3	0,104	<b>3,357</b>
4	0,002	0,030
<b>5</b>	<b>0,733</b>	<b>5,722</b>
6	0,003	0,012
<b>7</b>	<b>0,498</b>	<b>1,377</b>
8	0,011	0,011
9	0,057	0,045
10	0,010	0,006
<b>11</b>	<b>0,700</b>	<b>0,310</b>
12	0,007	0,008
13	0,201	0,169
14	0,002	0,006
15	0,028	0,023
16	0,004	0,019
17	0,050	0,235
18	0,002	0,011
19	0,020	0,048
20	0,001	0,006
21	0,003	0,031
22	0,001	0,007
23	0,073	0,039
24	0,001	0,005
25	0,019	0,014
26	0,001	0,005
27	0,001	0,011
28	0,000	0,008
29	0,010	0,023
30	0,001	0,006
31	0,011	0,029
32	0,000	0,007
33	0,002	0,029
34	0,001	0,004
35	0,071	0,034
36	0,001	0,003
37	0,130	0,023
38	0,001	0,005
39	0,010	0,029
40	0,001	0,002
$I_{\text{действ.2-40}}$	<i>1,167</i>	<i>6,790</i>

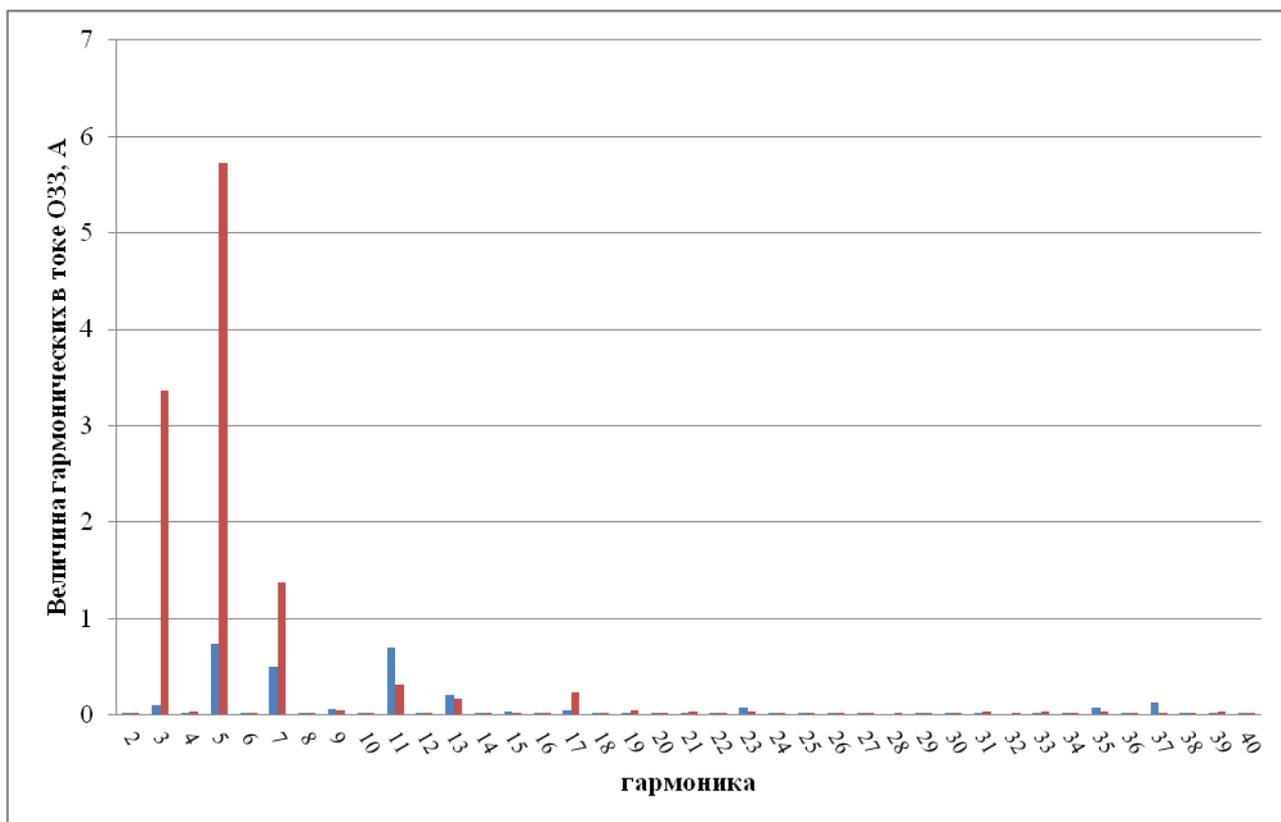


Рисунок 2.15 - Сравнение спектров натуральных осциллограмм токов однофазного замыкания на землю сети 35 кВ, при различных конфигурациях сети; включены две линии – 17,83А (синий цвет), включены четыре линии – 72,49А (красный цвет)

Проведенные замеры показывают значительное изменение величины тока гармонических искажений при изменении конфигурации сети, что говорит о необходимости адаптивной работы разрабатываемой системы.

## 2.4 Экспериментальные исследования процессов в сети промышленных предприятий при возникновении ОЗС

### 2.4.1 Общие положения

Большая часть сетевых предприятий имеют крупные сети с большой насыщенностью различного рода нелинейных нагрузок. Для таких сетей возможно появление гармонических резонансов. В крупных распределительных сетях возможно появление гармонических искажений не только от ЧРП, но и от других видов нелинейных нагрузок и установленного оборудования. В [101] разо-

бран случай возникновения гармонических искажений по причине старения стали силового трансформатора.

Для оценки резонансных процессов при возникновении однофазного замыкания на землю, проведен анализ процессов в сети 10 кВ главной районной электрической станции (ГРЭС).

ГРУ-10 кВ ГРЭС состоит из трех секций рабочих шин и трех секций резервных шин. Секции рабочих шин секционированы между собой через секционный выключатель и токоограничивающий реактор. Связь рабочих и резервной систем шин осуществляется через шиносоединительные выключатели. Каждая секция шин питается от выделенного турбогенератора. Секции шин 10 кВ в нормальном режиме работают совместно.

От шин ГРУ-10 кВ запитаны внешние потребители и через трансформаторы - собственные нужды ГРЭС. Связь ГРУ-10 кВ и РУ 110 кВ осуществляется через силовые трансформаторы каждый мощностью 63 МВт.

Электроснабжение внешних потребителей ГРУ-10 кВ осуществляется через реактированные кабельные линии. Через токоограничивающий реактор запитаны одна либо две кабельных линии.

При известных марках, сечениях и длинах линий фидеров [90-91] емкостный ток однофазного замыкания на землю может быть определен расчетным путем.

Таблица 2.7 - Расчетные значения емкостного тока ОЗЗ секций шин ГРУ ГРЭС

Номер секции	Величина емкостного тока, А
1 СШ	53,16
2 СШ	96,94
3 СШ	71,08
1+2+3 СШ	221,19

Погонные параметры кабелей 10 кВ с бумажно-масляной изоляцией принимались согласно [91] и приведены в таблице 2.7. Емкость между фазами при-

нималась равной  $C_{\text{фф}}=0,27C_{\text{ф}}$ , что соответствует параметрам трехфазных кабелей с поясной изоляцией и секторными жилами по ГОСТ 18410-73\*Е.

Сеть ГРУ-10 кВ эксплуатируется в режиме компенсированной нейтрали. Для ведения режима компенсации тока ОЗЗ составлена "Инструкция по эксплуатации дугогасящих катушек, установленных в сети 10 кВ ГРЭС". Согласно данным инструкции для компенсации емкостного тока в сети ГРУ-10 кВ установлены 6 дугогасящих катушек, которые собраны в группы и обозначены № 1, 2, 3.

Катушки подключены к нейтралям трансформаторов и заземлены через источник контрольного тока и трансформатор тока.

Катушка № 1 (ДГК-1) включена в нейтраль силового трансформатора на ЗСШ. Состоит из 2-ух катушек по 50 А с ручным регулированием емкостного тока. Настроена на ток 100 А.

Катушка № 2 (ДГК-2) включена в нейтраль силового трансформатора на 1СШ. Состоит из 2-ух катушек по 50 А с ручным регулированием емкостного тока. Настроена на ток 100 А.

Катушка № 3 (ДГК-3) включена в нейтраль силового трансформатора на 2СШ. Состоит из 2-ух катушек: катушка  $I_{\text{ном}} = 50$  А и катушка  $I_{\text{ном}} = 100$  А с ручным регулированием емкостного тока. Настроена на ток 150 А.

Наибольший индуктивный ток, создаваемый всеми катушками, составляет 350 А.

Дополнительно параллельно катушке ДГК – 3 установлена дугогасящая катушка с плавным регулированием под нагрузкой (ДГКР). ДГКР позволяет оперативно изменять индуктивный ток, создаваемый всеми катушками в пределах 355 – 375 А в зависимости от состояния сети. ДГКР имеет ручное и автоматическое управление.

Для возможности проведения настройки компенсации тока ОЗЗ с помощью изменения отпаяк ДГР либо регулировки тока плавнорегулируемого ДГР установлен индикатор расстройки компенсации (ИРК). Действие ИРК обеспе-

чивается за счет искусственного наложения на сеть ГРУ контрольного тока частотой 25 Гц, вырабатываемого источниками контрольного тока (ИКТ).

#### **2.4.2 Оценка качества электроэнергии в сети 10 кВ ГРЭС**

Для оценки качества электроэнергии в России действует ГОСТ 30804.4.7—2013. Согласно его нормам устанавливаются величины гармонических искажений напряжения нормального режима при котором необходимо вводить дополнительные меры по снижению уровней искажений. Нормы ГОСТ определялись исходя из требований надежного электроснабжения потребителей в нормальном режиме работы сети.

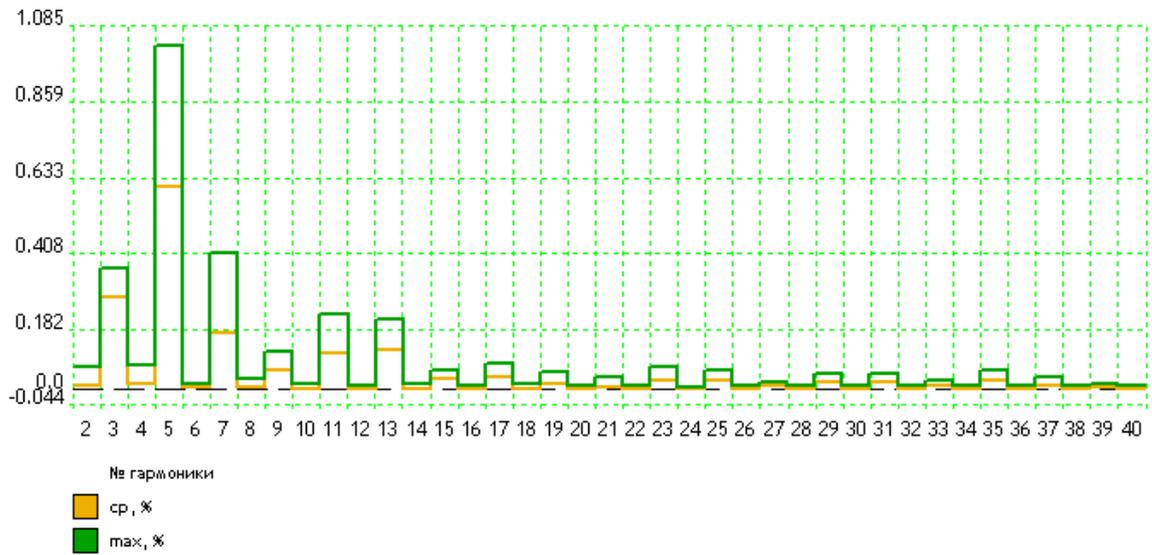
Измерение параметров напряжений и токов в нормальном режиме в сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секция рабочих шин объединены на совместную работу) производилось с помощью измерителя показателей качества электрической энергии ЭРИС-КЭ.02.А/тк.

Измерения проводились во вторичных цепях трансформатора связи ГРЭС согласно ГОСТ 30804.4.7—2013. Суммарный интервал измерений соответствует требованиям ГОСТ.

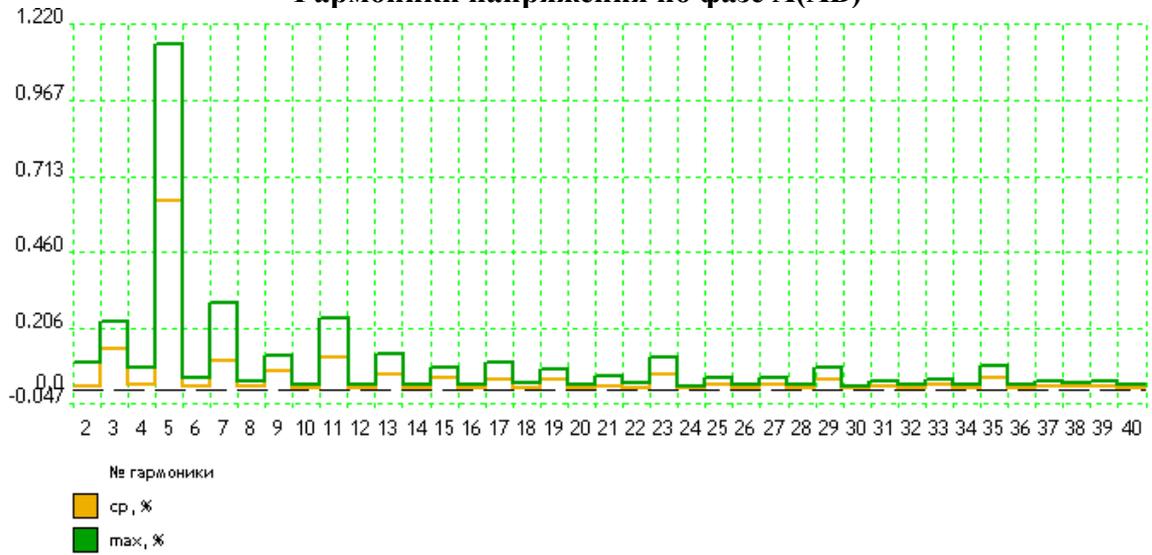
Снятые с помощью прибора ЭРИС-КЭ.02 данные по коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения позволяют проанализировать графики изменения фазных напряжений, отобразив на них наибольшие, средние и наименьшие значения. Результаты измерений по коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения в сети 10 кВ ГРЭС, приведены в таблице 2.8. Гармоники фазных напряжений приведены на рисунке 2.16. Проведено сравнение полученных данных с нормативными значениями, результаты испытаний электрической энергии в сети ГРУ-10 кВ ГРЭС по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения представлены в таблице 2.9

Таблица 2.8 - Результаты исследования гармонического состава напряжения в сети ГРУ-10 кВ ГРЭС по коэффициенту  $n$ -ой гармонической составляющей

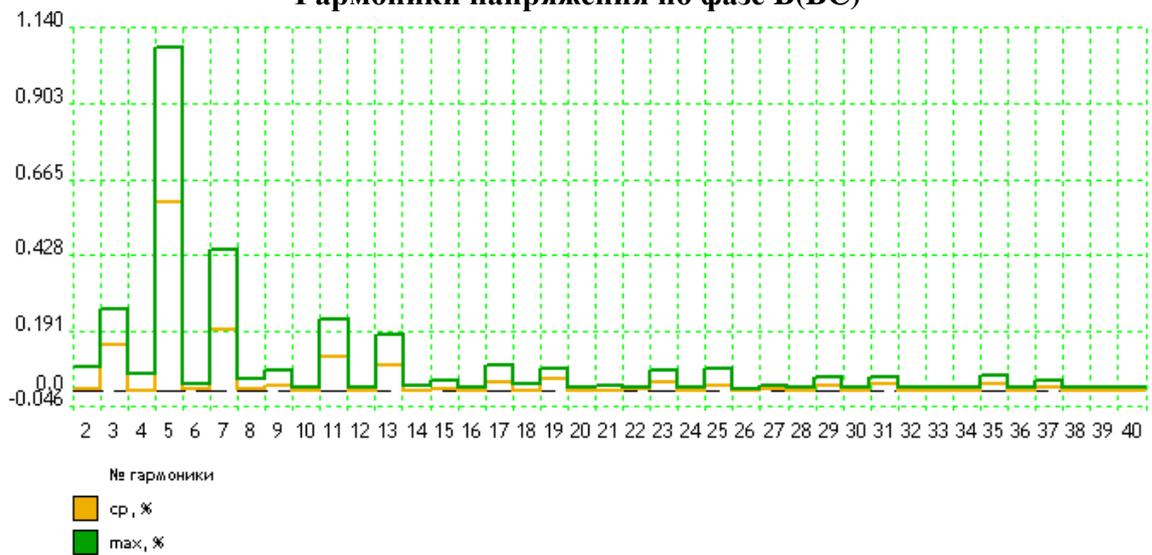
n	Результаты измерений						Нормативные значения	
	Фаза «А»		Фаза «В»		Фаза «С»			
	$K_{U(n)B}$	$K_{U(n)нб}$	$K_{U(n)B}$	$K_{U(n)нб}$	$K_{U(n)B}$	$K_{U(n)нб}$	$K_{U(n)нд}$	$K_{U(n)пд}$
2	0,02	0,08	0,02	0,09	0,02	0,08	1,50	2,25
3	0,28	0,37	0,14	0,23	0,15	0,26	1,50	2,25
4	0,02	0,08	0,02	0,08	0,01	0,06	0,70	1,05
5	0,61	1,03	0,64	1,16	0,60	1,09	4,00	6,00
6	0,01	0,02	0,02	0,05	0,01	0,03	0,30	0,45
7	0,17	0,42	0,10	0,29	0,20	0,45	3,00	4,50
8	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,04	0,30	0,45
9	0,06	0,12	0,07	0,12	0,02	0,07	0,50	0,75
10	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,30	0,45
11	0,11	0,23	0,11	0,25	0,12	0,23	2,00	3,00
12	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
13	0,12	0,22	0,06	0,12	0,09	0,19	2,00	3,00
14	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
15	0,04	0,06	0,04	0,08	0,01	0,04	0,30	0,45
16	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
17	0,04	0,09	0,04	0,10	0,04	0,09	1,50	2,25
18	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,20	0,30
19	0,02	0,06	0,04	0,08	0,04	0,08	1,00	1,50
20	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
21	0,01	0,04	0,02	0,05	0,01	0,02	0,20	0,30
22	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,20	0,30
23	0,03	0,08	0,06	0,12	0,03	0,07	1,00	1,50
24	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
25	0,03	0,07	0,02	0,04	0,02	0,08	1,00	1,50
26	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
27	0,02	0,03	0,02	0,04	0,01	0,02	0,20	0,30
28	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
29	0,03	0,06	0,04	0,08	0,02	0,05	0,86	1,29
30	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
31	0,03	0,05	0,02	0,04	0,03	0,05	0,81	1,21
32	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
33	0,02	0,04	0,02	0,04	0,01	0,02	0,20	0,30
34	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
35	0,03	0,06	0,05	0,08	0,03	0,06	0,71	1,07
36	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30
37	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,04	0,68	1,01
38	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,20	0,30
39	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,20	0,30
40	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,20	0,30



### Гармоники напряжения по фазе А(АВ)



### Гармоники напряжения по фазе В(BC)



### Гармоники напряжения по фазе С(СА)

Рисунок 2.16 - Коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения в сети ГРУ-10 кВ ГРЭС

Таблица 2.9 - Результаты испытаний электрической энергии в сети ГРУ-10 кВ ГРЭС по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения

Измеряемая характеристика	Фаза «АВ»			Фаза «СА»			Фаза «ВС»			Нормативное значение
	Результат измерений	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Результат измерений	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Результат измерений	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	
K <sub>Ув</sub>	1.08	0.00		1.17	0.00		1.11	0.00		5.00
K <sub>Унб</sub>	1.11		0.00	1.20		0.00	1.07		0.00	8.00
Погрешность измерений										
Обозначение			Результат				Нормативное значение			
Δ <sub>Ки</sub>			±5.0				±10.0			

Проведенный замер качества электроэнергии во вторичных цепях сетей ГРУ-10 кВ ГРЭС на соответствие нормам ГОСТ показал следующее:

Наиболее значимые гармоники в напряжении – 3, 5, 7, 11, 13; наибольшие значения:

- 5-й гармоники по фазе А – 1,03%;
- 5-й гармоники по фазе В – 1,16%;
- 5-й гармоники по фазе С – 1,09%.

Качество электроэнергии в сети ГРУ-10 кВ **соответствует** всем требованиям ГОСТ: по коэффициенту искажения синусоидальности напряжения и по коэффициенту *n*-ой гармонической составляющей напряжения.

Рассмотрим уровень гармонических искажений в токе сети ГРУ-10 кВ ГРЭС.

#### 2.4.3 Натурные измерения усиления гармонических искажений в токе замыкания на землю

Наиболее тяжелый, с точки зрения процесса развития аварии при возникновении однофазного замыкания на землю, является случай содержания гармонических искажений в токе ОЗЗ на уровне величин сопоставимых с токами 50 Гц при которых ПУЭ рекомендует применение компенсирующих устройств.

При некотором соотношении индуктивностей, в основном сопротивлений реакторов, трансформаторов, и емкости возможно образование резонансного LC контура на высоких частотах. Условие развития резонанса

$$\omega L = 1/\omega C,$$

где  $\omega = 2\pi fn$ ,  $n$  - номер гармоники.

Резонанс на высших гармониках может возникать при «металлическом» однофазном замыкании на землю, при совпадении параметров неповрежденных фаз определенным образом.

Степень развития резонанса определяется величиной отклонения параметров индуктивности и емкости от резонансных и наличием активных составляющих в схеме.

Как правило, в таком случае гармонический состав имеет выраженные, резонансные, гармоники. В резонансных режимах ОЗЗ резко возрастает коэффициент искажения синусоидальности напряжения  $K_u$  до  $K_u = 10-15\%$  (допустимый уровень для нормального режима составляет 5%). При этом в момент возникновения замыкания на землю возможно увеличение амплитудного значения напряжения на неповрежденных фазах.

Осциллограмма переходного процесса опыта однофазного замыкания на землю в сети 10 кВ 1+2+3 СШ ГРУ-10 кВ. представлена на рисунке 2.17. На осциллограммах черный (канал СН1) – напряжение фазы А; зелёный (канал СН2) – напряжение фазы В; красный (канал СН3) – напряжение фазы С; синий (канал СН5) – ток ОЗЗ.

Для подтверждения достоверности данных проводилось несколько опытов. Ввиду схожести результатов, для иллюстрации приводится только одна осциллограмма переходных процессов. Гармонический состав определяется в результате усреднения в серии опытов в одном режиме.

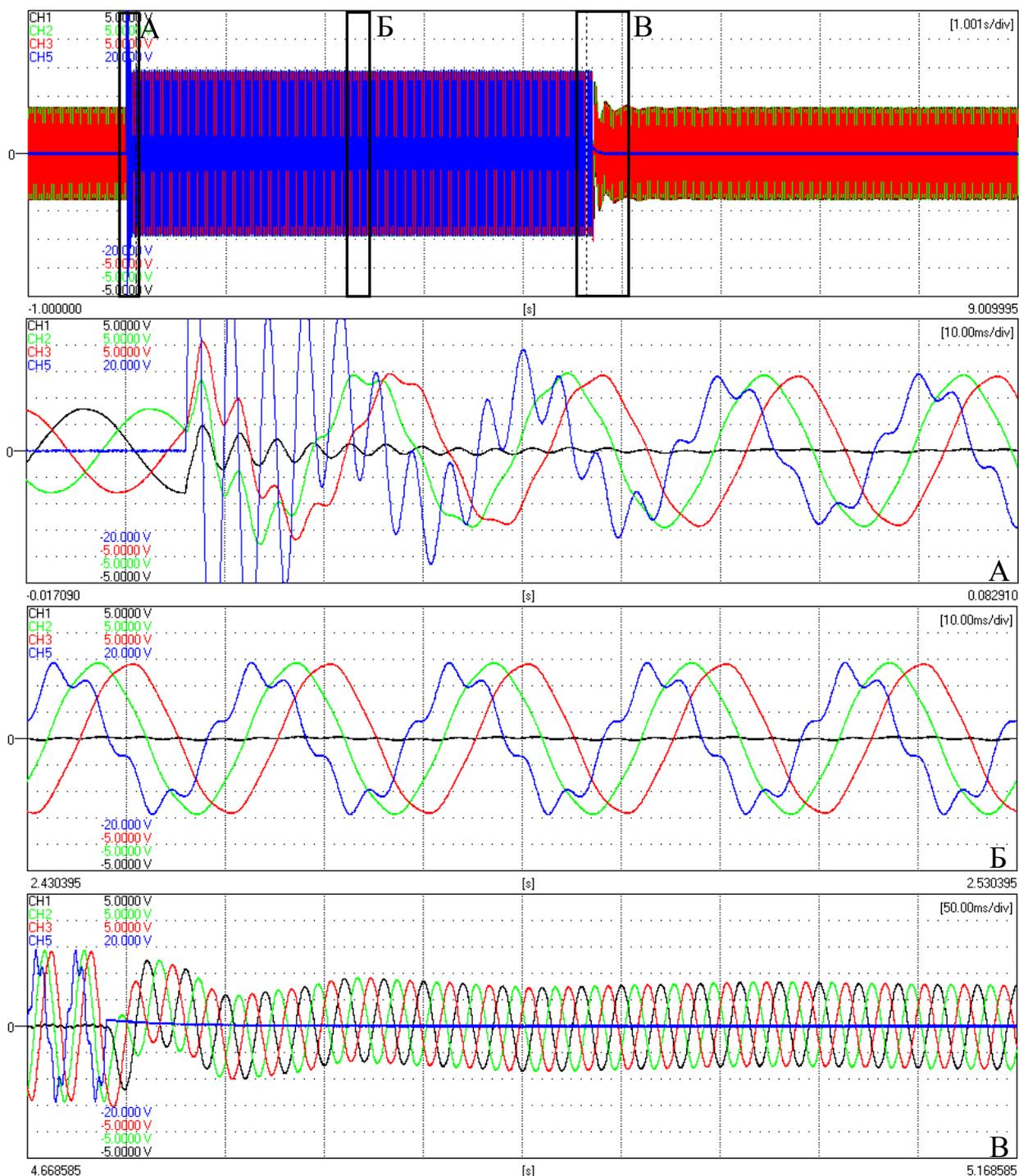


Рисунок 2.17 - Осциллограммы тока ОЗЗ и фазных напряжений при измерениях на ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС. Изолированная нейтраль  
 $I_{033}=359,12$  А;  $K_{\Pi}=2,61$

По результатам анализа получены составляющие промышленной частоты тока ОЗЗ. Для нормального режима совместной работы 1+2+3 с.ш. величина полного тока 50 Гц составляет 359,12 А. При этом емкостная составляющая имеет величину 359,08 А, а активная 5,76 А (активные утечки составляют 1,6%).

На осциллограмме видны существенные искажения тока однофазного замыкания на землю высшими гармониками. В результате спектрального анализа был выделен ряд гармоник, наиболее выраженных в токе замыкания сети ГРУ-10 кВ ГРЭС (таблица 2.10-2.11). Для иллюстрации гармонических составов построена гистограмма - рисунок. 2.18.

Для сети ГРУ-10 кВ ГРЭС наиболее выраженной гармоникой, как и в фазных напряжениях нормального режима является пятая гармоника, ее величина составляет 71,65 А, что соответствует содержанию на уровне 19,93% от полного тока замыкания на землю промышленной частоты. Величина 5 гармоники в токе ОЗЗ в 3 раза превышает установленные нормы ПУЭ. При этом в нормальном режиме качества электроэнергии соответствует ГОСТ.

В [103] рассматривается вопрос возникновения перенапряжений при возникновении однофазных замыканий на землю в промышленной сети. Момент возникновения замыкания на землю соответствует максимуму фазного напряжения. Зафиксированный наибольший уровень перенапряжений для режима изолированной нейтрали составляет 2,61 величины наибольшего рабочего напряжения. При этом частота переходного процесса, при которой зафиксировано перенапряжение также соответствует 250 Гц.

Для дальнейших исследований проведен опыт однофазного замыкания на землю в режиме компенсированном в резонанс заземлении нейтрали. Натурная осциллограмма опыта представлена на рисунке 2.19.

Таблица 2.10 - Усредненные действующие значения величин гармоник тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС, А

№ гарм.	Опыт №1	Опыт №2	Среднее значение
1	359,121	359,504	359,313
2	0,156	0,363	0,259
3	2,139	1,925	2,032
4	0,401	0,417	0,409
5	68,653	74,577	71,615
6	0,361	0,492	0,426
7	5,399	5,648	5,523
8	0,297	0,260	0,278
9	0,740	0,758	0,749
10	0,089	0,093	0,091
11	0,835	0,955	0,895
12	0,049	0,050	0,050
13	0,974	1,329	1,152
14	0,061	0,063	0,062
15	0,207	0,125	0,166
16	0,051	0,066	0,058
17	0,260	0,158	0,209
18	0,031	0,038	0,035
19	0,171	0,172	0,171
20	0,032	0,030	0,031
21	0,122	0,056	0,089
22	0,041	0,039	0,040
23	0,343	0,296	0,319
24	0,030	0,036	0,033
25	0,099	0,096	0,098
26	0,048	0,047	0,047
27	0,036	0,054	0,045
28	0,052	0,076	0,064
29	0,143	0,147	0,145
30	0,019	0,029	0,024
31	0,069	0,058	0,063
32	0,031	0,040	0,035
33	0,034	0,043	0,038
34	0,061	0,073	0,067
35	0,424	0,395	0,409
36	0,062	0,037	0,049
37	0,081	0,124	0,102
38	0,022	0,036	0,029
39	0,015	0,027	0,021
40	0,027	0,031	0,029
<i>I</i> <sub>действ 2-40</sub>	68,921	74,844	71,882

Таблица 2.11 - Усредненные действующие значения величин гармоник тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС, в % от составляющей тока 50 Гц

№ гарм.	Опыт №1	Опыт №2	Среднее значение
1	100,000	100,000	100,000
2	0,043	0,101	0,072
3	0,595	0,535	0,565
4	0,112	0,116	0,114
5	19,117	20,744	19,931
6	0,100	0,137	0,119
7	1,503	1,571	1,537
8	0,083	0,072	0,077
9	0,206	0,211	0,209
10	0,025	0,026	0,025
11	0,233	0,266	0,249
12	0,014	0,014	0,014
13	0,271	0,370	0,321
14	0,017	0,018	0,017
15	0,058	0,035	0,046
16	0,014	0,018	0,016
17	0,072	0,044	0,058
18	0,009	0,011	0,010
19	0,048	0,048	0,048
20	0,009	0,008	0,009
21	0,034	0,016	0,025
22	0,011	0,011	0,011
23	0,095	0,082	0,089
24	0,008	0,010	0,009
25	0,028	0,027	0,027
26	0,013	0,013	0,013
27	0,010	0,015	0,012
28	0,015	0,021	0,018
29	0,040	0,041	0,040
30	0,005	0,008	0,007
31	0,019	0,016	0,018
32	0,008	0,011	0,010
33	0,010	0,012	0,011
34	0,017	0,020	0,019
35	0,118	0,110	0,114
36	0,017	0,010	0,014
37	0,022	0,034	0,028
38	0,006	0,010	0,008
39	0,004	0,007	0,006
40	0,007	0,009	0,008
<i>I</i> <sub>действ 2-40</sub>	19,192	20,819	20,005

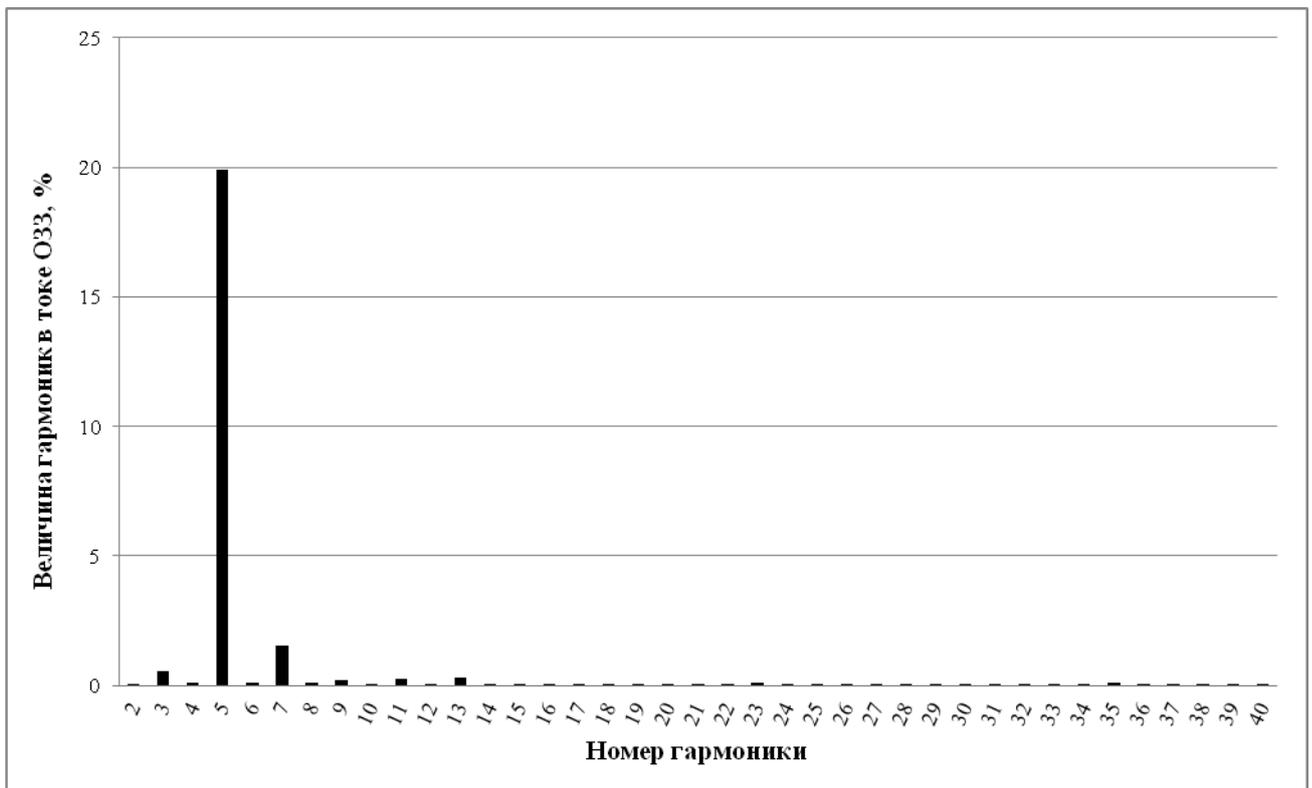
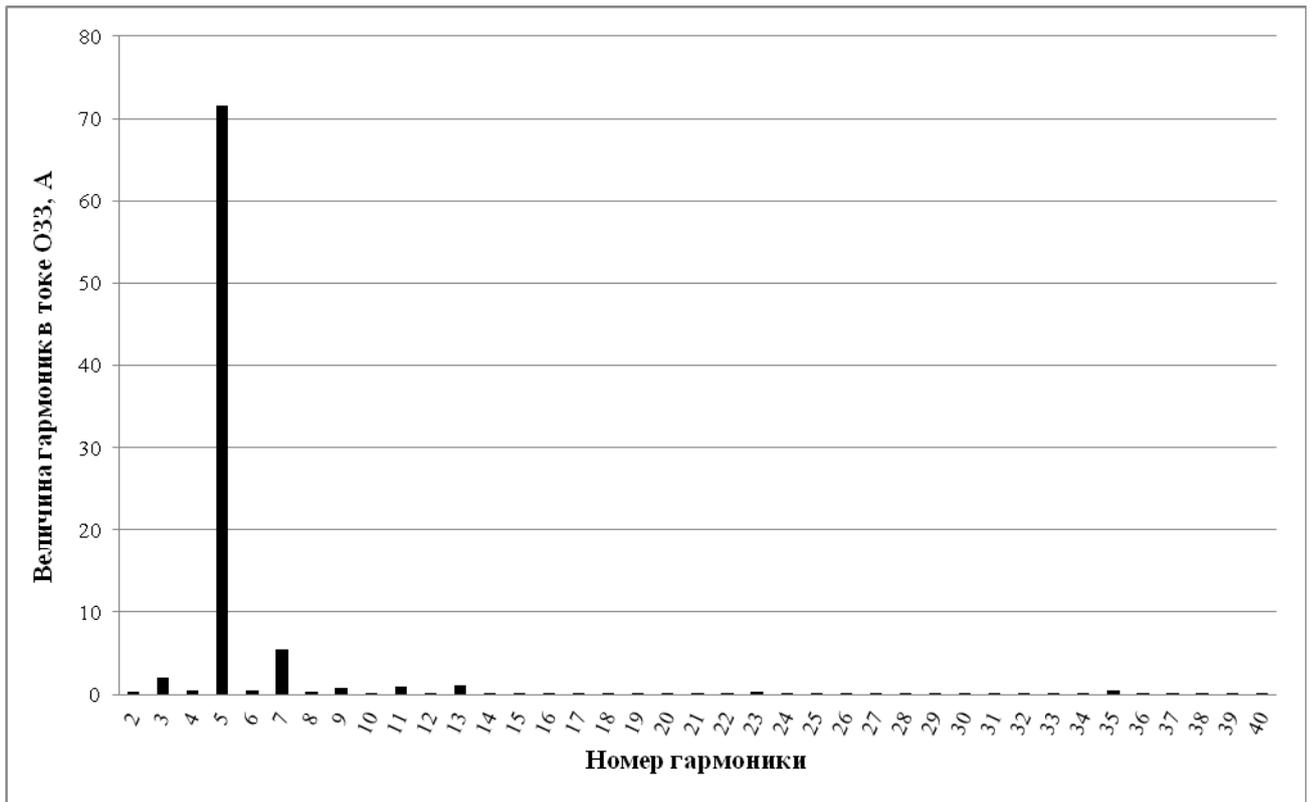


Рисунок 2.18 - Усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от тока промышленной частоты (начиная со 2-й) тока ОЗЗ при изолированной нейтрали для сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС

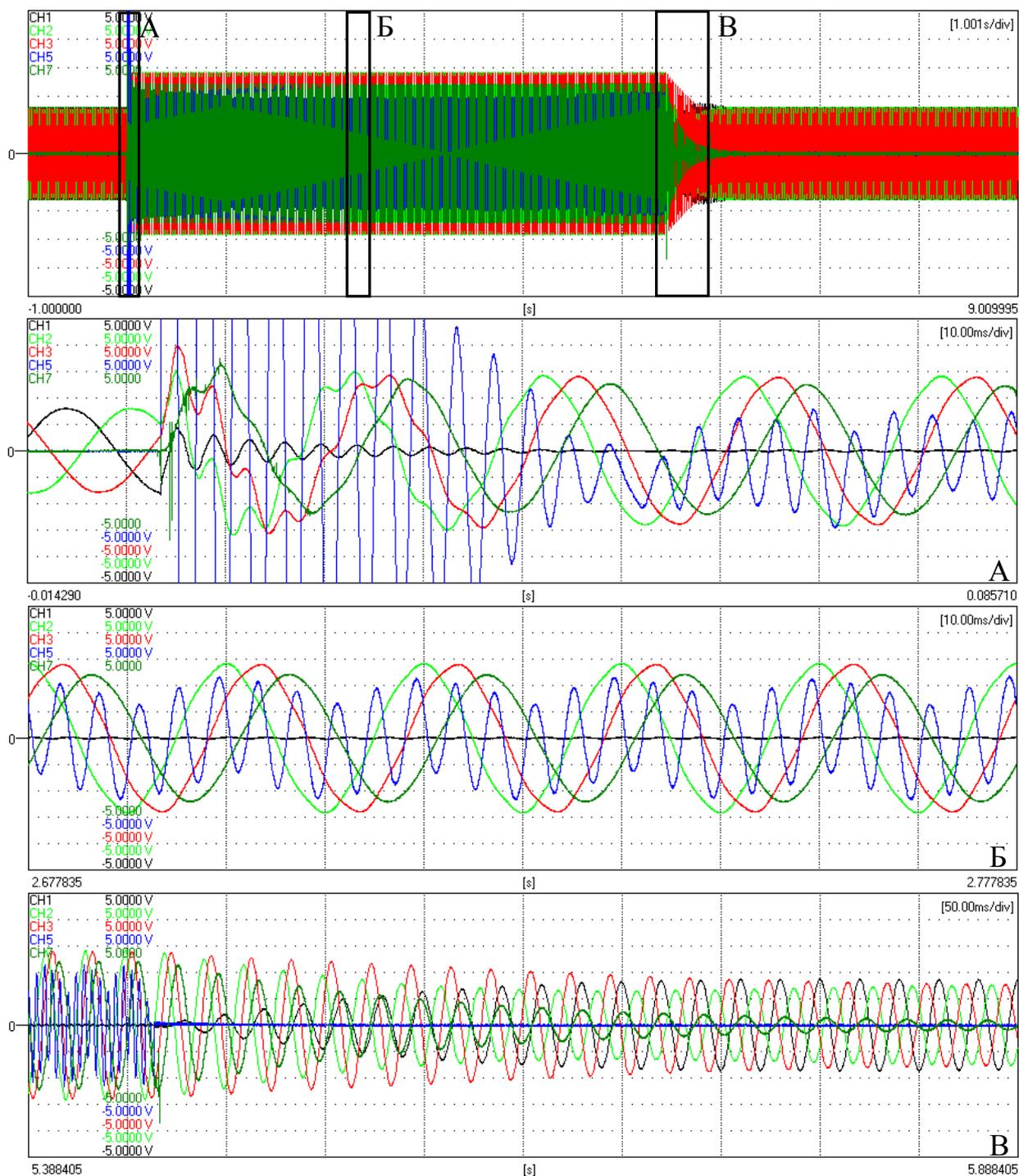


Рисунок 2.19 - Осциллограммы тока ОЗЗ и фазных напряжений при измерениях на ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции ГРЭС. Опыт 4. Нейтраль заземлена через ДГР  
 $I_{033}=15,85$  А;  $I_{дгп}=335,29$  А;  $K_{п}=2,52$

Величина полного остаточного тока 50 Гц составляет 15,85 А. При этом емкостная составляющая имеет величину 5,63А, а активная - 14,82 А, активные утечки составляют 263% от 50 Гц емкостной составляющей. Рост активных утечек обусловлен включением в нейтраль параллельно семи катушек. При данном полном остаточном токе величина раскомпенсации составляет 1,6% на промышленной частоте 50 Гц.

Момент возникновения замыкания на землю соответствует максимуму фазного напряжения. Зафиксированный наибольший уровень перенапряжений для режима компенсированной нейтрали несколько ограничен по отношению к сети с изолированной нейтралью, за счет включения катушек компенсации, и составляет 2,52 величины наибольшего рабочего напряжения. При этом частота также соответствует 250 Гц.

На осциллограмме практически полностью компенсирована составляющая тока замыкания на землю 50 Гц, при этом, согласно результатам спектрального анализа (таблица 2.12-2.13), уровни гармонических искажений в сети ГРУ-10 кВ ГРЭС остались практически без изменений. Для иллюстрации гармонических составов построена гистограмма - рисунок. 2.20.

Для сети ГРУ-10 кВ ГРЭС с компенсированной нейтралью наиболее выраженной является пятая гармоника, ее величина составляет 66,78 А, что соответствует содержанию на уровне 421,23% от остаточного тока замыкания на землю промышленной частоты. В токе компенсации практически не содержится высших гармоник, на рисунке 2.21 представлена гистограмма гармонического состава тока ДГР.

Таблица 2.12 - Усредненные действующие значения величин гармоник тока ОЗЗ и тока через ДГР в сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС, А

№ гарм.	Опыт №1		Опыт №2		Опыт №3		Опыт №4		Среднее значение	
	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР
1	15,845	337,840	20,918	351,418	22,196	353,125	15,853	335,288	18,703	344,418
2	0,227	0,462	0,239	0,285	0,138	0,188	0,377	0,359	0,245	0,324
3	5,474	4,776	5,741	4,686	5,192	4,770	5,214	5,040	5,405	4,818
4	0,506	0,069	0,428	0,087	0,291	0,061	0,417	0,180	0,411	0,099
5	60,495	2,018	56,121	1,979	60,066	2,209	66,779	2,264	60,865	2,118
6	0,744	0,046	0,601	0,048	0,480	0,047	0,570	0,110	0,599	0,063
7	4,822	0,206	4,851	0,117	6,768	0,111	3,106	0,186	4,887	0,155
8	0,246	0,054	0,304	0,043	0,215	0,049	0,299	0,087	0,266	0,058
9	0,877	0,052	0,685	0,062	0,660	0,054	0,886	0,090	0,777	0,065
10	0,094	0,038	0,103	0,039	0,085	0,044	0,112	0,073	0,099	0,049
11	0,378	0,045	0,863	0,042	1,008	0,042	1,101	0,080	0,838	0,052
12	0,048	0,039	0,047	0,041	0,052	0,042	0,074	0,067	0,055	0,047
13	0,658	0,045	0,984	0,039	1,166	0,041	1,607	0,068	1,104	0,048
14	0,076	0,040	0,057	0,037	0,068	0,044	0,076	0,058	0,069	0,045
15	0,057	0,051	0,119	0,040	0,123	0,043	0,134	0,056	0,108	0,048
16	0,078	0,038	0,061	0,041	0,064	0,037	0,062	0,055	0,066	0,043
17	0,206	0,044	0,133	0,048	0,264	0,051	0,170	0,047	0,193	0,048
18	0,023	0,038	0,029	0,043	0,031	0,045	0,048	0,050	0,033	0,044
19	0,167	0,035	0,133	0,043	0,165	0,047	0,087	0,045	0,138	0,043
20	0,030	0,039	0,033	0,043	0,035	0,045	0,041	0,048	0,035	0,044
21	0,054	0,039	0,050	0,041	0,071	0,046	0,078	0,047	0,063	0,043
22	0,042	0,038	0,044	0,044	0,049	0,044	0,043	0,048	0,045	0,044
23	0,314	0,039	0,218	0,042	0,398	0,045	0,224	0,051	0,289	0,044
24	0,029	0,040	0,030	0,040	0,034	0,039	0,039	0,048	0,033	0,042
25	0,105	0,053	0,130	0,041	0,136	0,040	0,104	0,049	0,119	0,046
26	0,048	0,041	0,047	0,044	0,046	0,039	0,053	0,048	0,049	0,043
27	0,029	0,038	0,020	0,048	0,043	0,051	0,030	0,047	0,031	0,046
28	0,058	0,039	0,049	0,040	0,073	0,039	0,057	0,050	0,059	0,042
29	0,122	0,040	0,098	0,043	0,150	0,039	0,082	0,042	0,113	0,041
30	0,016	0,037	0,020	0,042	0,024	0,042	0,027	0,047	0,022	0,042
31	0,072	0,046	0,051	0,045	0,054	0,044	0,063	0,044	0,060	0,045
32	0,025	0,038	0,027	0,038	0,028	0,043	0,034	0,051	0,029	0,043
33	0,031	0,039	0,035	0,046	0,034	0,045	0,036	0,047	0,034	0,044
34	0,058	0,037	0,064	0,041	0,068	0,038	0,062	0,043	0,063	0,040
35	0,425	0,040	0,420	0,037	0,418	0,037	0,424	0,042	0,422	0,039
36	0,062	0,034	0,068	0,041	0,066	0,040	0,063	0,042	0,065	0,039
37	0,078	0,041	0,077	0,038	0,073	0,040	0,079	0,043	0,077	0,041
38	0,023	0,039	0,025	0,041	0,020	0,040	0,027	0,041	0,024	0,040
39	0,020	0,039	0,020	0,041	0,017	0,040	0,025	0,046	0,021	0,042
40	0,029	0,039	0,028	0,038	0,024	0,037	0,030	0,045	0,028	0,040
<i>I</i> <sub>действ 2-40</sub>	60,955	5,216	56,650	5,103	60,699	5,268	67,097	5,552	61,350	5,285

Таблица 2.13 - Усредненные действующие значения величин гармоник тока ОЗЗ и тока через ДГР в сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС, в % от составляющей тока 50 Гц

№ гарм.	Опыт №1		Опыт №2		Опыт №3		Опыт №4		Среднее значение	
	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР	ОЗЗ	ДГР
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
2	1,432	0,137	1,144	0,081	0,620	0,053	2,376	0,107	1,393	0,095
3	34,549	1,414	27,446	1,333	23,393	1,351	32,889	1,503	29,569	1,400
4	3,196	0,020	2,044	0,025	1,310	0,017	2,630	0,054	2,295	0,029
5	381,788	0,597	268,290	0,563	270,619	0,626	421,230	0,675	335,482	0,615
6	4,698	0,014	2,875	0,014	2,163	0,013	3,598	0,033	3,334	0,019
7	30,432	0,061	23,188	0,033	30,494	0,031	19,589	0,055	25,926	0,045
8	1,553	0,016	1,453	0,012	0,971	0,014	1,886	0,026	1,466	0,017
9	5,537	0,016	3,275	0,018	2,972	0,015	5,586	0,027	4,343	0,019
10	0,594	0,011	0,495	0,011	0,384	0,012	0,708	0,022	0,545	0,014
11	2,384	0,013	4,124	0,012	4,539	0,012	6,942	0,024	4,497	0,015
12	0,300	0,012	0,226	0,012	0,232	0,012	0,467	0,020	0,306	0,014
13	4,154	0,013	4,704	0,011	5,252	0,011	10,134	0,020	6,061	0,014
14	0,482	0,012	0,271	0,011	0,307	0,012	0,478	0,017	0,385	0,013
15	0,357	0,015	0,570	0,011	0,555	0,012	0,845	0,017	0,582	0,014
16	0,493	0,011	0,293	0,012	0,289	0,011	0,392	0,016	0,367	0,013
17	1,297	0,013	0,634	0,014	1,190	0,014	1,071	0,014	1,048	0,014
18	0,143	0,011	0,141	0,012	0,141	0,013	0,304	0,015	0,182	0,013
19	1,052	0,010	0,634	0,012	0,742	0,013	0,549	0,013	0,744	0,012
20	0,192	0,012	0,160	0,012	0,156	0,013	0,261	0,014	0,192	0,013
21	0,340	0,011	0,237	0,012	0,319	0,013	0,494	0,014	0,348	0,013
22	0,266	0,011	0,210	0,012	0,221	0,013	0,274	0,014	0,243	0,013
23	1,984	0,012	1,042	0,012	1,793	0,013	1,412	0,015	1,558	0,013
24	0,185	0,012	0,146	0,011	0,153	0,011	0,244	0,014	0,182	0,012
25	0,661	0,016	0,620	0,012	0,611	0,011	0,654	0,015	0,637	0,014
26	0,302	0,012	0,226	0,013	0,209	0,011	0,334	0,014	0,268	0,013
27	0,183	0,011	0,097	0,014	0,194	0,014	0,189	0,014	0,166	0,013
28	0,363	0,012	0,236	0,011	0,327	0,011	0,359	0,015	0,321	0,012
29	0,770	0,012	0,469	0,012	0,676	0,011	0,515	0,013	0,608	0,012
30	0,104	0,011	0,094	0,012	0,107	0,012	0,170	0,014	0,119	0,012
31	0,457	0,014	0,244	0,013	0,241	0,012	0,396	0,013	0,335	0,013
32	0,158	0,011	0,131	0,011	0,128	0,012	0,213	0,015	0,158	0,012
33	0,198	0,011	0,167	0,013	0,151	0,013	0,227	0,014	0,186	0,013
34	0,368	0,011	0,306	0,012	0,308	0,011	0,393	0,013	0,344	0,012
35	2,684	0,012	2,006	0,011	1,882	0,011	2,676	0,013	2,312	0,012
36	0,391	0,010	0,325	0,012	0,297	0,011	0,396	0,012	0,352	0,011
37	0,494	0,012	0,367	0,011	0,331	0,011	0,500	0,013	0,423	0,012
38	0,147	0,011	0,122	0,012	0,089	0,011	0,169	0,012	0,132	0,012
39	0,127	0,012	0,096	0,012	0,076	0,011	0,155	0,014	0,114	0,012
40	0,183	0,011	0,136	0,011	0,108	0,010	0,191	0,013	0,155	0,011
<i>I</i> действ 2-40	384,694	1,544	270,822	1,452	273,473	1,492	423,233	1,656	338,056	1,536

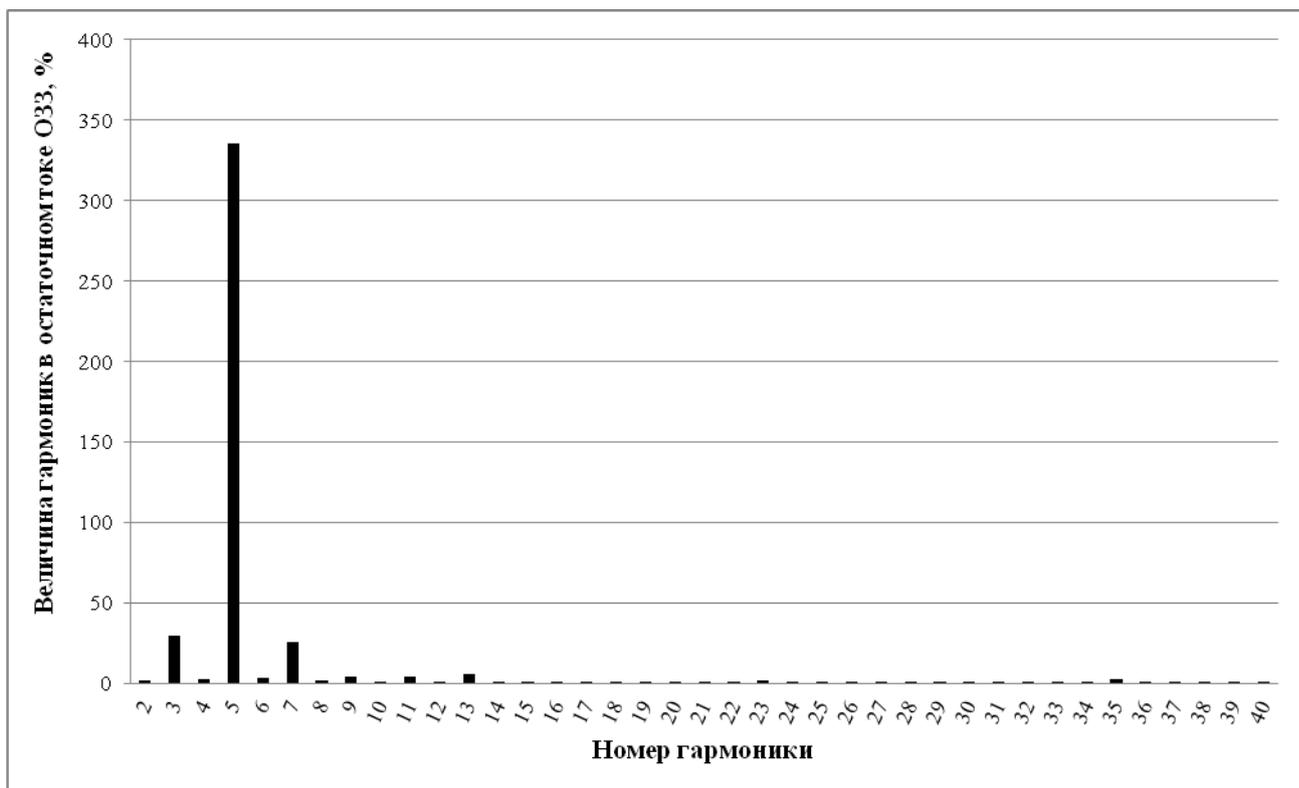
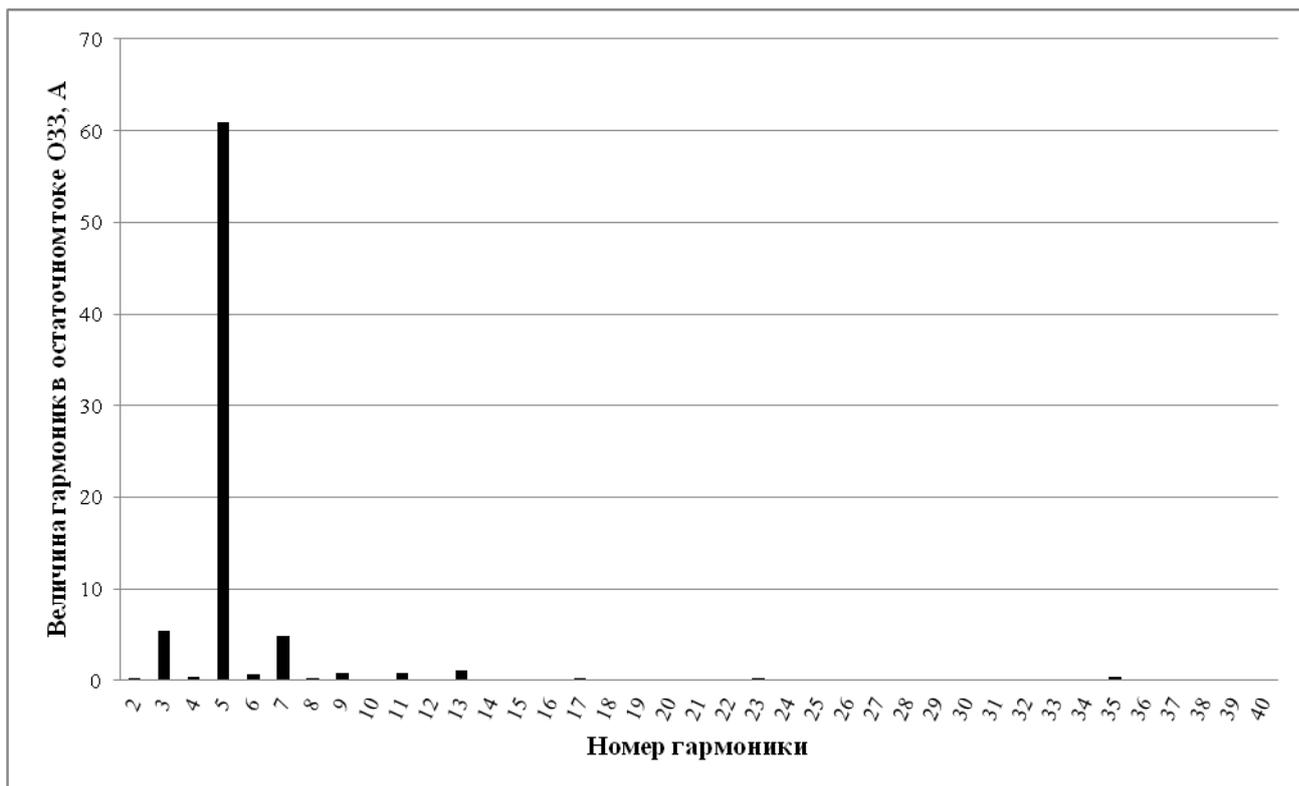


Рисунок 2.20 - Усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от остаточного тока промышленной частоты (начиная со 2-й) при компенсированной нейтрали для сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС (первая гармоника тока ОЗЗ при наличии ДГР составляет 15,845 А, при отсутствии компенсации – 359,313 А)

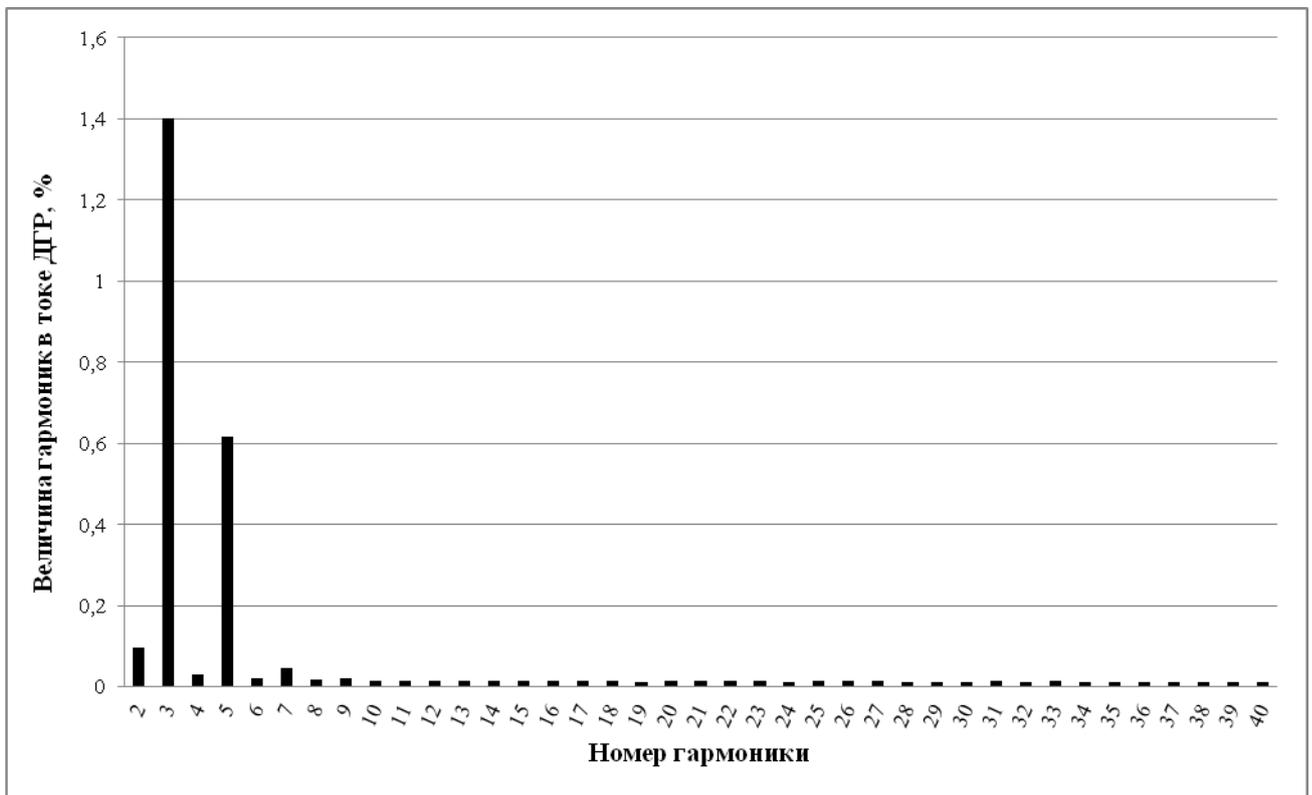
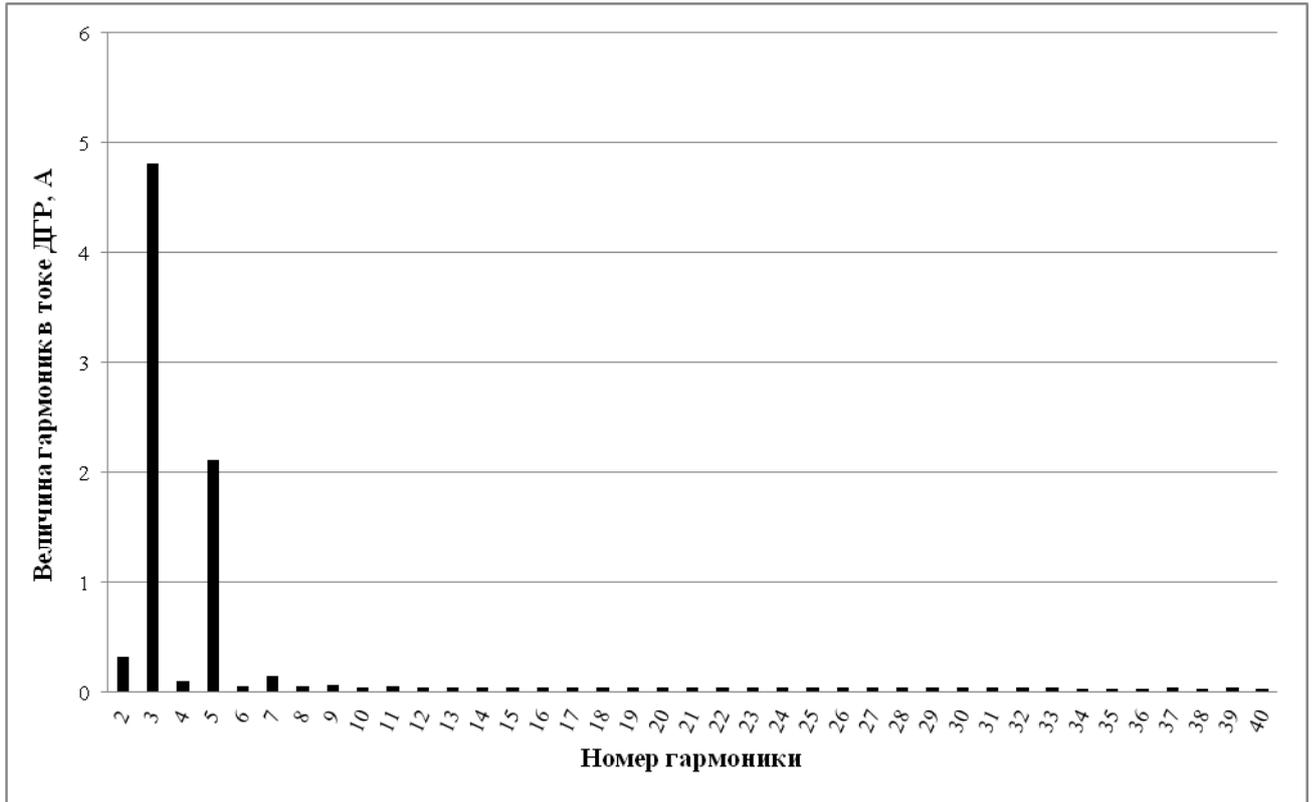


Рисунок 2.21 - Усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от тока ДГР промышленной частоты (начиная со 2-й) при компенсированной нейтрали для сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС

Анализ гармонического состава тока ОЗЗ показывает, что в токе присутствуют высшие гармонические составляющие, величина которых может составлять значительную долю от величины тока 50 Гц.

При величине емкостного тока ОЗЗ 50 Гц порядка 340÷359 А, составляющая 5 гармоники (250 Гц) составляет величину 60÷71,6 А. Данное явление отмечается как для режима нейтрали сети заземленной через ДГР, так и для режима изолированной нейтрали.

Присутствие составляющей 25Гц в токе ОЗЗ для сети, заземленной через ДГР, обеспечивается работой ИКТ. ИКТ подключен к общей нейтрали дугогасящих ректоров. Чем больше подключенных к сети нейтралеобразующих трансформаторов с ДГР, тем больше величина составляющей тока 25 Гц: 2 секция 0,38-0,52 А ; 3 секция - 0,499-0,575 А; 1+2+3 секции – 0,88-1,21 А. Для сети с изолированной нейтралью гармонический анализ также показал небольшое значение составляющей 25 Гц величиной 0,009-0,117 А.

Результаты экспериментальных измерений токов ОЗЗ указывают на то, что при наличии в нейтрали сети системы компенсации ток высших гармоник остается практически неизменным, его величина в 3 раза превышает нормы рекомендованные ПУЭ, поэтому необходимо производить дополнительные мероприятия для снижения уровней гармонических искажений тока однофазного замыкания на землю.

#### **2.4.4 Методы борьбы с гармоническими искажениями в токе ОЗЗ**

*Оценка средств снижения уровней гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю.*

*Снижение уровней высших гармоник схемными решениями*

Одной из мер снижения гармонических искажений в токе ОЗЗ является изменение топологии сети. При изменении параметров сети (емкости или индуктивности) возможно нарушение условия резонанса на этой гармонике. В ря-

де случаев повышение качества электроэнергии может быть достигнуто путем деления сети, питания нелинейных нагрузок от отдельных трансформаторов или подключение их к отдельным обмоткам трехобмоточных трансформаторов.

Одним из мероприятий снижения резонансного роста тока 5 гармоники в рассматриваемой сети - деление сети. Для данной схемы расчетно определено, что при раздельной работе секций шин резонансного роста тока 5 гармоники в токе ОЗЗ не наблюдается. Деление сети на три части приведет к уменьшению емкостного тока замыкания на землю отдельной части и, как следствие, к смещению резонансной области в сторону более высоких частот. Так как содержание высоких частот в напряжении в нормальном режиме работы сети незначительно, выраженного роста резонансных гармоник не возникнет.

Однако данная мера значительно ограничена по возможности применения. Для данного объекта деление сети невозможно, исходя из расчетов основных технологических режимов. Рассмотрим подробнее технические средства снижения уровней гармонических искажений.

#### *Снижение уровней высших гармоник применением фильтров*

Уровень гармонических искажений в токе ОЗЗ определяется совокупной мощностью нелинейных нагрузок подключенных к сети и параметрами схемы.

Для улучшения качества электроэнергии зачастую используют фильтры. Однако исходя из физических аспектов процессов при возникновении замыкания на землю невозможно подключить фильтр непосредственно в цепь протекания тока ОЗЗ. Кроме того, как было показано выше, при допустимых уровнях искажений в напряжении нормального режима возможно возникновение существенных гармонических искажений за счет благоприятных для увеличения искажений параметров схемы.

Возможно подключение дополнительных фильтров на секциях питающих шин для снижения уровня гармонических искажений в режиме однофазного замыкания на землю. В настоящее время, в электрических сетях применяются фильтры следующих типов:

- пассивные фильтры;
- активные фильтры;
- гибридные фильтры;

Принципы работы достаточно подробно изложены в литературе. Остановимся кратко на особенностях данных устройств.

Пассивные фильтры служат для образования для гармонических токов пути с низким полным сопротивлением, чтобы они протекали через фильтр. В зависимости от необходимости фильтр может быть подобран для одной гармоники или для широкого спектра.

Однако массовое применение их позволило выявить значительные недостатки. Во-первых, значительная мощность установок для снижения до допустимого уровня гармоник. Во-вторых, для крупных электрических сетей возможны существенное изменение топологии схемы, что приводит к стабильности амплитудно-частотную характеристику, что будет существенно влиять на спектр гармонических искажений в токе ОЗЗ. Также у пассивных фильтров возможно возникновение резонанса токов в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник.

Для того, чтобы сделать систему адаптивной к изменению параметров гармонических искажений возможно применение активных или гибридных фильтров. Гармонический ток генерируется и поступает в сеть из активного устройства. На практике амплитуда гармонического тока уменьшается на 90%. Соответственно, уменьшается импеданс источника на частоте гармоники, и уменьшаются искажения напряжения. По сравнению с пассивными, активные фильтры имеют меньшие массогабаритные показатели, процесс настройки их значительно проще.

Активные фильтры гармоник являются новыми и значительно более сложными устройствами. Следует отметить, что в процессе возникновения однофазного замыкания на землю возможно существенное искажения питающего напряжения. Установленная мощность активного фильтра в таком случае мо-

жет быть сопоставима с мощностью нелинейных нагрузок. Потому использование активных фильтров экономически неэффективно, в том числе с высокими капитальными и эксплуатационными издержками.

Рассмотрена возможность применения других технических решений для снижения уровня гармонических искажений в токе замыкания на землю. Для этого проведено моделирование процессов в сети ГРУ-10 кВ в программном комплексе ЕМТР.

Модель включает в себя:

- модели эквивалентных генераторов;
- модели блочных трансформаторов;
- модель электрической сети, с параметрами эквивалентными полученным в процессе измерений;
- модели ТН;
- модели токоограничивающих реакторов;
- модели нагрузок;
- модели источника высших гармоник.

На рисунке 2.22 представлена расчетная осциллограмма тока однофазного замыкания на землю в объединенной сети ГРУ-10 кВ, нейтраль сети изолирована; гармонический состав представлен на рисунке 2.23. Величина тока замыкания на землю промышленной частоты составила 353 А. Величина 5 гармоники в токе ОЗЗ за счет резонансного роста составляет 57,9А. Что качественно и количественно соотносится с результатами натурных замеров.

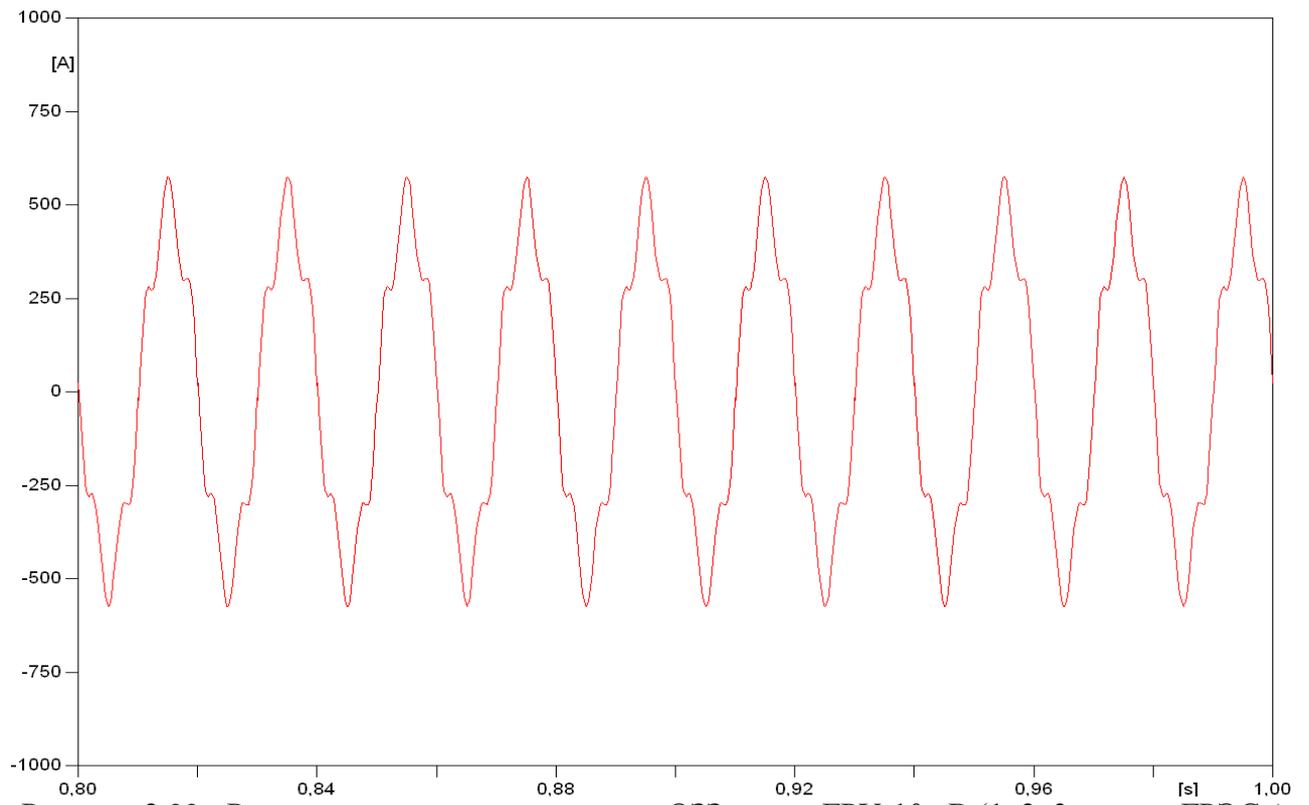


Рисунок 2.22 - Расчетная осциллограммы тока ОЗЗ в сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции ГРЭС. )  
Нейтраль изолирована

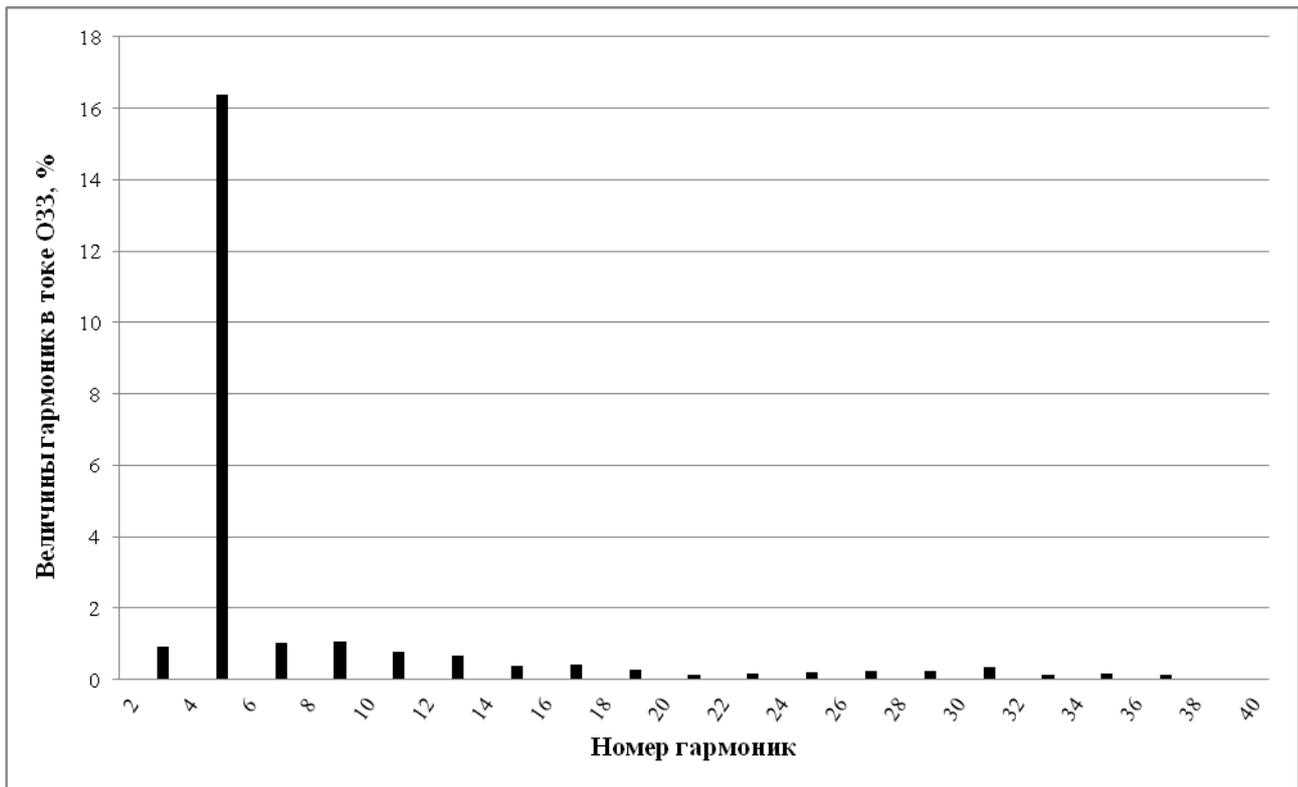
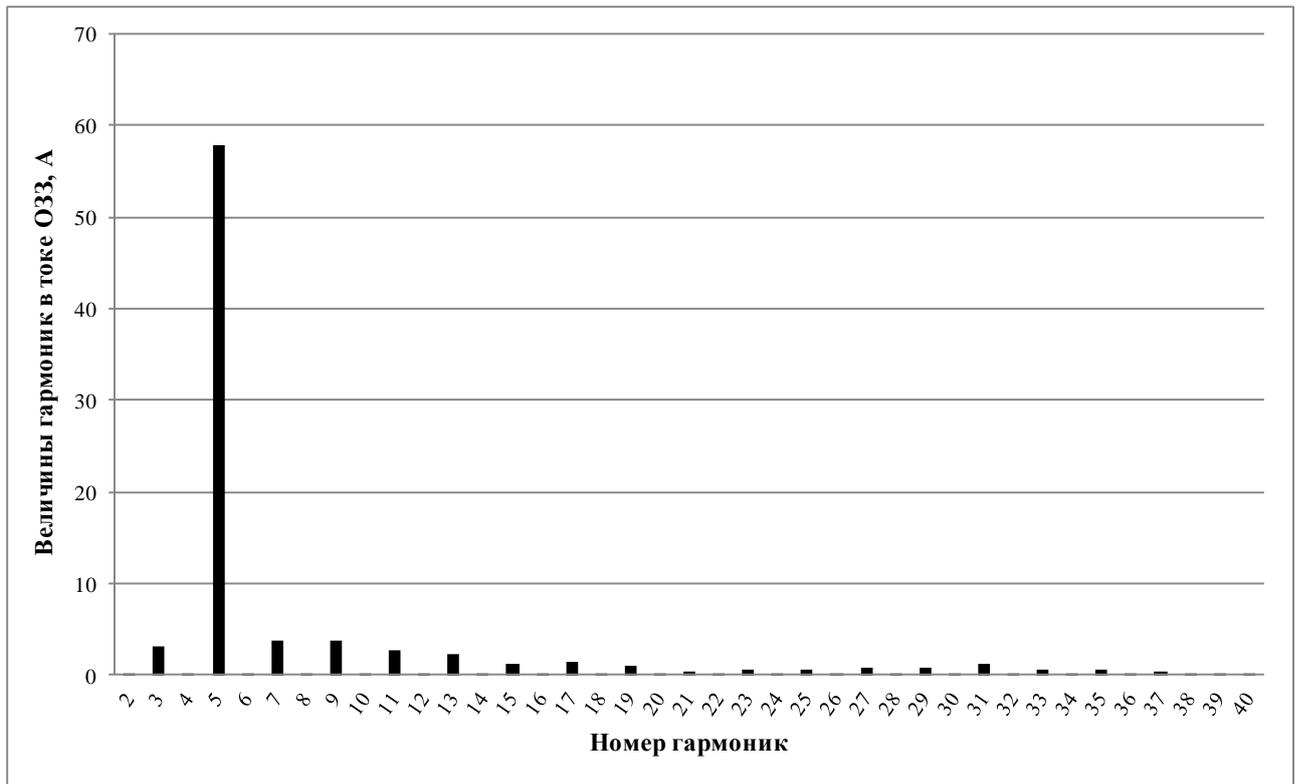


Рисунок 2.23 - Расчеты усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от тока ОЗЗ промышленной частоты (начиная со 2-й) при изолированной нейтрали для сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС (первая гармоника тока ОЗЗ 353 А)

*Снижение уровней гармонических искажений в токе замыкания на землю путем изменения режима заземления нейтрали*

К техническим средствам снижения уровней гармонических искажений относятся средства позволяющие исключить возможность резонансного роста, путем включения в нейтраль активного сопротивления.

При моделировании точность настройки систем компенсации устанавливалась исходя из проведенных опытов. Значение остаточного емкостного тока замыкания на землю, полученное в процессе моделирования, по основной частоте в рассматриваемом режиме равно 15,17 А.

В расчетном случае гармонические искажения в напряжении нормального режима составляют 1,3% 5 гармоники; при однофазном замыкании на землю, содержание 5 гармоники в токе ОЗЗ при компенсированном заземлении нейтрали и настройке системы компенсации близкой к резонансной, уровень пятой гармоники незначительно снизился, до величины 55,75 А. Расчетная осциллограмма и гистограмма гармонического состава остаточного тока представлены на рисунке 2.24-2.25.

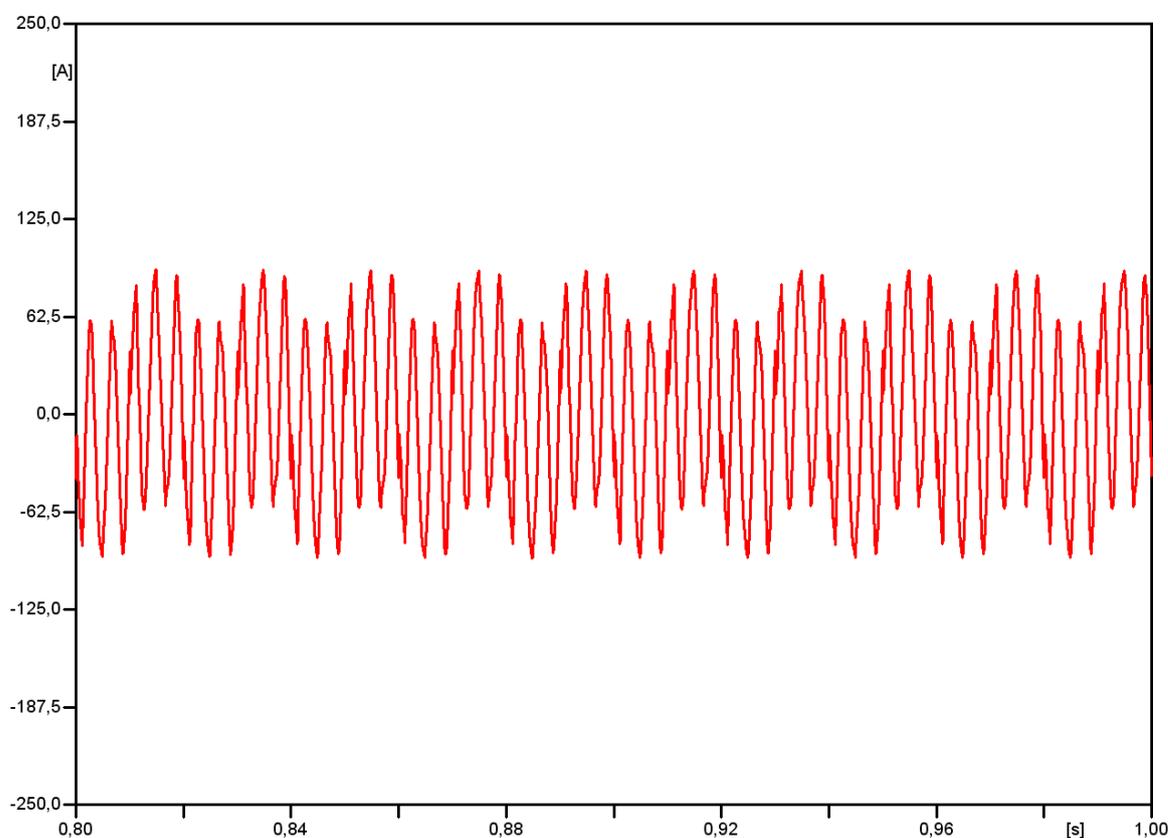


Рисунок 2.24 - Расчетная осциллограмма остаточного тока ОЗЗ при замыкании на землю в ГРУ-10 кВ ГРЭС. нейтраль компенсирована,  $I_{ост}=15,17$  А.

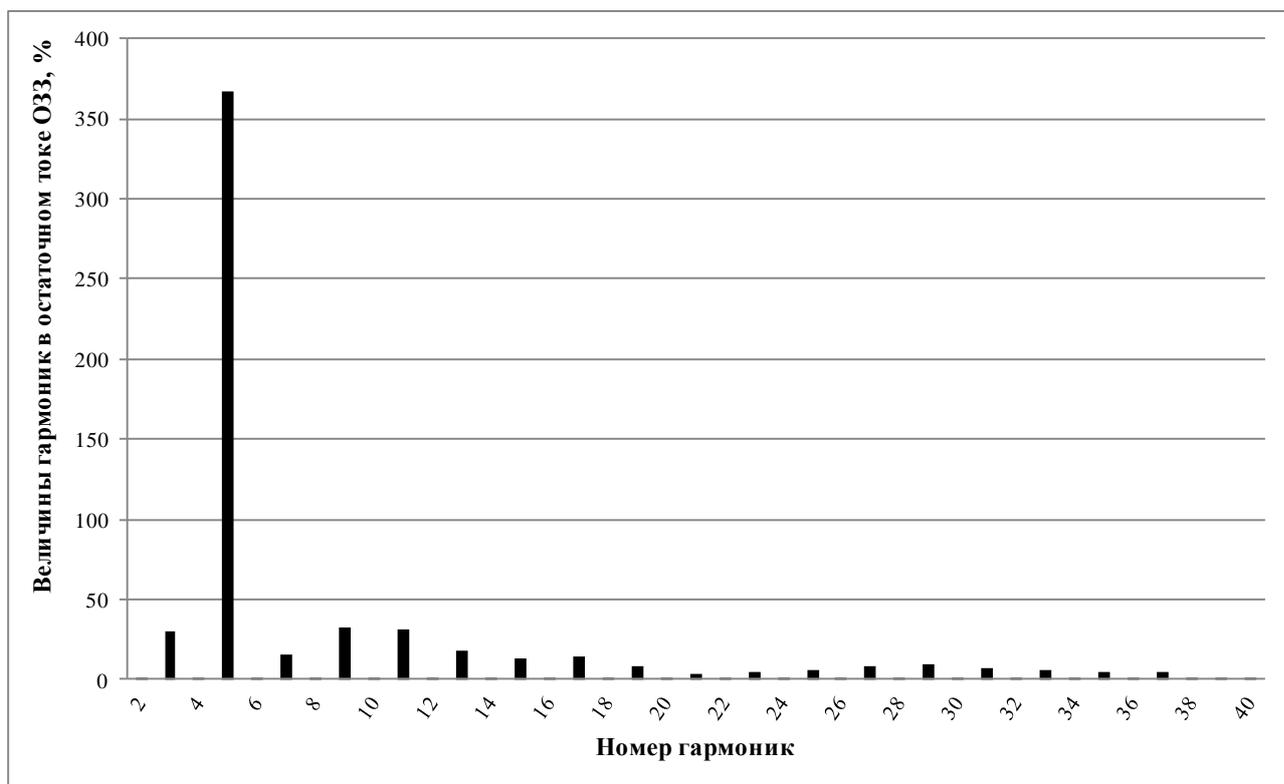
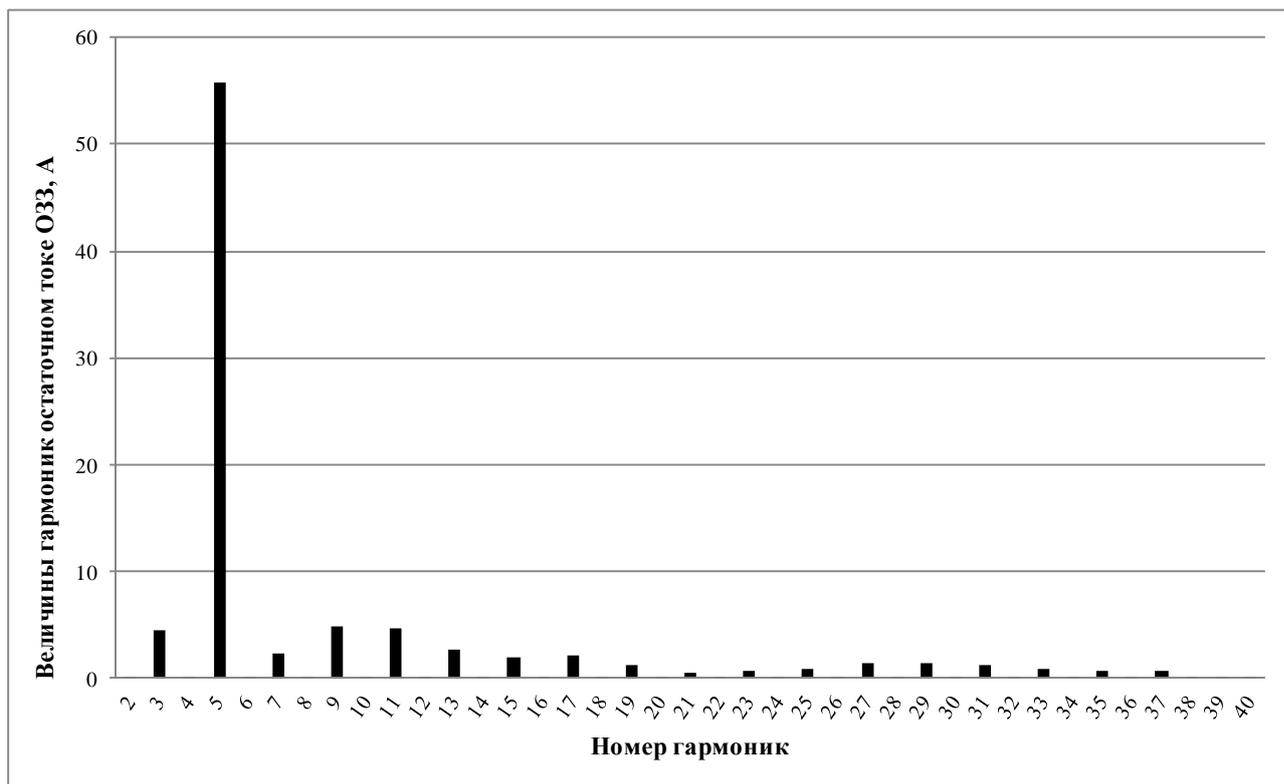


Рисунок 2.25 - Расчетый усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от остаточного тока ОЗЗ промышленной частоты (начиная со 2-й) при компенсированной нейтрали для сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС (первая гармоника тока ОЗЗ при наличии ДГР составляет 15,17 А)

При заземлении нейтрали параллельно через высокоомный резистор снижается резонансный рост гармонической составляющей. В рассматриваемой схеме, при таком значительном резонансном росте 5 гармоники в токе ОЗЗ резистор оказался не достаточно эффективным. Эквивалентное активное заземление нейтрали номиналом 150 Ом снижает уровень гармоники только на 8%, до 51,65 А. Расчетная осциллограмма и гистограмма гармонического состава остаточного тока представлены на рисунке 2.26-2.27.

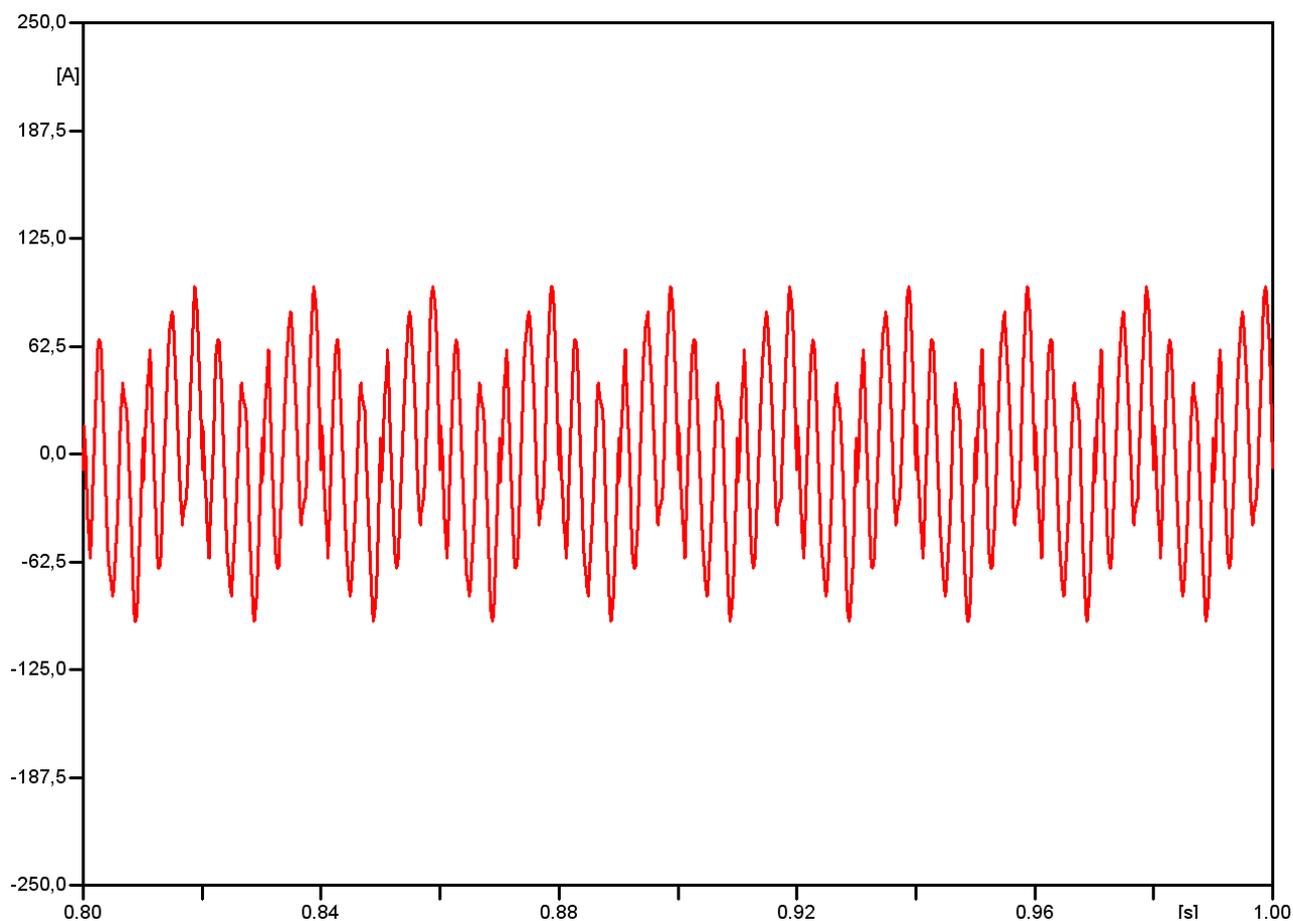


Рисунок 2.26 - Расчетная осциллограмма остаточного тока ОЗЗ в сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции ГРЭС. ). Комбинированный режим заземления нейтрали

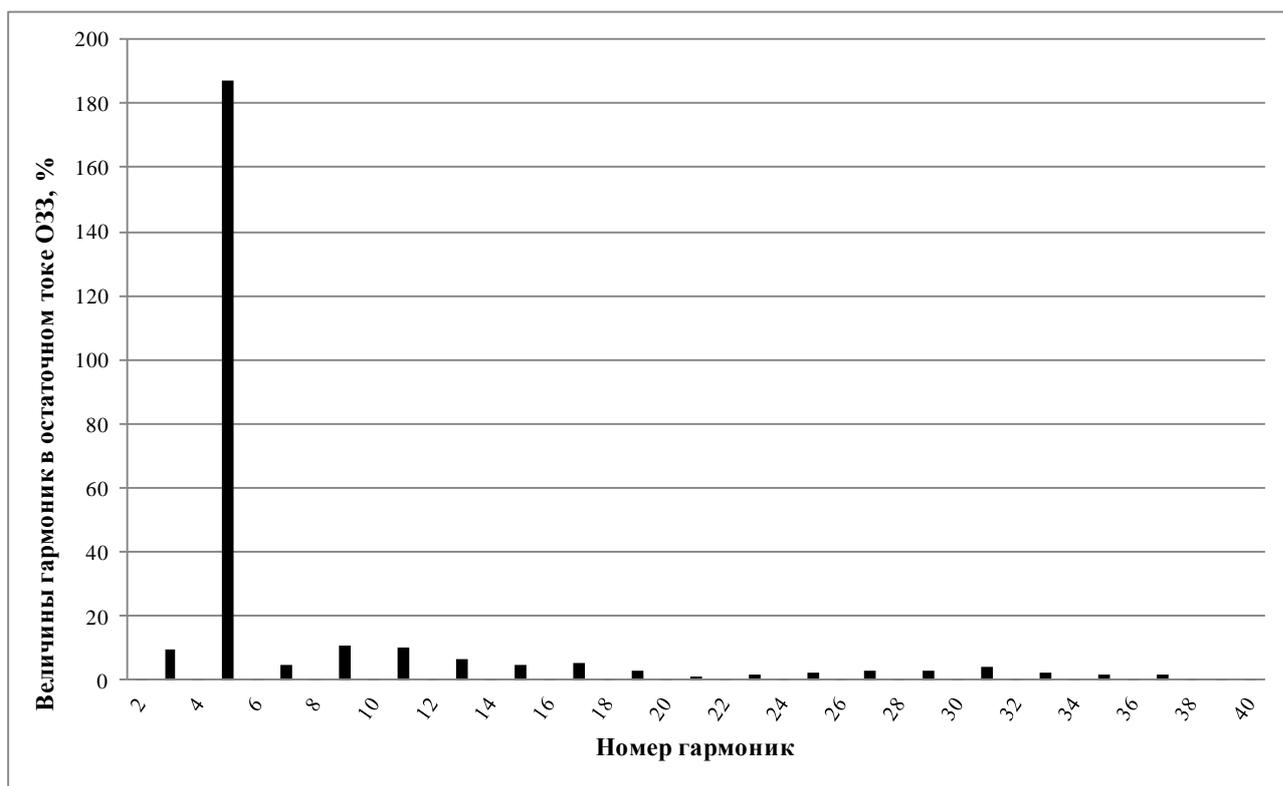
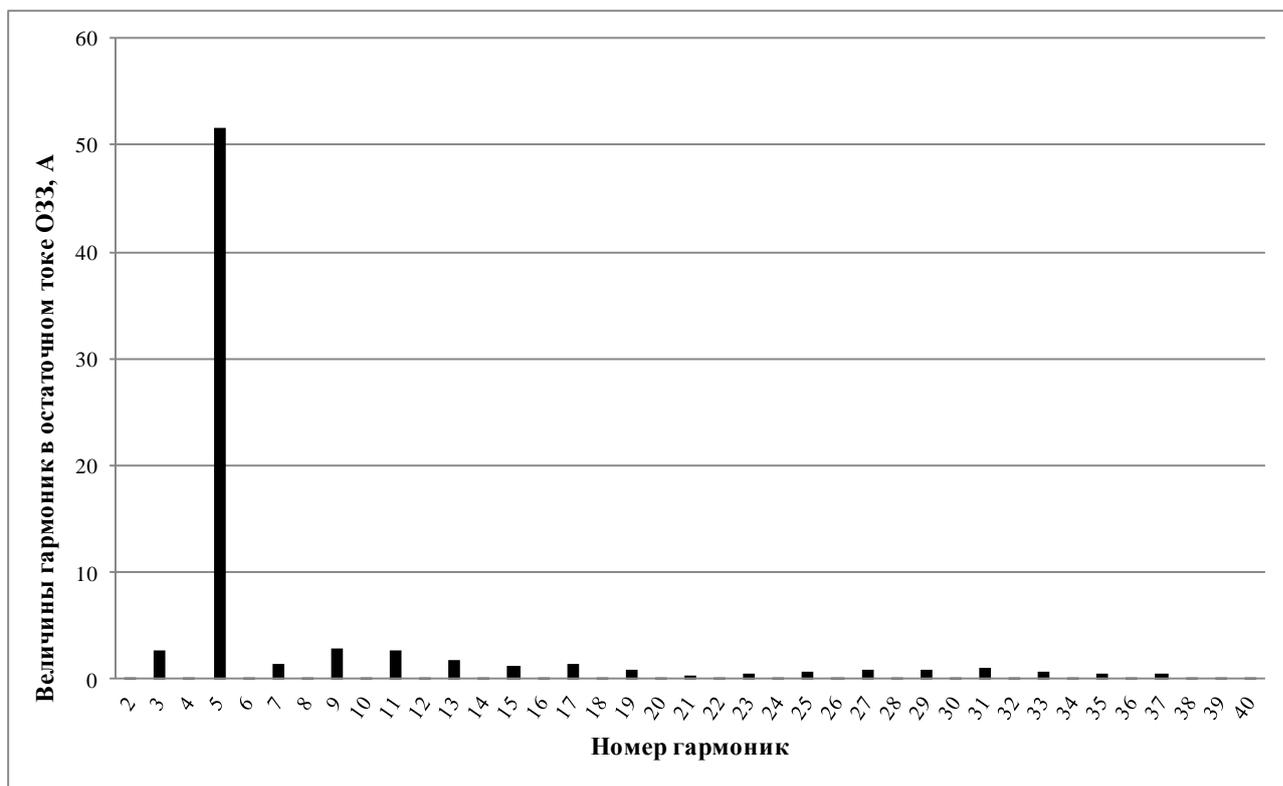


Рисунок 2.27 - Расчетый усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от остаточного тока ОЗЗ промышленной частоты (начиная со 2-й) при изолированной нейтрали для сети ГРУ-10 кВ (1, 2, 3 секции) ГРЭС (первая гармоника тока ОЗЗ при наличии ДГР и резистора сопротивлением 150 Ом, составляет 27,6 А)

## 2.5. Выводы по главе

1. В процессе внедрения новых технических решений происходит увеличение нелинейных нагрузок, что приводит к росту уровня нелинейности тока однофазного замыкания на землю. Увеличение нелинейной нагрузки требует внедрения дополнительных мер защиты сети, в том числе по предотвращению дуговых перенапряжений.

2. Обобщение результатов замеров емкостного тока в сетях среднего класса напряжения городского и промышленного назначения показывает значительное содержание гармоник в токе однофазного замыкания на землю. В 54% объектов сети 6-10 кВ и 37,5% объектов 35 кВ содержатся токи гармоник, значительно утяжеляющие процессы при возникновении дуговых замыканий.

3. Определяющее значение на частоту и уровень гармонических искажений в токе ОЗЗ имеют параметры контура протекания тока. В процессе эксплуатации объектов энергохозяйства возможно возникновение резонансных условий для протекания гармоник. При проектировании сети электропитания необходимо проводить необходимые расчеты.

4. Даже при соблюдении требований ГОСТ по качеству электроэнергии в части гармонических искажений напряжения нормального режима возможно возникновение существенных гармонических искажений в токе ОЗЗ. Таким образом, необходимы дополнительные расчеты процессов при возникновении однофазных замыканий на землю.

5. При возникновении резонансных условий для протекания гармонических искажений тока однофазного замыкания на землю, возможен рост уровня перенапряжений.

6. Существующие технические решения по предотвращению дуговых перенапряжений не позволяют снизить уровень гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю и предотвратить негативные послед-

ствия. Необходима разработка дополнительных технических решений по снижению гармоник в токе ОЗЗ.

## 3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

### 3.1 Принципиальная схема устройства

#### 3.1.1 Общие положения нормативных документов

Основные требования к работе систем компенсации тока замыкания на землю сетей 6–35 кВ и к их настройке прописаны в «Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации» [93].

Настройка дугогасящего реактора должна быть такой, чтобы при замыкании на землю через место повреждения протекал ток, состоящий, в основном, из активной составляющей полного тока замыкания на землю.

Механизм протекания токов при ОЗЗ достаточно подробно рассмотрен в [94,104]. При возникновении однофазного замыкания возникает бросок емкостного тока, который может достигать большой кратности по отношению к установившемуся току «металлического» замыкания на землю. При возникновении замыкания на фазе не в максимум напряжения 50 Гц ток ДГР содержит затухающую апериодическую составляющую (длительность затухания до 5-6 периодов промышленной частоты в зависимости от момента возникновения замыкания), которая, естественно, появляется и в токе ОЗЗ. В нормативных документах вопрос появления апериодической составляющей не рассматривался.

Для выпускавшихся на протяжении многих десятилетий ДГР, имеющих ступенчатое регулирование тока, либо для плунжерных ДГР с плавным регулированием тока, необходимая индуктивность ДГР устанавливается до возникновения ОЗЗ. В момент перед ОЗЗ индуктивность этих ДГР постоянная и не меняется и в процессе ОЗЗ. В связи с этим особых требований к времени выхода на режим компенсации емкостного тока ОЗЗ в ПТЭ не выдвигалось. Большие времена выхода тока ДГР на режим требуемой компенсации увеличивают время существования значительной расстройки компенса-

ции, что приводит к отсутствию положительных действий ДГР. Таким образом, должна осуществляться требуемая компенсация, близкая к резонансной, либо практически мгновенно, либо сразу после переходного процесса после возникновения замыкания.

В 2015 году ПАО «Россети» приступило к формированию четырех документов касающихся вопроса режима заземления нейтрали. В том числе, технических требований к устройствам компенсации тока однофазного замыкания на землю. Согласно разрабатываемым положениям, предъявляются повышенные требования к работе системы компенсации. Система компенсации должна быть настроена в до аварийном режиме с точностью 1%. Время выхода на режим тока компенсации ограничивается одним периодом промышленной частоты.

Для повышения эффективности работы электрических сетей и снижения аварийности в режиме однофазного замыкания на землю необходима разработка интеллектуальной системы компенсации емкостного тока замыкания на землю.

### **3.1.2 Требования к разрабатываемому устройству предотвращения дуговых перенапряжений**

1. Система должна компенсировать емкостный ток 50 Гц однофазного замыкания на землю с точностью не менее 1%. Определение величины тока компенсации должно проходить в нормальном режиме работы сети.
2. Система должна обеспечивать плавное автоматическое регулирование тока компенсации во всем возможном диапазоне емкостного тока сети.
3. В нормальном режиме работы сети система компенсации не должна увеличивать естественную несимметрию сети.
4. При появлении однофазного замыкания на землю ток компенсации не должен иметь аperiodическую составляющую.

5. Система компенсации должна выходить на установившееся значение тока компенсации 50 Гц за один период промышленной частоты.

6. Согласно проведенным исследованиям, на спектральный состав и величину гармонических искажений напрямую влияют параметры сети. Поэтому система компенсации должна определять величину гармонических искажений в сети, обусловленную работой нагрузки и установленного оборудования в режиме однофазного замыкания на землю, для текущей конфигурации сети.

7. Система компенсации не должна создавать гармонических искажений в остаточном токе.

8. Дуга является резкопеременным нелинейным сопротивлением, создающим собственный переменный гармонический спектр. Система компенсации гармонических искажений не должна работать при возникновении дугового замыкания.

9. Компенсация абсолютно всех гармоник может привести к значительному усложнению схемы компенсации, что, в конечном итоге, приведет к снижению надежности устройства. Поэтому должны быть установлены минимальные уровни компенсации высших гармоник.

10. После возникновения однофазного замыкания на землю возможно переключение в кабельной сети. Уровень гармонических искажений существенно зависит от параметров сети, поэтому уровни компенсации высших гармоник должны определяться при каждом новом замыкании на землю.

### **3.1.3 Основные функциональные узлы устройства предотвращения дуговых перенапряжений**

Для реализации указанных требований необходима разработка плавно-регулируемой системы на основе изменения входных электрических параметров (напряжения, частоты). В основе устройства компенсации емкостного

тока замыкания на землю лежит статическая индуктивность с возможностью регулирования питающего напряжения. На рисунке 3.1 представлена функциональная блок-схема.

Система компенсации тока однофазного замыкания на землю подключается своим вводом к нейтральной точке сети. Для этого возможно использовать выведенную нейтраль силового трансформатора или использовать дополнительный нейтралеобразующий трансформатор. Для создания индуктивного тока компенсации используется статическая индуктивность. Регулирование тока компенсации осуществляется частотным преобразователем, который подключается своим вводом к нейтральной точке сети, обеспечивает изменение питающего напряжения статической индуктивности. Вывод частотного преобразователя подключается к вводу статической индуктивности.

Контроллер управления, получая данные о состоянии сети от системы датчиков, формирует управляющие сигналы и подает их согласно внутренней программе на управляющие электроды преобразователя частоты. Для создания управляющих сигналов необходимы данные о напряжении нулевой последовательности, емкостном токе сети 50 Гц, а также о гармонических искажениях в токе однофазного замыкания на землю.

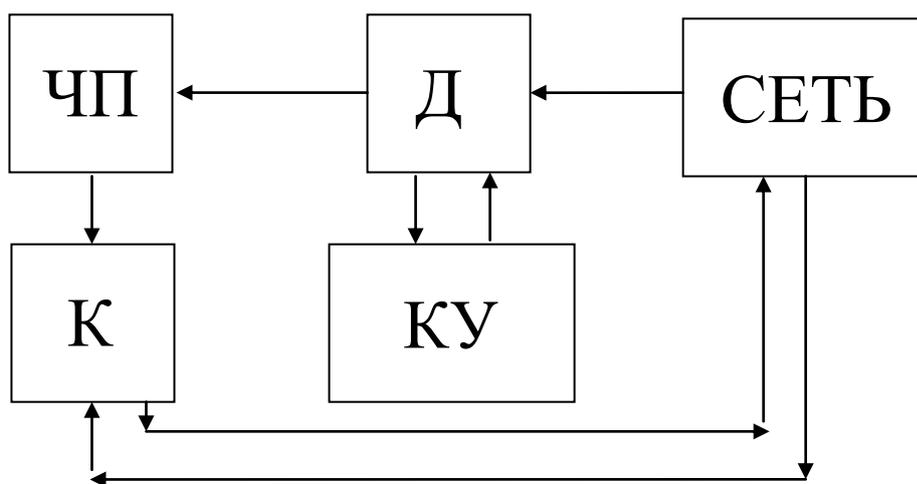


Рисунок 3.1 - Функциональная блок-схема системы компенсации тока однофазного замыкания на землю

На схеме:

ЧП – частотный преобразователь;

К – статическая катушка компенсации;

Д – система датчиков;

КУ – контроллер управления;

СЕТЬ – трехфазная электрическая сеть.

## **3.2 Функциональная схема устройства**

### **3.2.1 Алгоритм работы устройства**

На рисунке 3.2 представлена обобщенная электрическая схема электропитания сети среднего напряжения, в нейтраль которой включена система полной компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю. В схеме присутствуют:

- трехфазную электрическую сеть -1 с изолированной нейтралью-2 и нагрузкой-3;

- схему-4 фиксации состояния фазных проводов трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2, выполненную в виде трансформатора -5 Бауха, подсоединенного своими соответствующими входами (входы схемы -4 фиксации состояния фазных проводов трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2) к соответствующим проводам трехфазной электрической сети-1 и аналого-цифрового преобразователя-6, подсоединенного своим входом к выходу трансформатора-5 Бауха, при этом выход аналого-цифрового преобразователя-6, является выходом схемы -4 фиксации состояния фазных проводов трехфазной электрической сети-1;

- первый-7, второй-8 и третий -9 датчики фиксации гармонических искажений тока нулевой последовательности подсоединенные своими соответствующими входами к соответствующим проводам трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2;

-преобразователь-10 частоты, выполненный в виде диода-11, подсоединенного своим анодом, являющимся первым входом преобразователя-10 частоты, к изолированной нейтрали-2 трехфазной электрической сети-1, тиристора-12, подсоединенного своим анодом к катоду диода-11 и цифроаналогового преобразователя-13, подсоединенного своим выходом к управляющему входу тиристора-12;

-датчик -14 тока нулевой последовательности, выполненный в виде трансформатора -15, подсоединенного одним из выводов первичной обмотки к катоду тиристора-12, (являющимся выходом преобразователя-10 частоты) и аналого-цифрового преобразователя-16, подсоединенного своим входом к одному из выводов вторичной обмотки трансформатора-15, подсоединенному другим своим выводом к корпусу заземления;

-дрессель-17, подсоединенный одним своим выводом к другому выводу первичной обмотки трансформатора -15 и другим своим выводом к корпусу заземления;

-контроллер-18, подсоединенный своим первым входом к выходу схемы-4 фиксации состояния фазных проводов трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2, своим вторым входом к выходу первого датчика -7 фиксации гармонических искажений тока нулевой последовательности, своим третьим входом к выходу второго датчика-8 фиксации гармонических искажений тока нулевой последовательности, своим четвертым входом к выходу третьего датчика-9 фиксации гармонических искажений тока нулевой последовательности, своим пятым входом к выходу аналого-цифрового преобразователя -16, являющимся выходом датчика -14 тока нулевой последовательности, своим шестым входом к выходу узла -19 ввода команд и своим выходом к входу цифроаналогового преобразователя -13, являющимся вторым выходом преобразователя -10 частоты.

Предлагаемое устройство компенсации гармонических искажений работает следующим образом.

Изначально ключи преобразователя частоты, питающего катушку, (на рисунке 3.2 - 10) полностью закрыты. Это условие позволяет исключить резонансное напряжение смещения нейтрали.

До появления однофазного замыкания на землю в трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью, контроллер – 18 согласно записанной в соответствии с программой, записанной в блоке памяти контроллера-18 подает управляющий сигнал через выход 1, на входу цифроаналогового преобразователя -13, запускает процесс изменения частоты естественной несимметрии сети при использовании тиристора-12 при этом фиксируется ток с выхода датчика -14 тока нулевой последовательности через аналого-цифровой преобразователь-16 на пятый вход контроллера-18. В контроллере – 18 определяется резонансная частота между индуктивностью дросселя – 17 и емкостью трехфазной электрической сети – 1 с изолированной нейтралью-2. Контроллер – 18 фиксирует резонансный ток, и в случае возникновения однофазного замыкания на землю в трехфазной электрической сети – 1 с изолированной нейтралью-2, выдает определенный управляющий сигнал на выход 1 на блок цифроаналогового преобразователя-13, подсоединенного к управляющему входу тиристора 12.

Процесс пуска работы системы компенсации (отпирания ключей на определенный в до аварийном режиме уровень) определяется условием записанным в контроллере управления:

$$U_{\text{пуск}} < K_y \cdot U_N,$$

где:  $U_{\text{пуск}}$  – напряжение запуска работы ключей;

$K_y$  – коэффициент чувствительности возникновения замыкания на землю (3-5);

$U_N$  – напряжение несимметрии нормального режима сети;

На время работы системы компенсации тока, уставка тока компенсации 50 Гц фиксируется.

Если в течении длительного времени напряжение на нейтрали не возрастает до заданной величины, система передает сигнал возникновения не-

определенного возмущения. Необходимо установление причин возникновения роста несимметрии.

При появлении однофазного замыкания на землю в трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью, схема -4 фиксации состояния фазных проводов трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью фиксирует их состояние и обеспечивает поступление результата фиксации напряжения на первый вход контроллера-18.

Одновременно с этим первым-7, вторым-8 и третьим-9 датчиками фиксации гармонических искажений тока нулевой последовательности, фиксируются гармонические искажения, которые поступают на второй, третий и четвертый входы контроллера-18.

А поступившее напряжение на первый вход преобразователя частоты-10 с изолированной нейтралью-2 трехфазной электрической сети, после соответствующего преобразования обеспечивает получение на выходе преобразователя-10 частоты напряжения зафиксированной частоты, которое в свою очередь, поступает через датчик-14 тока нулевой последовательности и дроссель-17 на корпус заземления.

Поступившие сигналы на соответствующие входы контроллера-18, а также и с выхода узла-19 ввода команд на шестой вход контроллера-18, в соответствии с программой, записанной в блоке памяти контроллера-18, обрабатываются и на его (первом) выходе формируется сигнал, который поступает на второй вход преобразователя частоты-10, обеспечивая более точный выбор частоты параллельного резонанса, обусловленного индуктивностью дросселя-17 и ёмкостью трехфазной электрической сети – 1 с изолированной нейтралью -2 и, как следствие этому, значительное снижение величины тока замыкания на землю одного из фазных проводов трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2 и более точную и качественную компенсацию гармонических искажений.

При исчезновении замыкания блок управления током компенсации ДГР обнуляет уставки по гармоническому спектру тока. В качестве критерия пропадания замыкания используется условие

$$U_{\text{откл}} < K_y \cdot U_{\text{ф}};$$

где:  $U_{\text{откл}}$  – напряжение отключения работы ключей;

$K_y$  – коэффициент чувствительности возникновения замыкания на землю (0,85-0,5);

$U_{\text{ф}}$  – фазное напряжение нормального режима сети.

В [96] показана возможность возникновения опасных уровней перенапряжений при переходе замыкания в двухфазное короткое замыкание. Поэтому при развитии аварии необходимо отключение системы компенсации до отключения двухфазного замыкания.

Таким образом предлагаемое устройство компенсации гармонических искажений за счет точного выбора частоты последовательного резонанса, обусловленного индуктивностью дросселя-17 и ёмкостного фазного провода трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2, обеспечивает точную и качественную компенсацию гармонических искажений, возникающих в трехфазной электрической сети-1 с изолированной нейтралью-2

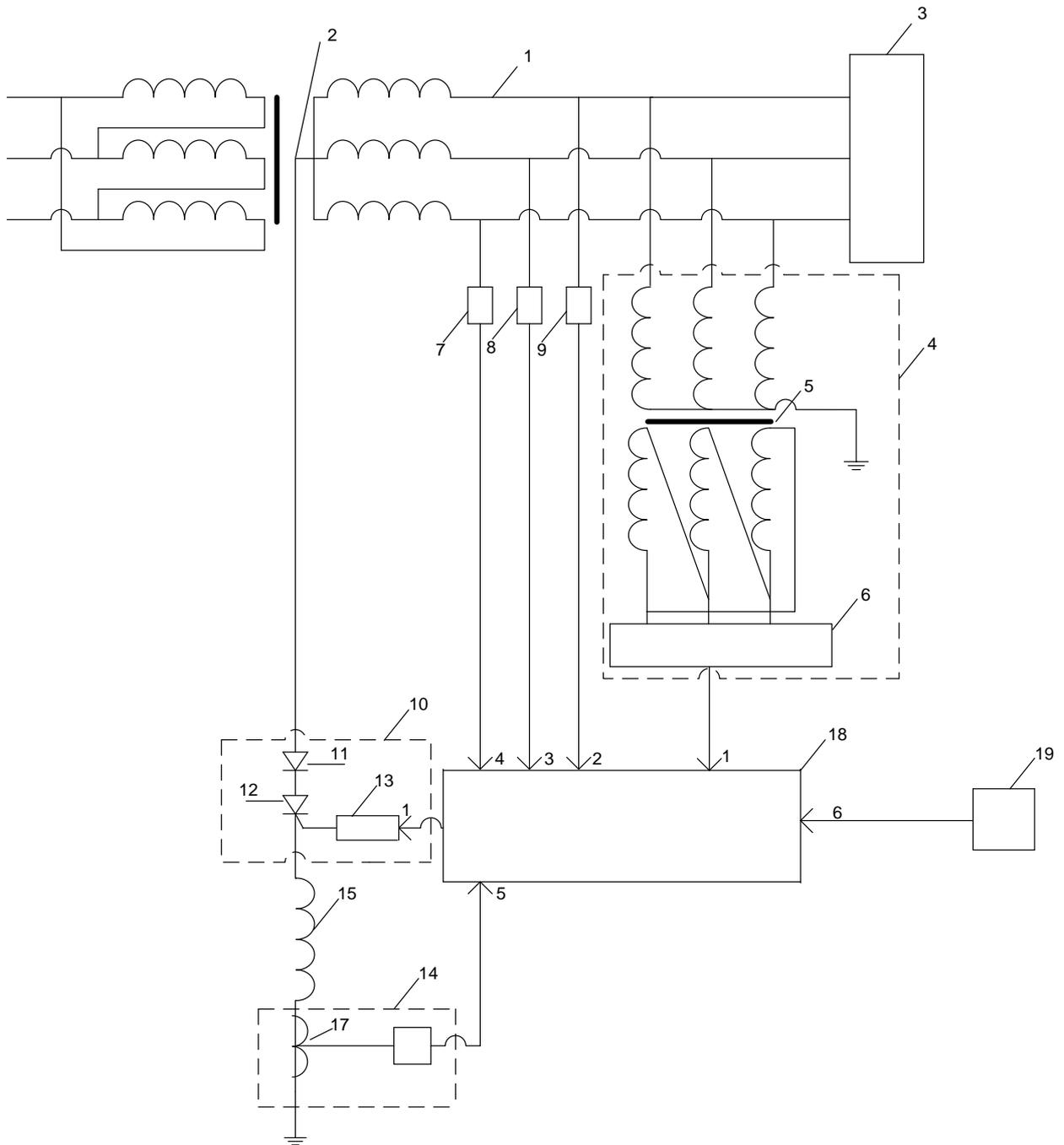


Рисунок 3.2 - Структурная схема устройства полной компенсации емкостного тока замыкания на землю

### 3.2.2 Общая компоновка устройства

#### Частотный преобразователь системы компенсации

Для регулирования входных параметров (частоты и напряжения) статической индуктивности необходимо применение высокочастотной системы регулирования.

Качество работы всей системы зависит от надежности работы системы регулирования. Требования к данному блоку:

1. Обеспечение безинерционного переключения рабочих элементов преобразователя частоты, позволяющее обеспечить требования к скорости выхода тока компенсации.
2. Отсутствие в выходном питающем напряжении высших гармоник не предусмотренных алгоритмом управления.
3. Устойчивость работы рабочих элементов в режиме дугового замыкания.

В настоящее время для выполнения данных требований предполагается применять двух-звеньевую схему управления с использованием промежуточной ступени постоянного тока. В качестве рабочих элементов необходимо использовать высокоскоростные ключи преобразователя.

#### Статическая катушка компенсации

Для создания индуктивного тока компенсации возможно использование обычной статической индуктивности. При полностью открытых ключах преобразователя частоты, индуктивность должна обеспечивать максимальный индуктивный ток.

Однако в случае выхода из строя блока управления, сеть полностью теряет возможность управления током компенсации, что, при любом уровне надежности работы автоматики, недопустимо. Поэтому катушка должна иметь возможность переключения тока отпайками, аналогично системам типа РЗДСОМ. Согласно существующим требованиям, ее вольт-амперная ха-

рактеристика должна быть линейна во всем возможном диапазоне прикладываемого напряжения.

В настоящее время в электрических сетях подавляющее большинство эксплуатируемых катушек - ступенчатые катушки типа ЗРОМ. Таким образом, создаваемая система компенсации имеет возможность модернизации существующих ступенчатых систем типа ЗРОМ в системы с плавным регулированием тока компенсации.

### Датчики состояния сети

Для формирования управляющих сигналов необходимо получение данных о напряжении нулевой последовательности и спектральном составе тока однофазного замыкания на землю.

Напряжение нулевой последовательности возможно получить с трансформатора напряжения типа НТМИ (или его аналога), установленного в сети. Данные передаются через аналогово-цифровой преобразователь на вход контроллера управления.

Для анализа гармонических искажений в токе ОЗЗ в каждую фазу устанавливается емкостной датчик, данные передаются на вход управляющего контроллера, где происходит цифровая обработка сигнала для получения гармонического спектра тока ОЗЗ.

## **3.3 Компьютерная апробация устройства предотвращения дуговых перенапряжений**

### **3.3.1 Основные положения**

Для проверки эффективности работы системы компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю произведены расчетные исследования для наиболее тяжелого случая эксплуатационного уровня.

В качестве расчетного случая принята крупная сеть горно-обогатительного комбината.

### **3.3.2 Расчет эффективности работы устройства предотвращения дуговых перенапряжений**

Распределительная сеть комбината выполнена в виде двух ГПП класса напряжения 6-10 кВ. Каждая ГПП имеет две секции 6 кВ и две секции 10 кВ. Секции шин работают раздельно в режиме. Секции шин 6 кВ ГПП получают питание от трансформатора ТДТН-80000/110 У1 110/10/6 кВ мощностью 80 МВА Ун/Д/Д-11-11.

Сети 6 и 10 кВ ГПП-6 работают в режиме изолированной нейтрали.

Для ограничения токов короткого замыкания на отходящих присоединениях установлены токоограничивающие реакторы типа КСО-6,3-25-2У3.

Значительную часть потребителей составляют нелинейные потребители, в том числе мощные электродвигатели требующие частотно-регулируемого управления. По сети 6 кВ ГПП получают питание двигатели, насосы, компрессоры, землесосы, конвекторы, мельницы, дробилки и другое электрооборудование. Основными источниками высших гармоник для данной сети являются мощные электроприводы мельничных механизмов. От секции шин питаются 4 электропривода мощностью 800 кВт, использующие частотно-регулируемое управление построенное на базе 24-пульсной схемы преобразования.

На рисунке 3.3 показана натурная осциллограмма тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ. Уровни гармонических искажений для данной сети сопоставимы с током промышленной частоты. Результаты гармонического анализа тока ОЗЗ представлены в таблице 3.1. Величина тока 50 Гц однофазного замыкания на землю составляет 20,9 А. В токе присутствует значительное количество гармонических искажений. На частоте 23 гармоники наблюдается значительное усиление гармонических искажений, что ха-

рактенно для сетей с частотными приводами, построенными на базе данной схемы преобразования. Величина тока частоты 115 Гц, составляет 22 А.

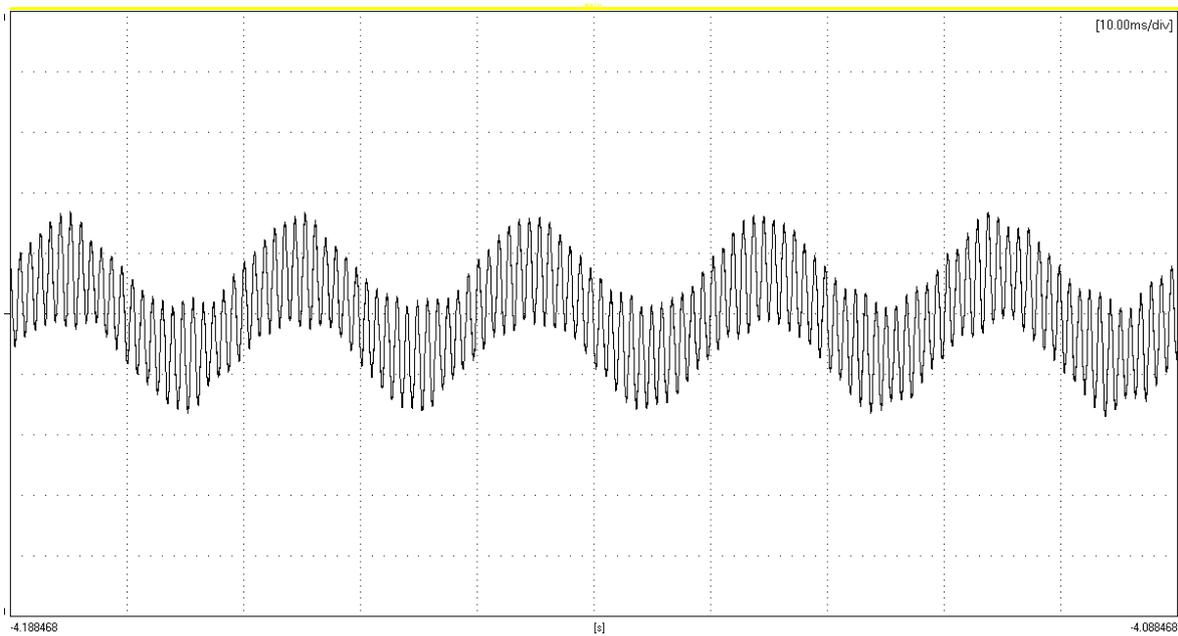


Рисунок 3.3 - Осциллограмма тока ОЗЗ в сети 6 кВ горно-металлургического предприятия, при замыкании фазы «С» на землю (цена деления по оси ординат тока ОЗЗ – 41,15 А)

Таблица 3.1 - Действующие значения гармоник тока ОЗЗ в сети 6 кВ ГПП, полученные в эксперименте «металлического» замыкания на землю

Номер гармоники	$I_c$ , А	$I_c$ , %
<b>1</b>	<b>20,907</b>	<b>100</b>
2	0,124	0,593
3	0,165	0,789
4	0,130	0,622
5	0,323	1,545
6	0,141	0,674
7	0,215	1,028
8	0,156	0,746
9	0,202	0,966
10	0,177	0,847
11	0,299	1,430
12	0,209	1,000
13	0,232	1,110
14	0,259	1,239
15	0,291	1,392
16	0,373	1,784
<b>17</b>	<b>1,355</b>	<b>6,481</b>
18	0,583	2,789
<b>19</b>	<b>1,918</b>	<b>9,173</b>
20	0,588	2,812
<b>21</b>	<b>1,463</b>	<b>6,997</b>
<b>22</b>	<b>2,319</b>	<b>11,092</b>
<b>23</b>	<b>21,996</b>	<b>105,209</b>
<b>24</b>	<b>2,123</b>	<b>10,154</b>
<b>25</b>	<b>1,358</b>	<b>6,495</b>
26	0,550	2,631
27	0,492	2,353
28	0,395	1,889
29	0,308	1,473
30	0,282	1,349
31	0,528	2,525
32	0,223	1,067
33	0,200	0,957
34	0,182	0,871
35	0,184	0,880
36	0,153	0,732
37	0,203	0,971
38	0,135	0,646
39	0,126	0,603
40	0,129	0,617
$I_{\text{действ.2-40}}$	22,498	107,606

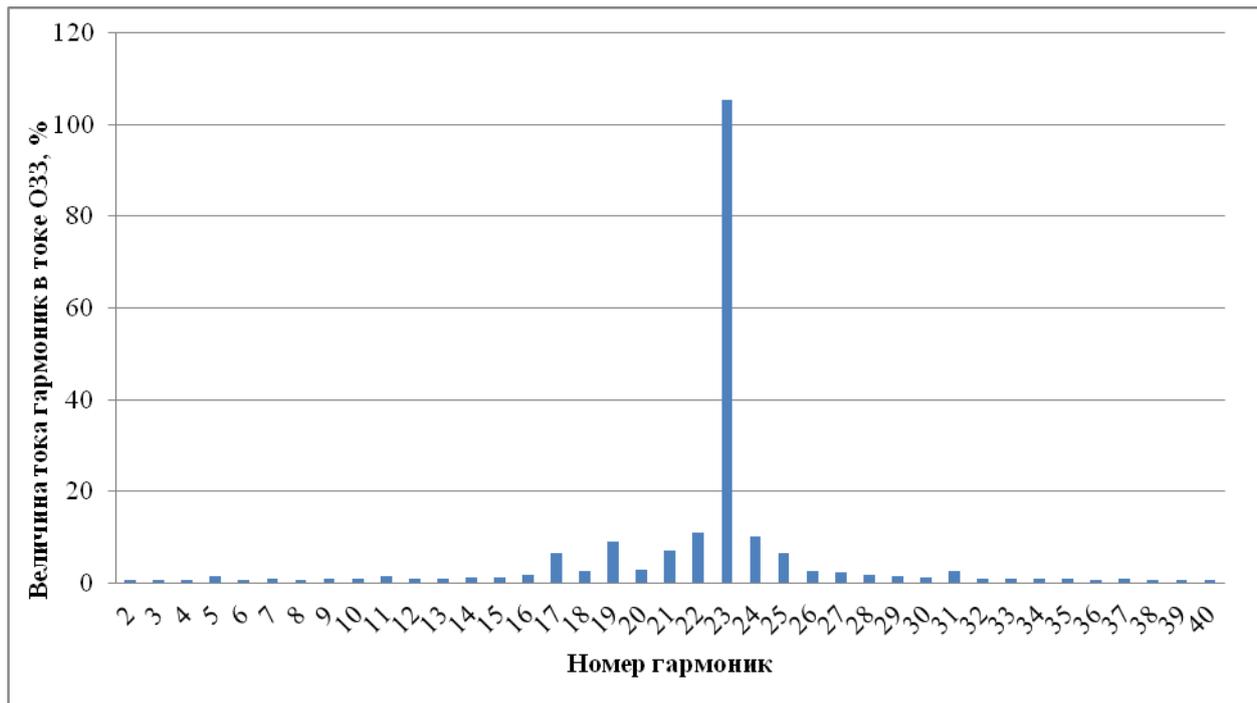
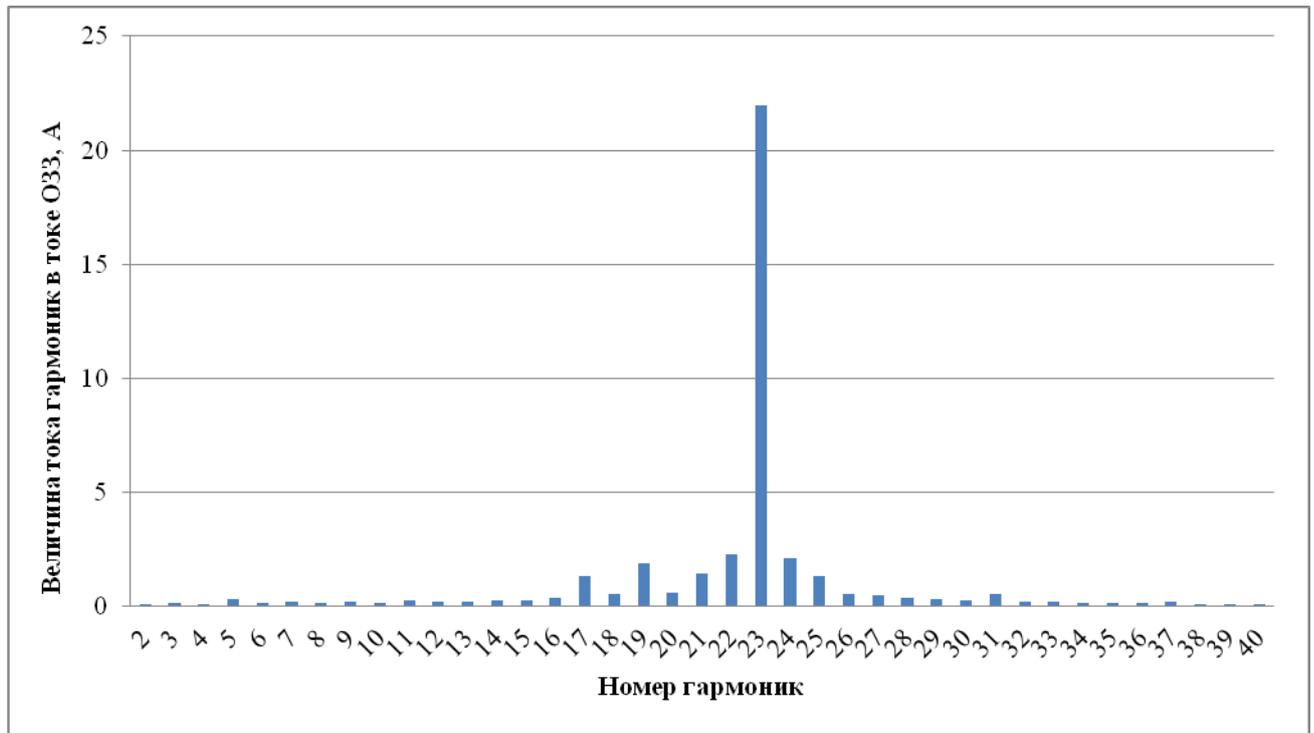


Рисунок 3.4 - Усреднённые действующие значения гармоник тока ОЗЗ и доли гармонических составляющих от тока ОЗЗ промышленной частоты (начиная со 2-й) в сети 6 кВ горно-металлургического предприятия. Первая гармоника составляет 20,91 А

Для создания рабочей модели системы полной компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю необходимо использование вычислительных (математических) аппаратов и сложных логических связей. Поэтому целесообразно перенести моделирование в среду с более широким, по сравнению с комплексом ЕМТР, набором требуемых инструментов.

Дальнейшие расчеты проводились в программном продукте Ansys, а именно, в программе Simplorer. Данная программа предназначена для комплексного системного моделирования. В частности, данная программа достаточно успешно используется для проектирования автоматизированных систем.

Целью моделирования является уточнение схемы и алгоритма работы разрабатываемой системы компенсации в рабочей сети на примере секции шин 6 кВ горно-металлургического предприятия.

Модель включает в себя:

- модели эквивалентного источника питания;
- модели питающих трансформаторов;
- модель электрической сети с параметрами, эквивалентными полученным в процессе измерений;
- модели ТН;
- модели токоограничивающих реакторов;
- модели нагрузок;
- модель частотно-регулируемых приводов.

В результате проведения расчетов получена расчетная осциллограмма тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ (рисунок 3.5). Ее гармонический состав приведен в таблице 3.2. Для иллюстрации спектра тока ОЗЗ построена гистограмма – рисунок 3.6.

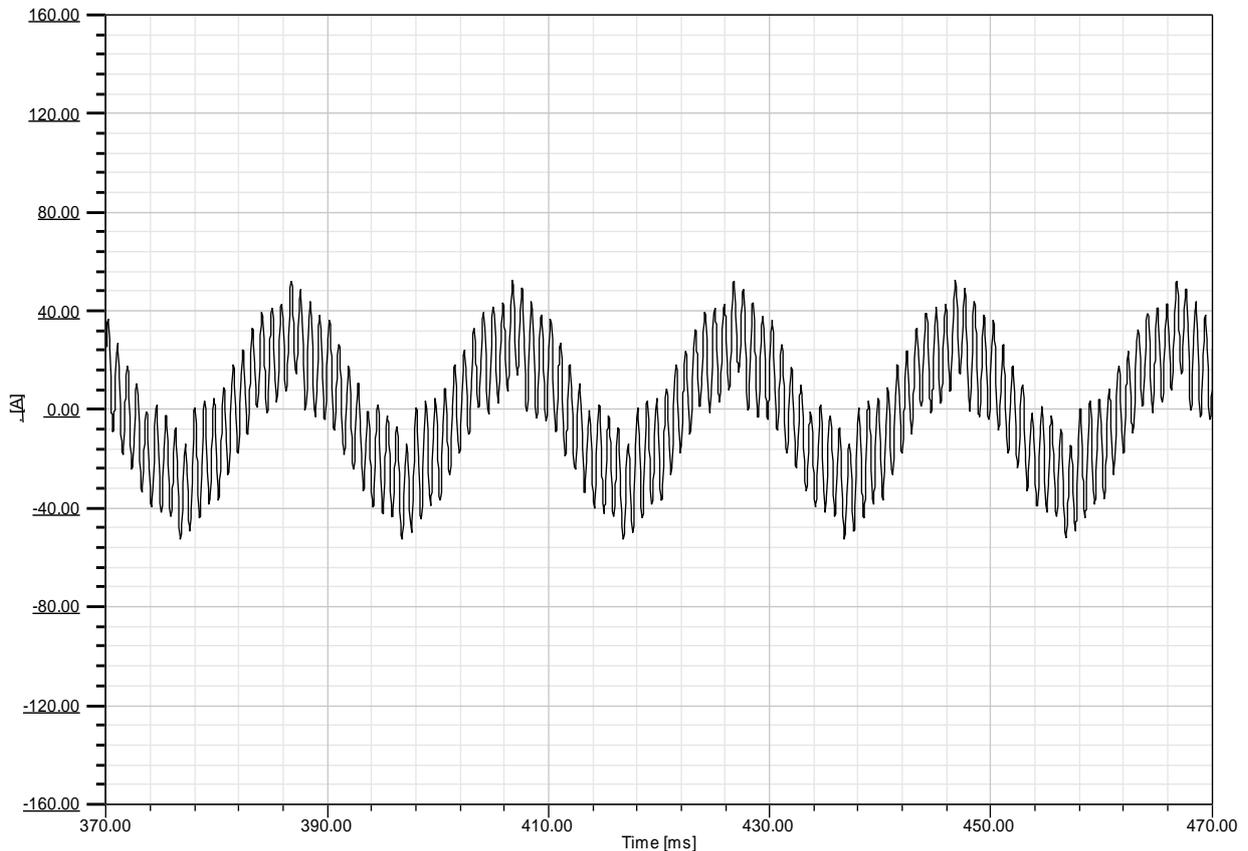


Рисунок 3.5 - Расчетная осциллограмма тока ОЗЗ в сети 6 кВ горно-металлургического предприятия, нейтраль сети изолирована

В расчетной модели емкостный ток замыкания на землю составляет 19,63 А. Гармонический состав насыщен высшими гармониками. Как видно из рисунка 3.5, на частоте 1150 Гц гармоники происходит резонансное усиление гармонических искажений. Основную часть гармонических искажений вносит 23 гармоника, что соотносится с результатами опыта. Сопоставление таблиц 3.1 и 3.2 позволяет оценить соответствие гармонических искажений на частотах основных гармонических искажений – 17, 19, 23 гармоники.

Точность совпадения гармонического состава по отношению к экспериментальным данным на резонансной частоте составляет 4,4%. Что допустимо для данного расчета.

Таблица 3.2 - Расчетные действующие значения гармоник тока ОЗЗ и доли гармонических составляющих от тока ОЗЗ промышленной частоты в сети 6 кВ

Номер гармоники	$I_c$ , А	$I_c$ , %
<b>1</b>	<b>19,63</b>	<b>100</b>
2	0,002	0,013
3	0,23	0,917
4	0,002	0,035
5	0,373	1,402
6	0,002	0,035
7	0,304	1,055
8	0,001	0,056
9	1,303	6,631
10	0,002	0,007
11	0,605	2,693
12	0,002	0,007
13	0,736	3,965
14	0,003	0,097
15	0,652	3,259
16	0,003	0,013
<b>17</b>	<b>1,119</b>	<b>4,075</b>
18	0,005	0,018
<b>19</b>	<b>1,146</b>	<b>4,584</b>
20	0,009	0,026
<b>21</b>	<b>1,882</b>	<b>6,126</b>
<b>22</b>	<b>0,03</b>	<b>0,049</b>
<b>23</b>	<b>20,99</b>	<b>117,176</b>
<b>24</b>	<b>0,019</b>	<b>0,131</b>
<b>25</b>	<b>1,717</b>	<b>12,813</b>
26	0,007	0,164
27	0,55	8,991
28	0,003	0,053
29	0,584	4,8
30	0,002	0,032
31	0,407	2,762
32	0,003	0,024
33	0,16	1,344
34	0,002	0,019
35	0,226	1,468
36	0,001	0,015
37	0,177	0,896
38	0,001	0,013
39	0,094	0,531
40	0,001	0,012
$I_{\text{действ.2-40}}$	23,353	119,028

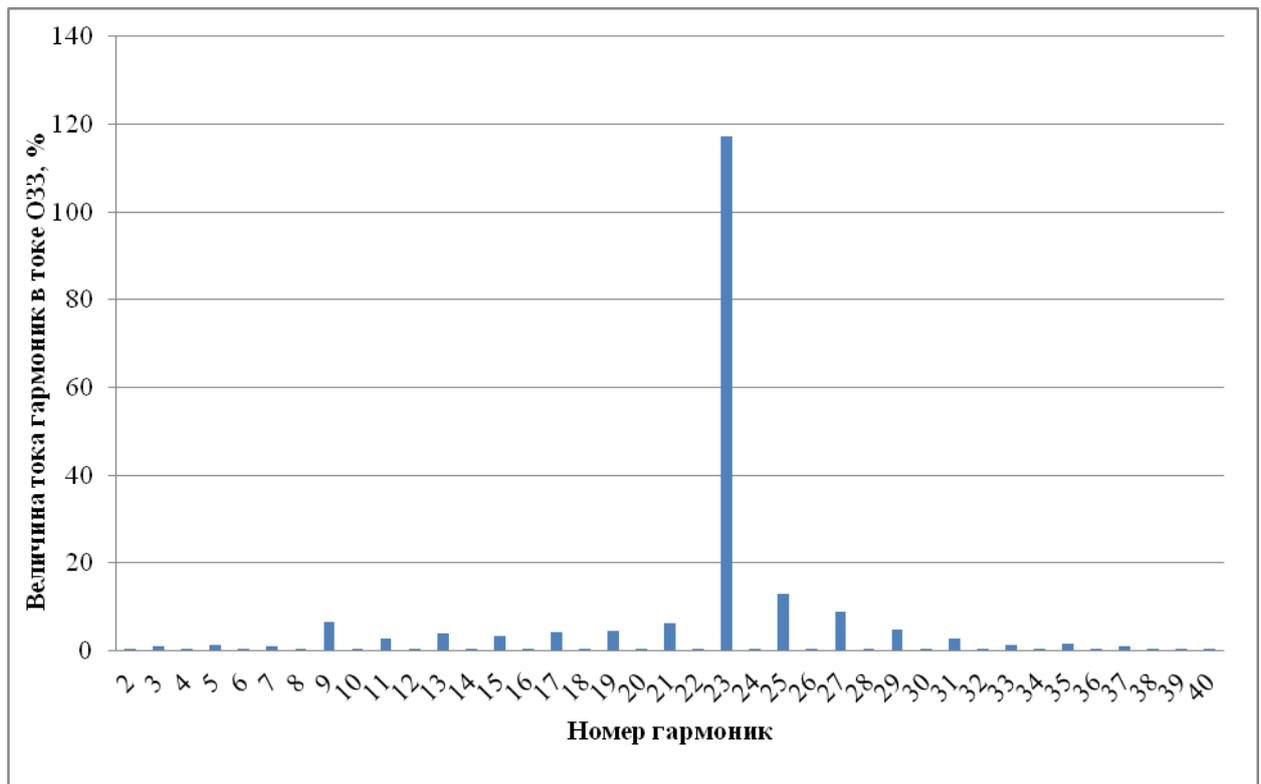
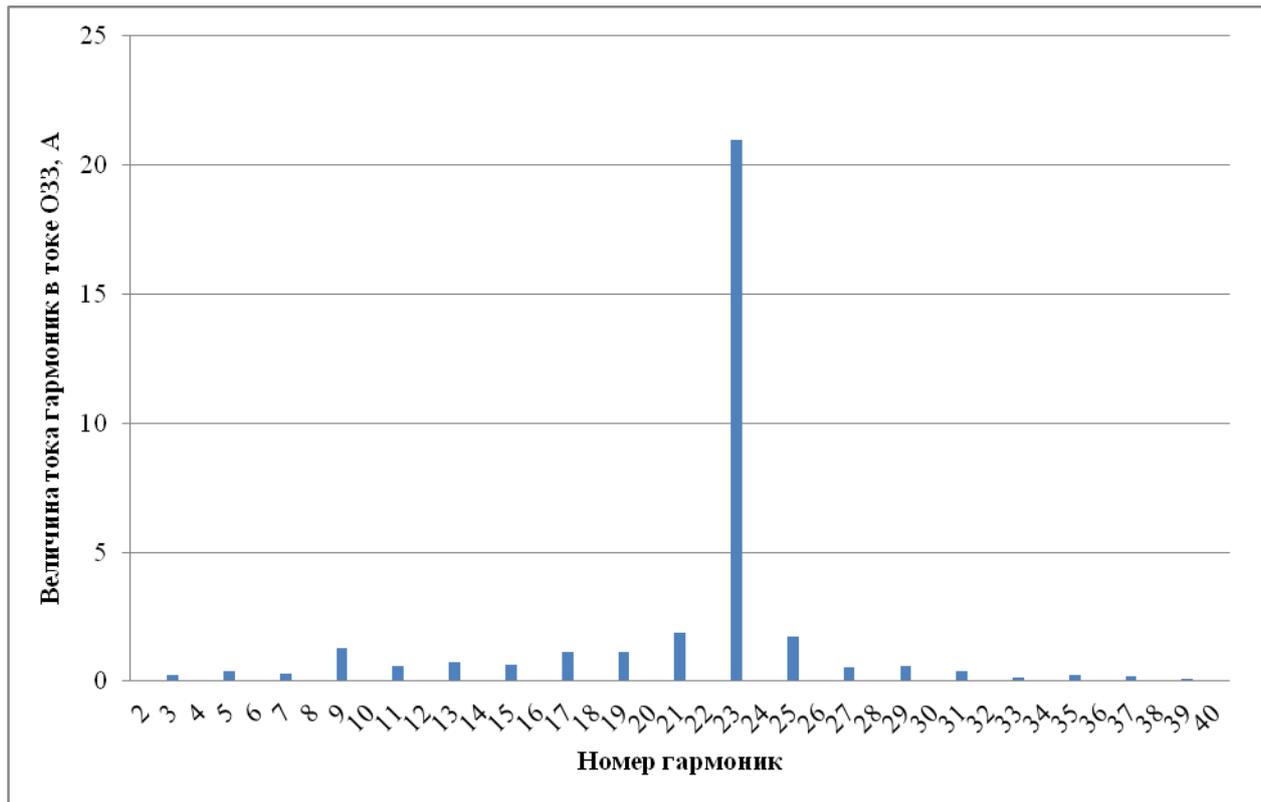


Рисунок 3.6 - Расчеты усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от тока ОЗЗ промышленной частоты (начиная со 2-й) при изолированной нейтрали для сети 6 кВ

На рисунке 3.7 показана логическая схема работы устройства компенсации тока гармонических искажений, приняты следующие обозначения:

$U_0$  – напряжение нулевой последовательности;

$ACDU_0$  – аналого-цифровой преобразователь напряжения нулевой последовательности;

IF1 – логическое условие устойчивости замыкания на землю;

ПЗУ1 – уставка величины напряжения условия устойчивости замыкания на землю;

CLOCK – счетчик времени;

IF2 – логическое условие устойчивости замыкания на землю;

ПЗУ2 – временная уставка условия устойчивости замыкания на землю;

I<sub>фа</sub>, I<sub>фв</sub>, I<sub>фс</sub> – токи через датчики величин гармонических искажений тока;

$ACDI_{\text{фа}}$ ,  $ACDI_{\text{фв}}$ ,  $ACDI_{\text{фс}}$  – аналого-цифровой преобразователь токов через датчики;

IF3, IF4, IF5 - логические условия запуска работы системы компенсации токов гармонических искажений;

FFT1, FFT2, FFT3 – преобразования фурье величин гармонических искажений тока;

IF6, IF7, IF8 - логические условия определения значимых гармонических искажений в токе ОЗЗ;

ПЗУ3, ПЗУ4, ПЗУ5 – уставки величин гармонических искажений в токе ОЗЗ;

ПЗУ6 – выходная таблица гармонических искажений в токе ОЗЗ;

DCAS – цифро-аналоговый преобразователь управляющего сигнала транзистора, управляющего питающим напряжением системы компенсации;

I<sub>gbt1</sub> – транзистор, управляющий питающим напряжением системы компенсации;

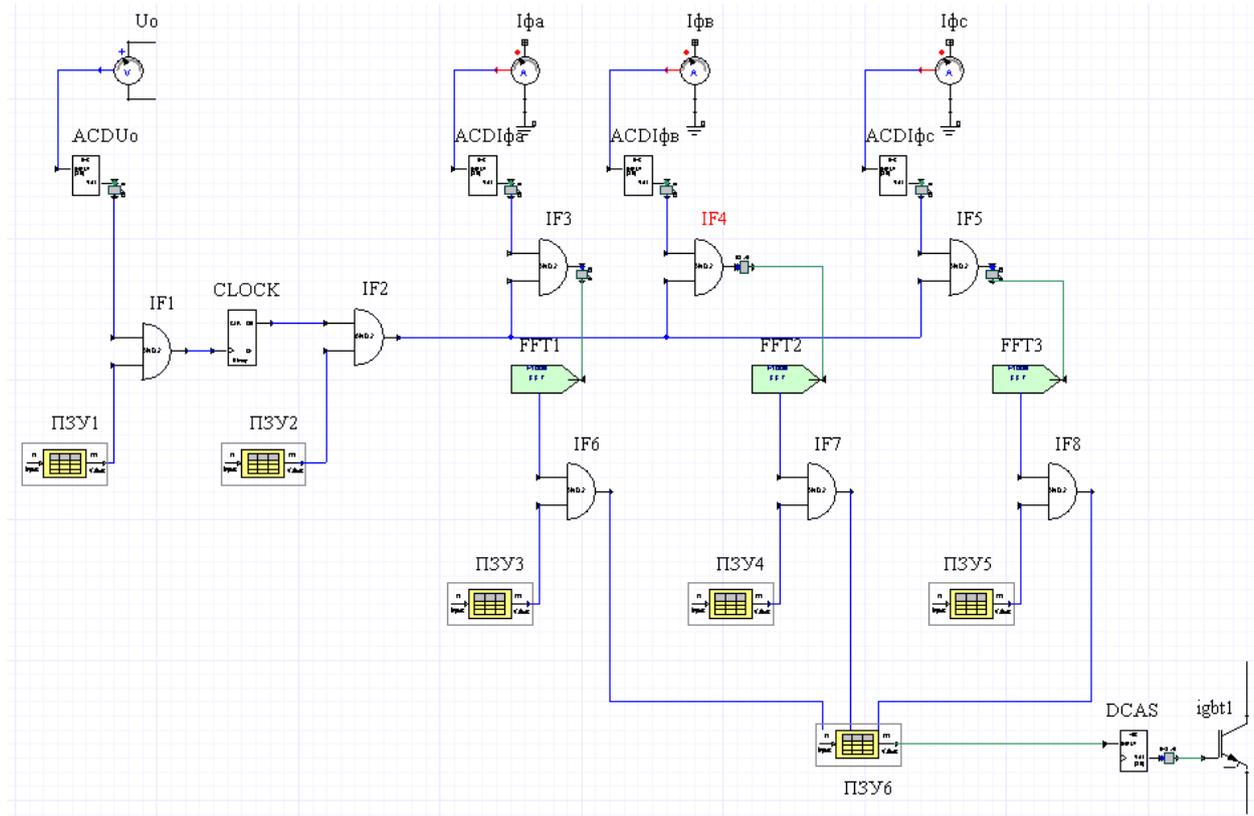
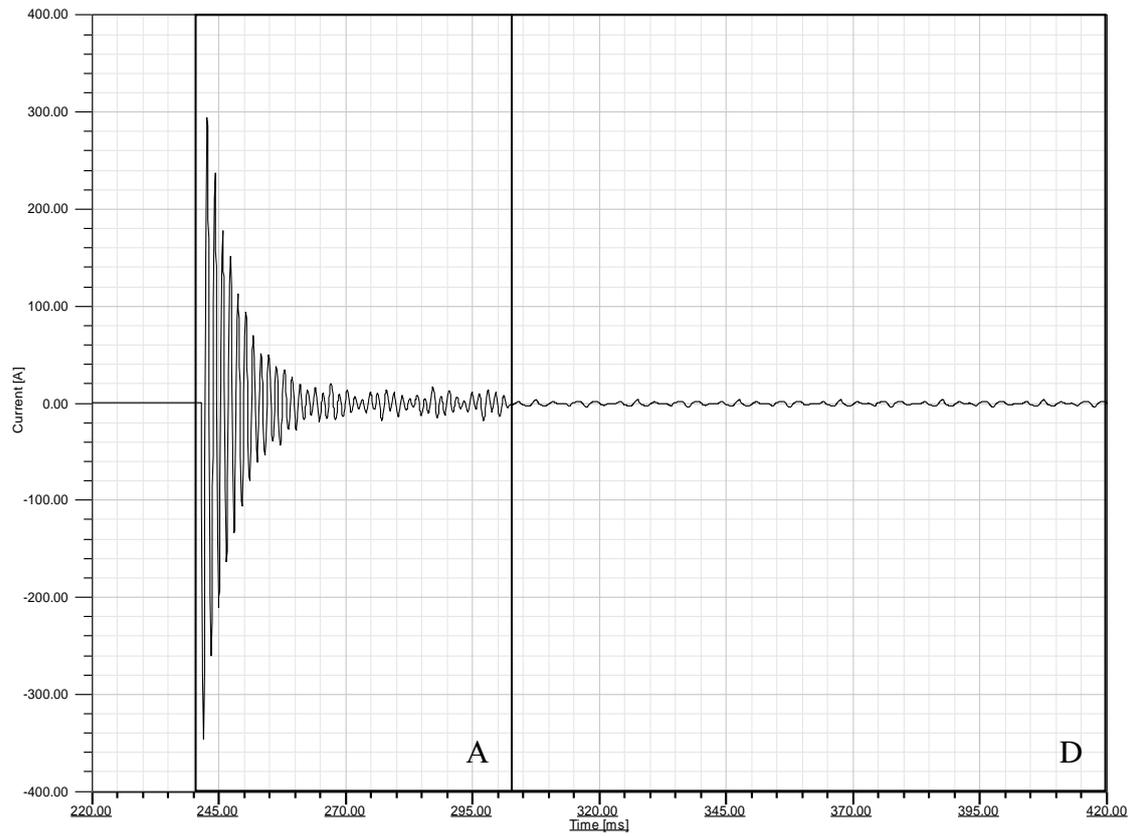


Рисунок 3.7 - Логическая схема работы системы компенсации тока замыкания на землю

Сигнал с датчика  $U_0$  попадает на аналого-цифровой преобразователь. После сравнивается с условием превышения уставки напряжения нулевой последовательности нормального режима. В случае выполнения условия, запускается компенсация тока по основной частоте – ключи переходят в «рабочее» положение, и начинает работать условие устойчивости замыкания на землю. Если замыкание на землю оказалось устойчивым, блоки преобразования Фурье получают данные о токе емкостных датчиков, через соответствующие аналого-цифровые преобразователи. Обработанные сигналы гармонических искажений сравниваются с условиями уставок. Результаты передаются в контроллер, где формируется выходной сигнал для управления ключами преобразователя, который через цифро-аналоговый преобразователь передает его на формирующий выходное напряжение транзистор.

На рисунке 3.8 показана осциллограмма остаточного тока однофазного замыкания на землю в сети при работе системы полной компенсации тока однофазного замыкания на землю.

На фрагменте А, рисунка 3.8 происходит настройка системы полной компенсации тока однофазного замыкания на землю. Рассмотрим подробнее этот фрагмент (рисунок 3.8, фрагмент А укрупнено). На фрагменте В, рисунка 3.8, происходит выход тока компенсации 50 Гц на установившееся значение. За 20 мс, величина тока замыкания на землю снижается до величины 0,15 А, что составляет 0,7% от полной величины тока замыкания на землю. Скорости выхода системы компенсации и точность удовлетворяют разработаемым техническим требованиям. Далее происходит замер и усреднение величин гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю. В это время через место замыкания протекают только гармонические искажения тока.



укрупнено фрагмент А

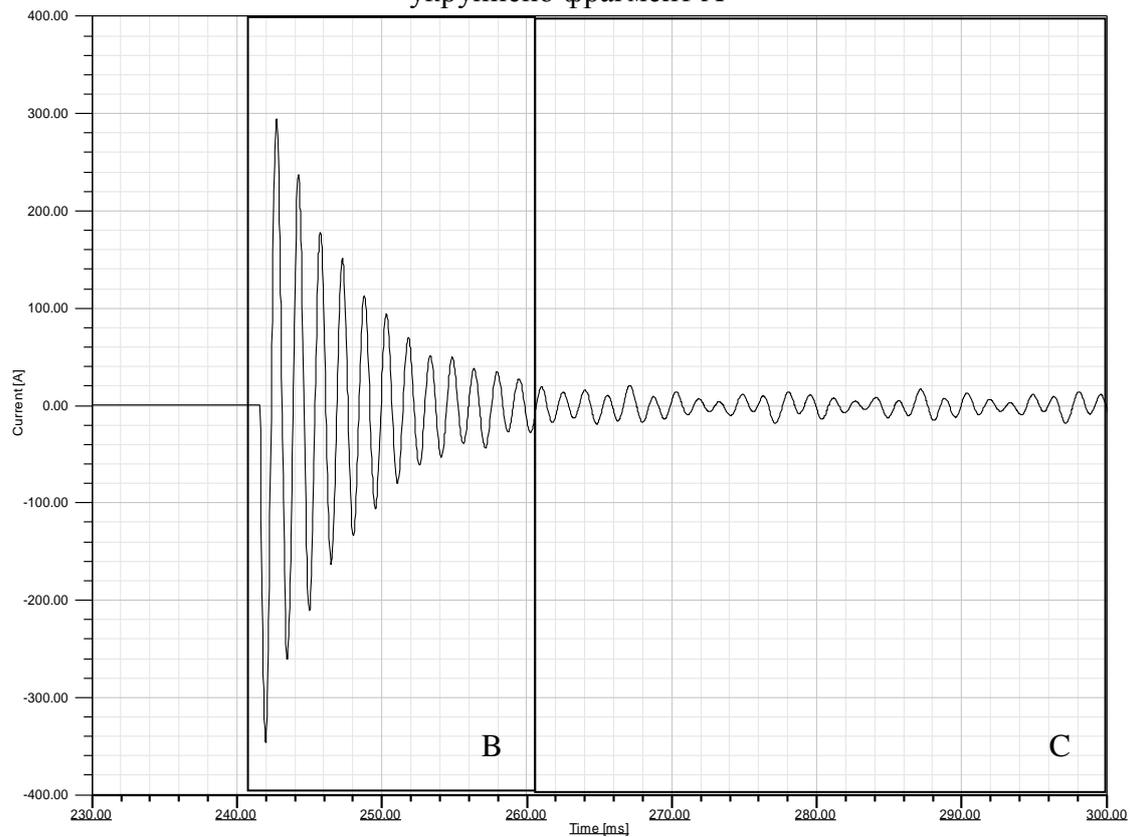


Рисунок 3.8 - Расчетная осциллограмма остаточного тока ОЗЗ в сети 6 кВ горно-металлургического предприятия, при замыкании фазы на землю. В нейтраль сети включена система плавной полной компенсации



Таблица 3.3 - Действующие значения гармоник остаточного тока ОЗЗ и доли гармонических составляющих от тока промышленной частоты в сети 6 кВ

Номер гармоники	$I_c$ , А	$I_c$ , %
1	0,146	100,00
2	0,002	1,37
3	0,057	39,04
4	0,006	4,11
5	1,28	876,71
6	0,006	4,11
7	1,138	779,45
8	0,011	7,53
9	0,082	56,16
10	0,014	9,59
11	0,346	236,99
12	0,001	0,68
13	0,073	50,00
14	0,002	1,37
15	0,036	24,66
16	0,003	2,05
17	0,107	73,29
18	0,004	2,74
19	0,065	44,52
20	0,005	3,42
21	0,198	135,62
22	0,01	6,85
23	0,0944	64,66
24	0,026	17,81
25	0,0759	51,99
26	0,032	21,92
27	0,077	52,74
28	0,01	6,85
29	0,041	28,08
30	0,006	4,11
31	0,021	14,38
32	0,005	3,42
33	0,018	12,33
34	0,004	2,74
35	0,439	300,68
36	0,003	2,05
37	0,021	14,38
38	0,003	2,05
39	0,0212	14,52
40	0,002	1,37
$I_{\text{действ.2-40}}$	1,829	-

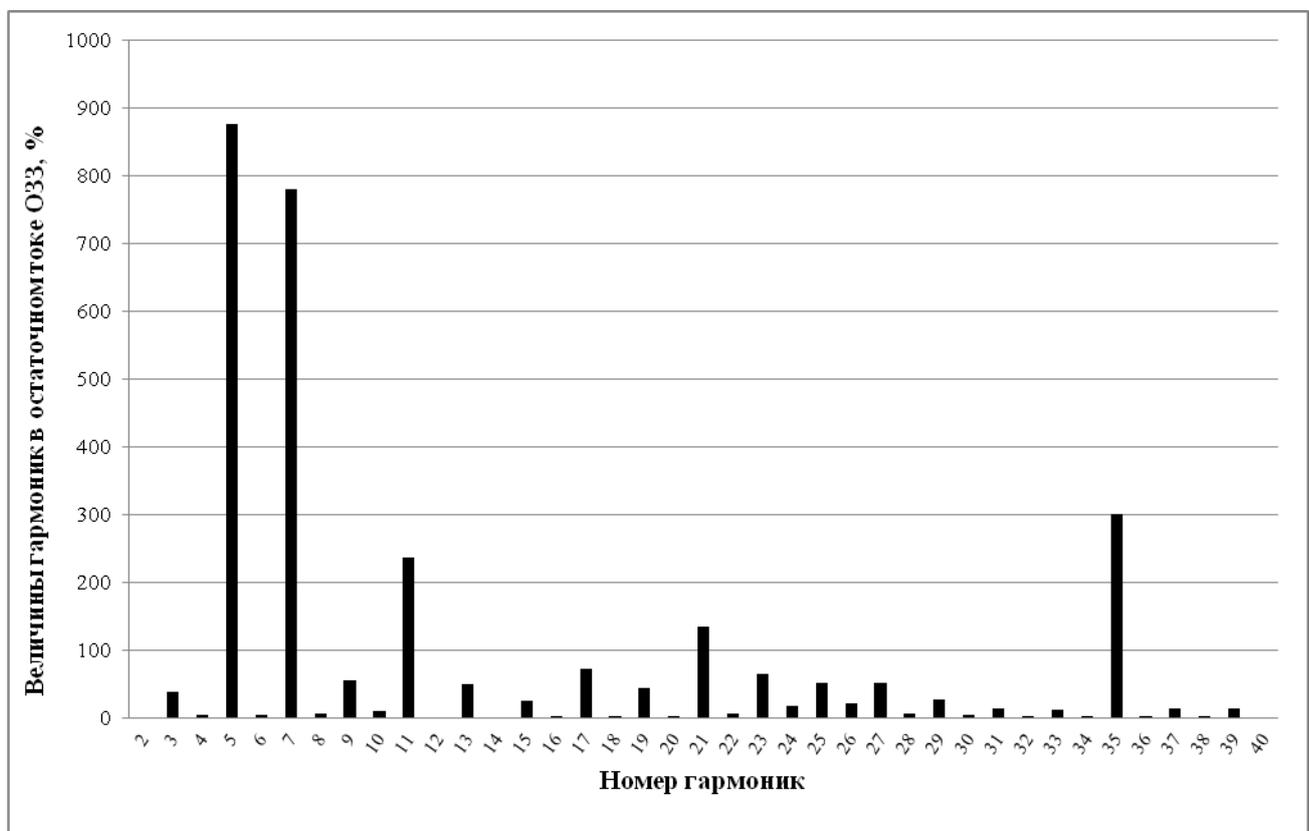
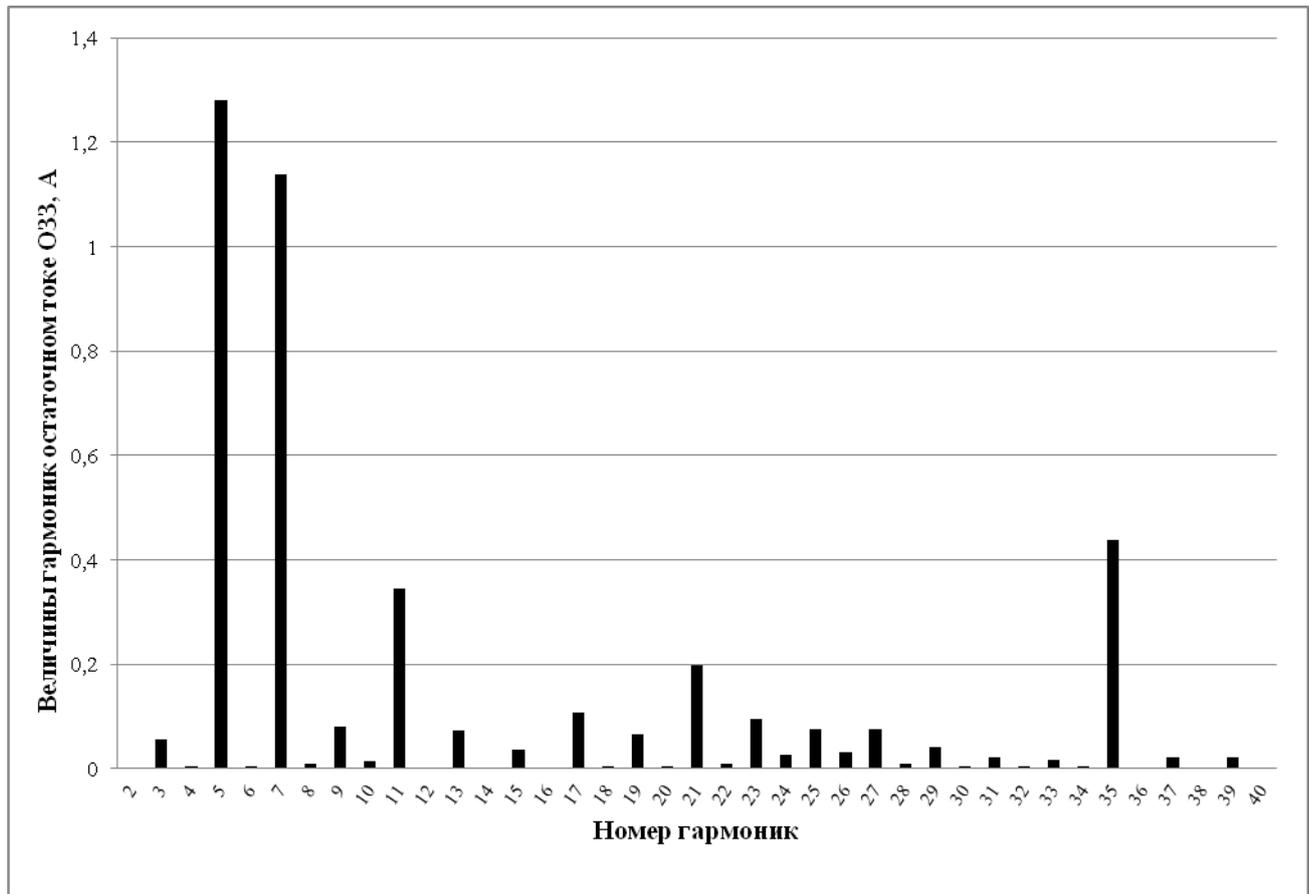


Рисунок 3.10 - Расчетные усредненные действующие значения и доли гармонических составляющих от тока O33 промышленной частоты (начиная со 2-й) при компенсированной в резонанс нейтрали для сети 6 кВ

В результате проведенного расчета можно отметить следующее:

- система компенсации настраивается за один период промышленной частоты с точностью более 1 %;
- в токе замыкания на землю отсутствует апериодическая составляющая;
- точность компенсации высших гармоник по общему коэффициенту гармонических искажений составляет 7,7%, что обеспечивает допустимый уровень гармонических искажений в остаточном токе замыкания на землю.

Таким образом, разработанная модель является эффективным техническим решением полной компенсации емкостного тока замыкания на землю.

### **3.4 Экономическая эффективность разработки устройства предотвращения дуговых перенапряжений**

В результате проведенных исследований и создания функциональной модели разработана расчётная физико-математическая модель системы плавной компенсации емкостного тока однофазного замыкания на землю: как составляющей 50 Гц, так и гармонических искажений.

В связи с тем что речь идет о проекте технического решения, сложно говорить об одной из основных составляющих оценки экономической эффективности – о капитальных затратах на производство данного устройства. Поэтому данный расчет экономической эффективности имеет погрешность.

Зададимся условными данными по стоимости необходимого оборудования. Система состоит из следующих основных технических узлов:

- индуктивность компенсации;
- преобразователь частоты;
- система управления;
- датчики тока и напряжения;
- комплекты адаптации.

Расчет произведем для системы компенсации 6 кВ мощностью 500 кВа.

Катушка компенсации – для оценки примем стоимость **500 тыс.рублей**. Производство РФ.

Преобразователь частоты – требуется однофазный преобразователь частоты. Данные весьма варьируются от параметров, примем ориентировочную стоимость **900 тыс.рублей**. Производство РФ.

Система управления – предполагается использовать достаточно простой блок на одном контроллере. Предполагаемая стоимость **150 тыс. рублей**. Производство Китай.

Датчики тока и напряжения – датчик напряжения нулевой последовательности установлен в сети, потребуется дополнительная установка датчиков тока. **100 тыс.рублей**.

Комплекты адаптации – для подключения вторичных цепей и монтажа – примем 15% от стоимости установки.

Итого: **1897,5 тыс.рублей**

В процессе оценочного расчета примем стоимость монтажа и обучения персонала равными для разных видов катушек.

Эксплуатационные издержки могут быть связаны только с использованием маломощного генератора и цепей питания систем управления. Примем мощность потерь холостого хода 2,5 кВт. Итого за год:

$$\Delta И = 2,5 * 8760 = 21,9 \text{ тыс.рублей}$$

Эффект внедрения системы плавной компенсации по отношению к эксплуатации других систем заземления нейтрали.

Абсолютно очевидным кажется факт того, что эффективность работы систем компенсации тока замыкания 50 Гц ниже, так как они не могут компенсировать токи гармоник и имеют другие, и создают другие негативные явления, а значит вероятность ликвидации аварии становится ниже. Однако, **приведем сравнение экономических показателей:**

Катушка аналогичной мощности типа РДМР и система управления производства ООО «НПП Бреслер» составляет **2205 тыс. рублей.**

Таким образом, стоимость аналогичной по мощности (и безусловно надежной) системы компенсации тока однофазного замыкания на землю 50 Гц сопоставима со стоимостью разрабатываемого устройства.

Следует отдельно отметить, что данное устройство имеет возможность работать с уже существующими ступенчатыми катушками компенсации, переводя сеть из режима ручной ступенчатой компенсации к автоматизированной системе автоматической настройки, что позволит существенно снизить затраты на модернизацию сети.

### **3.5 Выводы по третьей главе**

1. Согласно проведенным исследованиям, обобщен опыт эксплуатации устройств подавления дуговых перенапряжений, разработаны технические требования к разрабатываемому устройству. Сформулированы основные положения по компоновке и эксплуатации системы.
2. Разработанное техническое решение по предотвращению дуговых перенапряжений обладает рядом существенных преимуществ, которые позволяют эффективно бороться с перенапряжениями. Управление электрическими параметрами катушки позволяет обеспечить наибольшее быстродействие работы системы. В связи с отсутствием апериодического броска тока компенсации устройство действует с первого момента возникновения замыкания. Разработанное устройство не приводит к резонансному увеличению напряжения на нейтрали сети.
3. Проведенная компьютерная апробация показала соответствие модели разработанного технического решения высоким требованиям разрабатываемых нормативных документов. Позволяет эффективно снижать уровни гармони-

ческих искажений в токе ОЗЗ до допустимых уровней и предотвращать дуговые перенапряжения.

4. Проведенные исследования показывают экономическую эффективность внедрения данного технического решения. Разработанная система может быть использована для модернизации существующих ступенчатых систем заземления нейтрали, после проведения необходимых электрических испытаний эксплуатируемых катушек.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализированы особенности процессов в сети предприятий с нагрузкой работающей в режиме многократных коммутаций при возникновении однофазных замыканий на землю. Исследования показывают рост гармонических искажений в напряжении нормального режима, что отражается на величине гармонических искажений в токе однофазного замыкания на землю. По данным многолетних экспериментальных замеров емкостного тока в сетях среднего класса напряжения городского и промышленного назначения, в 54% объектов сети 6-10 кВ и 37,5% объектов 35 кВ содержатся токи гармоник, что приводит к невозможности предотвращения дуговых перенапряжений.
2. Подробно рассмотрены физические аспекты возникновения гармонических искажений в токе замыкания на землю. На основании экспериментальных исследований и теоретических расчетов установлено, что гармонические искажения являются следствием переходных процессов работы нагрузки в режиме многократных коммутаций, а, значит, могут менять свою частоту и амплитуду в зависимости от ряда факторов, в том числе, от параметров контура протекания.
3. Приведенные данные показывают, что даже при соблюдении требований ГОСТ по качеству электроэнергии в части гармонических искажений напряжения нормального режима, возможно возникновение существенных гармонических искажений в токе ОЗЗ. При этом зафиксировано увеличение перенапряжений до уровня  $2,6 \cdot U_{\text{фmax}}$  на резонансной частоте контура.
4. В работе обобщен опыт эксплуатации устройств предотвращения дуговых перенапряжений. Показаны наличие существенных недостатков большинства систем, требующих дополнительных доработок, к таковым можно отнести: наличие аperiodической составляющей в токе компенсации, резонансное увеличение напряжения смещения нейтрали в нормальном режиме, низкую точность настройки и длительный выход на установившийся режим

тока компенсации. Показано, что подавляющее большинство эксплуатируемых устройств предотвращения дуговых перенапряжений при несинусоидальности тока ОЗЗ не способствуют в полной мере подавлению дуговых перенапряжений.

5. Показана ограниченная область применения существующих мер по предотвращению дуговых перенапряжений гармонических искажений в токе ОЗЗ: резистор в нейтрали сети, применение пассивных и активных фильтров, в связи с невозможностью снижения несинусоидальности тока замыкания на землю. Разработаны технические требования к разрабатываемому устройству предотвращения дуговых перенапряжений, сформулированы основные положения по компоновке и эксплуатации системы. Предлагаемое техническое решение предотвращения дуговых перенапряжений обладает лучшими эксплуатационными характеристиками: управление электрическими параметрами катушки позволяет обеспечить наибольшее быстродействие работы системы; отсутствие апериодического броска тока компенсации; установка разрабатываемой системы компенсации не приводит к появлению резонансных перенапряжений; устройство позволяет компенсировать полностью емкостную составляющую тока замыкания на землю, что предотвратит дуговые перенапряжения.

В настоящее время проведено опытное внедрение установки полной компенсации в сети 6 кВ ПС «Кировская». Акты внедрения от производителя устройства и эксплуатирующей организации приведены в Приложении А.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. - 176 с.
2. РД 05-334-99. Нормы безопасности на электроустановки угольных разрезов и требования по их безопасной эксплуатации. – М.: ВостНИИ, 1999. – 52с.
3. Карташев, И.И. Системный подход к управлению качеством электрической энергии / И.И. Карташев, Д.С. Подольский // Электричество. – 2009. – № 5. – С. 2–7.
4. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; введ. 01.01.99. – Мн.: Стандарты, 1998. -31 с.
5. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2012. - 19с.
6. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 14 с.
7. Дударев, Л.Е. Подавление феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью / Л.Е. Дударев, Эль-Хатиб Аднан // Электрические станции. – 1993. – № 10. – С. 36-39.
8. Евдокунин, Г.А. Феррорезонансные перенапряжения при несимметричных включениях силовых трансформаторов 6–10 кВ / Г.А. Евдокунин, С. С. Титенков // Изв. Академии наук, «Энергетика». – 2001. – № 6. – С. 67–76.
9. Саенко, Ю. Л. Исследование влияния режима нейтрали на повреждаемость измерительных трансформаторов напряжения / Ю.Л. Саенко, А.С. Попов. // Праці луганського відділення Міжнародної Академії інформації. – Луганськ:СНУ ім. Даля. – 2011. – №3(25). – С. 112-116.

10. ГОСТ 1983-2001. Межгосударственный стандарт Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. Взамен ГОСТ 1983-89; введ. 01.01.03. – Мн.: Стандарты, 2002. -31 с.
11. Эткинд, Л.Л. Защита трансформаторов напряжения в сетях 3-35 кВ. Необходимо изменить режим заземления нейтрали / Л.Л. Эткинд // Новости ЭлектроТехники. – 2003. - №5(23). – Режим доступа к журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/06.php> 132 - статья в интернете.
12. Назаров, В.В. О режимах нейтрали в сетях 6-35 кВ. // Промышленная энергетика. – 1993. - №6. - с.33-36.
13. Бродовский, В.Н. Приводы с частотно-токовым управлением/ В.Н. Бродовский, Е.С. Иванов / Под ред. В.Н. Бродовского. - М.: Энергия, 1974. 168 с.
14. Шрейнер, Р.Т. Экстремальное частотное управление асинхронными двигателями / Р.Т. Шрейнер, В.Н. Поляков // Электротехника. 1973. № 9. с. 10-13.
15. Полющенко, И.С. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод с элементами искусственного интеллекта/ И.С.Полющенко, В.В.Льготчиков // Электричество. – 2012. - №2. – с. 25-32.
16. Казаков, Ю.Б. Влияние параметров широтно-импульсного регулирования напряжения на добавочные потери в асинхронных двигателях/ Ю.Б.Казаков, В.А.Андреев//Электричество. – 2008. - №9. – с. 39-43.
17. Колоколин, А.М. Система управления тиристорным возбудителем, нечувствительная к искажениям питающей сети / А.М.Колоколин, А.Н.Смирнов //Электрические станции. – 2010. - №9. – с. 35-37.
18. Чаплыгин, Е.Е. Микропроцессорное управление автономными инверторами с ШИМ/ Е.Е.Чаплыгин // Электричество. – 1999. - №9. - с.18-24.
19. Чаплыгин, Е.Е. Анализ инвертора напряжения, работающего на разветвленную сеть потребителей/ Е.Е.Чаплыгин, А.Н.Агудов, А.А.Московка// Электротехника. – 2000. - №8. - с.47-51.

20. Дмитриев, Б.Ф. Анализ и синтез гармонического состава выходного напряжения регулятора переменного тока в автономных системах электропитания с импульсной нагрузкой/ Б.Ф.Дмитриев, И.В.Ратников, А.М.Лихоманов, А.Ю.Розов // Морской вестник, Спец. Выпуск. - №1(9). – 2012. – с. 78-81.
21. Исаков, А.С. Интегральное управление с максимальным быстродействием полупроводниковыми выпрямителями / А.С.Исаков, В.Я.Поспелов, С.М.Сковпень // Электричество. – 2011. - №2. – с.52-57.
22. Карибов, С.И. Способ плавного регулирования выпрямленного напряжения преобразователя/ С.И.Карибов, П.Ф.Мерабишвили, А.Ш.Азикури// Электричество. - 2008. - №5 – с. 63-68.
23. Чаплыгин, Е.Е. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в инверторах напряжения с дополнительным полумостом/ Е.Е.Чаплыгин, А.Е.Вилков, С.В.Хухтиков //Электричество. – 2012. - №8 – с. 36-43.
24. Микитченко, А.Я. Экспериментальное исследование транзисторного непосредственного преобразователя частоты с релейно-токовым управлением/ А.Я.Микитченко, В.Г.Бессонов // Электричество. – 2012. - №7. – с. 47-50.
25. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учебное пос./ Г.С. Зиновьев. - изд. 2-е. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 664 с.
26. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование приводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 654 с.
27. Чаплыгин, Е.Е. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения/ Е.Е.Чаплыгин, С.В.Хухтиков // Электричество. – 2011. - №5, - с. 53-61.
28. Виноградов, А.Б. Анализ энергетических показателей и методика выбора оптимальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции для управления трехфазным инвертором напряжения/ А.Б.Виноградов, Д.Б.Изосимов //Электричество. – 2009. - №5. – с. 37-41.

29. Базуткин, В.В. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10-35 кВ / Базуткин В.В. // Электро.Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – №1. – С. 13-18.
30. Ткачук, К.П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования. / К.П.Ткачук, В.П.Колосюк, С.А.Ихно – Киев.: Основа, 2000. – 695 с., ил.
31. Игнатов, А.Н. Классическая электроника и наноэлектроника 4: учеб. Пособие/ А.Н.Игнатов, Н.Е.Фадеева, В.Л. Савиновых, и др. – 2-е изд., стер. – М.: Флинта, 2012. – 728 с.
32. Техника высоких напряжений: учеб. пособие для вузов./ Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, К.П. Кадомская, и др. Под ред. М.В. Костенко. - М., "Высш. школа", 1973. - 528 с. с илл.
33. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах/ В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
34. Ширковец, А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги, Релейная защита и автоматика/ А.И. Ширковец //Релейная защита. - 2011. - №4. - С.14-19.
35. Кучумов, Л.А., О технической выполнимости требований минимизации токов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью./ Л.А. Кучумов, А.А. Кузнецов, В.А. Стефановский // Международная научно-техническая конференция "Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования", СПб., ПЭИПК, вып.1, - 2003. - с.293-303.
36. Бош, В. И. Оценка резонанса тока и напряжения гармонических составляющих / В. И. Бош //Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика, энергосберегающие технологии», 29-30 апреля. Часть 1.-Липецк. - 2004. - с. 13-16.
37. Бош, В. И. Резонансные явления гармонических составляющих /В. И. Бош // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции

- «Электроэнергетика, энергосберегающие технологии», 29-30 апреля. Часть 1. – Липецк. - 2004. - С. 33 - 39.
38. Разевиг, Д. В. Техника высоких напряжений/ Д.В. Разевиг, М. — Л., 1959 – 489 с.
39. Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6-10 кВ предприятий ОАО «Газпром». – М.: ОАО «Оазпром», 2005, -с.63.
40. ТИ 34.20.179 - 88. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1988. – 55 с.
41. Электротехнический справочник Текст. : [в 4 т.] // Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В. Г. Герасимова и др. 8-е изд., испр. и доп. - М.: МЭИ, 2002. - Т. 3. - 964 с.
42. Веселов, А.Е. Разработка технических мероприятий по компенсации емкостных токов замыкания на землю и ограничению перенапряжений в промышленных распределительных электрических сетях/ А.Е. Веселов, Ю.М. Невретдинов, В.В. Ярошевич и др.// Вестник МГТУ, том 10. – 2007. - №4. - с.527-532.
43. Липатов Ю.А., Макаров А-П, Долгополов А. Г. и др. Заземляющее дугогасящее устройство на базе управляемых реакторов. Доклад на конф. «Электротехника — 2010 год. Наука, производство, рынок». — М.: ВЭИ-ТРАВЕК, 1997, Т. 2.
44. Брянцев А.М, Базылев Б.И, Липатов ЮА. и др. Автоматически регулируемые дугогасящие реакторы серии РУОМ. Доклад 2.07 на V симп. «Электротехника — 2010 год». - М.: ВЭИ-ТРАВЕК, 1999, Т. 1.
45. Брянцев, А.М. Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах/ М.А.Бики, Е.Н.Бродовой, А.М. Брянцев// Электричество. – 1994. № 6. – с. 1-10.

46. Брянцев, А.М. Основные уравнения и характеристики магнитно-вентильных управляемых реакторов с сильным насыщением магнитной цепи // Электротехника. - 1991. - № 2. - с. 24-28.
47. Брянцев, А. М. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы новое электротехническое оборудование / А.М.Брянцев, Б.И.Базылев, М.А.Бики, и др. // Электротехника. – 1999. - №7. - стр 1-8,
48. Брянцев, А.М, Управляемые подмагничиванием электрические реакторы – как элемент электроэнергетической системы/ А.М. Брянцев// Электротехника. – 2003. - № 1. – с.2-5.
49. Долгополов, А.Г. Способы автоматической настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием/ А.Г. Долгополов // Электротехника. – 2003. - № 1. – с.59-63.
50. Брянцев, А.М. Управляемые подмагничиванием дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6-35 кВ/ А.М.Брянцев, Б.И.Бызылев, А.Г.Долгополов — Электричество. – 2000. - № 7. – с. 59-61.
51. Базылев, Б.И. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю / Базылев Б.И., Брянцев А.М., Долгополов А.Г. и др. - Спб.: Изд-во ПЭИПК, 1999. - 184 с.: ил.
52. Брянцев, А.М., Бызылев Б.И., Долгополов С.Г. Результаты сетевых испытаний и опыт эксплуатации дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием/ А.М.Брянцев, Б.И.Бызылев, С.Г.Долгополов// – Электро. Электротехника, Электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2007. - №5. – с.31-34.
53. Сарин, Л.И. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали/ Л.И.Сарин, М.В.Ильиных, А.И.Ширковец, Э.В.Буянов, В.Н.Шамко // Энергоэксперт. – 2008. – № 1. - С.56-64.
54. Соловьёв, И.В. Метод определения расстройки по переходной характеристике контура нулевой последовательности распределительной сети / И.В.

Соловьёв, Е.М. Петров // Труды Академии электротехн. наук Чувашской Республики. - 2005. - № 2. - с. 14-15.

55. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6-35 кВ. Повышение точности настройки / G. Drum, A. Kuri, V. Parr // Новости электротехники. - 2007. - № 1(43). - с. 48-51.

56. Ширковец, А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги/ А.И. Ширковец // Релейная защита. – 2011. - №4. - с. 14-19.

57. Ширковец, А.И. Проблематика замыканий на землю и режима заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы/ А.И. Ширковец, А.В. Телегин // Релейная защита и автоматизация. – 2012. - №3. - с. 30-39.

58. Черников, А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью/ А.А.Черников. - М.: Энергия, 1974. — 96 с..

59. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий/ В.С.Иванов, В.И.Соколов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 336 с.

60. Плотников, М.П. Моделирование несинусоидальных режимов двухцепных воздушных линий электропередачи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск: НГТУ, 2015. – 47 с.

61. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным/ В.М.Гридин // Электричество. – 2012- №5 – с. 40-44.

62. Денисов, В.Н. Инженерная модель линейного асинхронного двигателя/ В.Н.Денисов, С.П.Курилин // Электричество.– 2011. - №3. – с. 52-54.

63. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. /И.В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 127 с.

64. Рябихин, Е.А. Метод математического моделирования асинхронного пуска электрической машины/ Е.А. Рябихин// Электричество. – 2009. – №6. – с.60-62.

65. Скворцов, Л.М. Адаптивные методы численного интегрирования в задачах моделирования динамических систем / Л.М. Скворцов// Изв. РАН. Теория и системы управления - 1999. - №4. – с. 72-78.
66. Скворцов, Л.М. Явные адаптивные методы численного решения жестких систем / Л.М. Скворцов// Математическое моделирование. Т. 12. - 2000. - №2. – с. 97-107.
67. Sudhoff, S.D. Analysis and average-value modeling of line-commutated converter-synchronous machine systems/ S.D. Sudhoff and O. Wasynczuk// IEEE Trans. Energy Convers. vol.8 no .1– 1993 - pp. 91-99.
68. Sudhoff, S.D. Analysis and average-value modeling of line-commutated converter -synchronous machine systems \ S.D. Sudhoff \, IEEE Trans. Energy Convers. - 1993. - vol.8, no .3 - pp. 408-410,
69. H. Zhu, ‘New multi-pulse diode rectifier average models for ac and dc power systems studies,’ PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
70. Sudhoff, S.D. Transient and dynamic average-value modeling of synchronous machine/ S.D. Sudhoff, K.A. Corzine, H.J. Hegner, and D.E. Delisle// IEEE Trans. Energy Convers. – 1996. - vol.11, no .3 - pp. 508-514.
71. Alt, J.T. Analysis and average-value modeling of an inductorless synchronous machine load commutated converter systems/ J.T. Alt, S.D. Sudhoff, B.E. Ladd// IEEE Trans. Energy Convers. - 1999. - vol.14, no.1 - pp. 37-43.
72. Shahnazari, M. Improved dynamic average value modeling of brushless excitation system in all rectification modes/ M. Shahnazari, A. Vahedi// IET Electr. Power Appl., Vol. 4, Iss 8 - 2010. pp. 657-669.
73. Жемеров, Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью/ Г.Г. Жемеров // М., «Энергия», 1977. – С. 200-209.
74. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 550с.
75. Афанасьев, А.А. Математическое моделирование безударного пуска с помощью тиристорного преобразователя частоты мощного синхронного дви-

гателя с бесщеточным возбудителем./ А.А. Афанасьев, А.В. Николаев // Электричество– 2010. - №11. – с.32-38.

76. Вигриянова, П.Г. Особенности исследования электромагнитных процессов вентильных двигателей с изменяемой структурой электромеханического преобразователя при отказах элементов силовой части./ П.Г. Вигриянова // Электричество– 2012. – №12. - с. 46-50.

77. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие/ А.Ю.Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев – Томск, ТПУ, 2009. - 213 с.

78. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным./ В.М.Гридин // Электричество – 2012- №5 – с. 40-44.

79. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока/ Б.И.Фираго, Л.Б.Павлячик – Минск: Техноперспектива, 2006. - 363 с.

80. Ананичева, С. С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учебное пособие/ С. С. Ананичева, А.Л. Мызин; 6-е изд., испр. - Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 80 с.

81. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ Ершевич В.В., Зейлигер А.Н., Илларионов Г.А. и др.; Под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро, 3-е изд., перераб. и доп. - М.:Энергоатомиздат, 1985. - 352 с.

82. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети.: уч. пос. / Под ред. В.А. Веников - М.: Высшая школа, 1971. - 440 с.

83. Gaha, A. Simplified and accurate calculation of Frequency Dependence Conductor Impedance/ A. Gaha, M.Abou-Dakka// ICHQP`98, Athens. - 1998. – с. 939-945.

84. Гераскин, О.Т. Применение вычислительной техники для расчета высших гармоник в электрических сетях : Учеб. пособие / О. Т. Гераскин, В. В. Черепанов - М.: М-во энергетики и электрификации СССР, Всесоюз. ин-т повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 1987. - 53 с.

85. Трофимов, Г.Г. Качество электроэнергии и его влияние на работу промышленных предприятий. Алма-Ата: Изд-во КазНИИНТИ, 1986. – 75с.
86. Zhezhelenko, I.V. Resistance approximation in high harmonic frequencies/ I.V. Zhezhelenko, Y.L.Sajenko. // MEPS`96. Wroclaw. – 1996. – с. 280-285.
87. Graham, A. D. Line interharmonic currents in frequency changers/ A. D. Graham// 8<sup>th</sup> international conference of harmonics and quality of power, Athens. – 1998. – с. 749-754.
88. Михеев, К.Е., Анализ энергетических показателей многоуровневых преобразователей систем электропривода. / К.Е. Михеев, В.С. Томасов// Научно-технический вестник НИУ ИТ-МО. – 2002. - № 1(77), с. 46-52.
89. Колпаков, А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей./ А. Колпаков // Силовая электроника. - 2007. - №2. – с. 12-17
90. Киреева, Э.А. Полный справочник по электрооборудованию и электротехнике (с примерами расчетов)/ Э.А.Киреева, С.Н.Шерстнев - М.: КНО РУС, 2013. — 864 с.
91. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения/Под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. –3-е изд.,-М.: Энергоатомиздат, 1989.- 768 с.
92. Кузнецов, А.А. Исследование резонансных процессов на высших гармониках в несимметричных режимах работы систем электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2000. – 20 с.
93. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Министерство топлива и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России»: РД 34.20.501-95.-15-е изд., перераб. и доп. –М.: СПО ОРГГРЭС, 1996. – 119 с.
94. Ширковец, А.И. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ./ А.И. Ширковец, М.В. Ильиных // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008.- спец. Вып. №1. – с. 44-51.

95. Базуткин, В.В. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10-35 кВ / В.В. Базуткин // Электро.Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – №1. – С. 13-18.
96. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов/ Ф.А. Лихачев – М. «Энергия», 1971. 152 с. с илл.
97. Лихачев, Ф.А. Горение заземляющих дуг и перенапряжения, возникающие при повторных зажиганиях./ Ф.А. Лихачев // В сб. «наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС», вып. XXXI, , «Энергия». - 1964. - с. 176
98. Лихачев, Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220кВ / Ф.А. Лихачев - М.: Энергия, 1968. - 101 с.
99. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х.Халилов, Г.А.Евдокунин, В.С.Поляков и др.; Под ред. Ф.Х.Халилова, Г.А.Евдокунина, А.И.Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
100. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах/ Р.Вильгейм, М.Уотерс - М-Л.: Госэнергоиздат, 1959.-416 с.
101. Kuzmin, A. Special Features of Transient Processes at Ground Faults in Longdistance Transmission Lines/ A.Bazavluk, A.Kuzmin, A.Telegin, I.Tsivilov, A. Panchenko, E.Miksabirov// 8th International Conference 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability – 2012 – С. 187-191.
102. Кузьмин, А.А. Экспериментальное исследование эффективности работы дугогасящих реакторов в Улан-Баторских городских электрических сетях 6-10 кВ/ Э. Аюурзана, М.И. Петров, А.А. Кузьмин // Вестник Чувашского университета. - 2016. – № 1. – С. 30–38.
103. Кузьмин, А. А. Перенапряжения при дуговых замыканиях в сети 6 кВ, питающей частотно-регулируемый электропривод / А. А. Кузьмин, И. А. Ефремов, Г.Г. Михайловский, А.А. Базавлук // Энергетик. -2011. - № 10 – С. 22-24.

104. Петров, М. И. Влияние частотно-регулируемой нагрузки на процессы при возникновении однофазного замыкания на землю / М. И. Петров, А. А. Кузьмин // Вестник Чувашского университета. - 2015. – № 3. – С. 104–108.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акты об использовании результатов диссертационной работы



ООО ВП «ПРОЦИОН»

428008, г. Чебоксары, ул. Текстильщиков, д.8  
 тел. (8352) 23-80-83 E-mail: [info@procion.pro](mailto:info@procion.pro)  
 ИНН 2130125861 КПП 213001001 ОГРН 1132130012640  
 р/сч. 40702810316100030092 в ПАО АКБ "АВАНГАРД" г. Москва  
 к/сч. 3010181000000000201 БИК 044525201

Исх № 16-06/442 от 01.06.2016  
 На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Новосибирский ГТУ  
 Зав. кафедрой безопасности труда  
 Коробейникову С.М.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы, выполненной в рамках диссертационной работы аспирантом кафедры Техники высоких напряжений Новосибирского Государственного Технического Университета КУЗЬМИНЫМ Алексеем Александровичем

Настоящий АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ) результатов научных исследований, выполненных в диссертационной работе аспиранта кафедры ТВН Кузьмина Алексея Александровича в ООО ВП «ПРОЦИОН», в рамках, проводимых предприятием научно-исследовательских и внедренческих работ по разработке систем активного гашения электрической дуги в режимах однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ.

Работы выполнены в части исследования эффективности компенсации тока замыкания на землю и разработке технического решения по устройству полной компенсации емкостной составляющей тока замыкания на землю в комплексе с дугогасящим реактором и блоком управляемых резисторов. Полученные результаты представлены в публикациях.

*Актуальность исследований* заключается в повышении надежности эксплуатации сетей среднего класса напряжения, за счет увеличения вероятности погасания дуги при возникновении однофазного замыкания на землю.

*Основные результаты работы.*

- результатов опытов искусственных однофазных замыканий на землю, а также анализа аварийных осциллограмм использованы для разработки технических требований к силовому оборудованию и автоматике системы компенсации тока однофазного замыкания на землю;
  - разработана оригинальная система компенсации, позволяющая: обеспечить быстрый выход на установившийся режим тока компенсации 50 Гц без апериодического броска; обеспечить полную компенсацию емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю;
  - в соответствии с разработанной функциональной схемой разработана опытная конструкция системы компенсации, определены основные технические характеристики узлов устройства;
  - введено в опытную эксплуатацию устройство полной компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ ПС 110 кВ «Кировская»
- Экономический эффект от внедрения устройства не рассчитывался.

Технический директор, к.т.н.

М.И. Петров



Сетевая  
Компания

Заведующему кафедрой  
безопасности труда  
Новосибирского  
государственного университета

01.06.2016 № 102-171/216

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

С.М. Коробейникову

О результатах научно-  
исследовательской работы

### Уважаемый Сергей Миронович!

В 2015 г. на ПС 110/6 кВ «Кировская» филиала ОАО «Сетевая компания» Казанские электрические сети произведено внедрение предложенного Кузминым А.А. устройства полной компенсации емкостной составляющей тока замыкания на землю в составе с дугогасящим реактором РДМКу с конденсаторным регулированием и управляемым резистивным блоком с восемью ступенями управления.

Тематика проведенной работы весьма актуальна в электрических сетях среднего напряжения, особенно в разветвленных кабельных сетях 6 и 10 кВ в условиях крупных градообразований, где высока вероятность дуговых замыканий на землю, которые часто приводят к междуфазным и множественным повреждениям и отключениям потребителей.

Применение устройства, вследствие высокого быстродействия системы компенсации, обеспечивает быстрый выход на установившийся режим компенсации тока основной частоты сети,

КАЗАНСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ  
филиал открытого акционерного общества «Сетевая компания»

420021, Республика Татарстан, г.Казань ул.Г.Тукая, д.109, телефон (843) 292-13-59, факс (843) 264-58-56  
ИНН 1655049111 КПП 165502001 Р/с 40702810000000000925 в филиале ОАО «АКИБАНК» г.Казани  
Кор/счет 30101810300000000916 БИК 049205916

принудительно снижая несимметрию фазных напряжений сети посредством управления добротностью контура и симметрирования фазных емкостей изоляции в различных режимах работы электрической сети. Важным моментом является применимость модели системы для сетей с различной конфигурацией и видами линий.

Введенная в эксплуатацию система с устройством полной компенсации емкостной составляющей тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ ПС «Кировская», функционирует с апреля 2015 года.

Экономический эффект от внедрения устройства не рассчитывался.

**И.о. главного инженера**



**Р.Г. Халилов**

Халилов Р.Г., 8 8843 572 10 53