

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Финашин Роман Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНО-РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ  
НЕЙТРАЛИ И УСТРОЙСТВА ГЛУБОКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Качесов Владимир Егорович

Новосибирск – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ .....	13
1.1 Вред, наносимый однофазным замыканием на землю .....	13
1.1.1 Сеть с изолированной нейтралью .....	14
1.1.2 Преимущества и недостатки изолированной нейтрали .....	14
1.1.3 Реальная эксплуатация распределительных электрических сетей.....	15
1.2 Заземление нейтрали электрической сети через дугогасящий реактор .....	16
1.2.1 Принцип работы дугогасящего реактора .....	16
1.2.2 Системы автоматической настройки реакторов.....	17
1.2.3 Область применения реакторов и их преимущество .....	18
1.2.4 Недостатки дугогасящего реактора .....	19
1.3 Заземление нейтрали через резистор.....	20
1.3.1 Типы резистивного заземления.....	20
1.3.2 Расчёт и выбор нейтрале-заземляющего резистора .....	20
1.4 Задача работы .....	23
ГЛАВА 2 ТЕОРИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ.....	24
2.1 Импульсное резистивное заземление нейтрали электрической сети.....	24
2.1.1 Концепция импульсного резистивного заземления нейтрали электрической сети.....	24
2.1.2 Принцип работы устройства импульсного резистивного заземления нейтрали электрической сети.....	24
2.1.3 Первый прототип импульсного резистивного заземления .....	27
2.1.4 Устройство импульсного резистивного заземления без системы управления запуском.....	29
2.1.5 Методика расчёта тока в запускающей цепи симистора .....	31
2.1.6 Энергия, выделяемая в нейтрале-заземляющем резисторе .....	33
2.2 Производная напряжения на нейтрали электрической сети.....	35
2.2.1 Частоты собственных колебаний в радиальной сети.....	35
2.2.2 Оценка параметров радиальной распределительной сети и производной $du_N/dt$ .....	38

2.2.3 Методика определения производной $du_N/dt$ для электрических сетей с бинарной топологией .....	41
2.2.4 Простейший расчёт напряжения на выходе делителя дифференцирующе-запускающей цепи (метод №1).....	46
2.2.5 Расчёт в схеме замещения с трансформатором, представленным сосредоточенной индуктивностью (метод №2) .....	49
2.2.6 Расчёт в схеме замещения с обмоткой, представленной линией с распределенными параметрами (метод №3).....	51
2.3 Приближенная оценка выходного напряжения на дифференцирующе-запускающей цепи для распределительной сети с реальной топологией .....	52
2.3.1 Производная $du_N/dt$ в реальной кабельной сети.....	52
2.3.2 Оценка сигнала производной $du_N/dt$ в воздушной электрической сети.....	54
2.3.3 Учёт низкочастотной составляющей производной напряжения.....	57
2.3.4 Отстройка от ложных срабатываний .....	59
Выводы по второй главе .....	62
<b>ГЛАВА 3 ФИЗИЧЕСКАЯ НИЗКОВОЛЬТНАЯ СТЕНДОВАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИМПУЛЬСНЫМ РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ</b>	
3.1 Низковольтная стендовая модель .....	65
3.2 Модели заземляющей дуги .....	66
3.2.1 Дуговое замыкание на землю по теории Петерсена .....	66
3.2.2 Дуговое замыкание на землю по теории Петерса и Слепяна .....	68
3.2.3 Дуговое замыкание на землю по теории Беякова .....	69
3.3 Компьютерная PSPICE модель низковольтного физического стенда .....	70
3.3.1 Основные характеристики программы PSPICE .....	70
3.3.2 Компьютерное моделирование дугового замыкания.....	71
3.4 Скоростные характеристики симистора.....	73
3.5 Физическая модель .....	76
3.6 Использование стенда в учебных целях .....	81
Выводы по третьей главе .....	88
<b>ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ</b> .....	
4.1 Технические требования .....	90
4.2 Симисторы и их защитные варисторы .....	90
4.2.1 Выбор симисторов.....	90

4.2.1 Выбор защитных варисторов .....	92
4.3 Запускающий трансформатор .....	94
4.3.1 Разработка запускающего трансформатора .....	94
4.3.2 Тестирование и компьютерная модель запускающего трансформатора .....	96
4.4 Испытания симисторной цепи устройства импульсного резистивного заземления .....	99
4.5 Разброс времен включения симисторов .....	101
4.6 Устройство управления импульсного резистивного заземления нейтрали .....	102
4.7 Охлаждение симисторов .....	104
4.8 Возможность использования управляемого вакуумного разрядника в качестве коммутатора в устройстве импульсного резистивного заземления нейтрали .....	106
4.8.1 Мотивы применения вакуумных разрядников .....	106
4.8.2 Основные характеристики управляемого вакуумного разрядника .....	106
4.8.3 О применимости вакуумного управляемого разрядника в устройстве импульсного резистивного заземления нейтрали .....	108
4.9 Лабораторные испытания импульсного резистивного заземления нейтрали .	110
4.9.1 Испытания устройства импульсного резистивного заземления высоким напряжением .....	110
4.9.2 Испытания электрической (токовой) нагрузкой .....	112
4.9.3 Определение чувствительности импульсного резистивного заземления нейтрали .....	113
Выводы по четвертой главе .....	117
<b>ГЛАВА 5 ГЛУБОКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....</b>	<b>119</b>
5.1 Основы глубокого ограничения дуговых перенапряжений .....	119
5.2 Автономная работа устройства глубокого ограничения .....	120
5.2.1 Запуск устройства глубокого ограничения от собственного устройства управления .....	120
5.2.2 Энергия, поглощаемая фазными нелинейными ограничителями перенапряжений .....	121
5.3 Совместная работа устройств глубокого ограничения и импульсного резистивного заземления нейтрали .....	122
5.5 Компьютерное моделирование работы устройства .....	124
5.5.1 Компьютерное моделирование работы устройства глубокого ограничения в сети с изолированной нейтралью .....	125

5.5.2 Компьютерное моделирование работы устройства глубокого ограничения в сети с импульсным резистивным заземлением.....	127
5.6 Предотвращение перегрева защитных варисторов устройства глубокого ограничения .....	129
5.6.1 Энергия, выделяемая в защитных варисторах .....	129
5.6.2 Временная диаграмма включения ключа устройства глубокого ограничения .....	130
5.6.3 Энергия, выделяемая в защитных варисторах устройства глубокого ограничения при устойчивом однофазном замыкании на землю .....	131
5.6.4 Энергия, выделяемая на защитных варисторах устройства глубокого ограничения при задержке включения последнего симистора .....	131
5.7 Составной ограничитель перенапряжений нелинейный .....	134
5.8 Техническая реализация устройства глубокого ограничения .....	135
5.8.1 Микроконтроллерный блок термо-защиты устройства глубокого ограничения .....	137
Выводы по пятой главе .....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И НАСТРОЙКА УСТРОЙСТВА ИМПУЛЬСНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ .....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А.1 Изготовление вторичной высоковольтной обмотки запускаящего трансформатора .....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А.2 Определение кривой намагничивания трансформатора .....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ А.3 Разброс времен включения симисторов .....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ А.4 Изготовление и тестирование драйвера управления.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ И ПРОТОКОЛ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	167

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

В настоящее время распределение электроэнергии электроприемникам, по большей части, происходит по распределительным трехфазным сетям среднего напряжения (СН) с неэффективно заземленной нейтралью. Сети среднего класса напряжения являются самым распространённым типом электрических сетей (ЭС) в России.

Развитие этих сетей привело к заметному увеличению аварийных ситуаций, что послужило толчком к разработке более совершенных конструкций линий и электротехнических аппаратов. Актуальна разработка и создание средств повышения надёжности передачи электроэнергии, в частности, снижения опасных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю.

Работы в области оптимизации режима нейтрали сетей 6–35 кВ в СССР и Российской Федерации активно велись такими учеными как Лихачевым Ф. А., Евдокуниным Г.А., Кадомской К. П., Халиловым Ф. Х., Джуварлы Ч. М., Р.А. Вайнштейном, И.М. Сиротой и др.

### **Степень разработанности.**

При эксплуатации ЭС часто возникают переходные электромагнитные процессы вследствие плановых и аварийных коммутаций, механических повреждений оборудования, ошибок эксплуатации. Характер таких аварийных процессов был хорошо изучен В.Г. Гольдштейном, В.А. Шуиным, В.Ф. Сивокобыленко и сделан вывод, что наиболее распространенным повреждением является дуговое замыкание на землю [1, 2]. При возникновении однофазного замыкания из-за разрушения/пробоя изоляции могут возникнуть междуфазные короткие замыкания, что может привести к большим экономическим потерям у потребителя электроэнергии. Вызываемые замыканием дуговые перенапряжения на неповреждённых фазах негативно влияют на нагрузку, линейное оборудование (измерительные трансформаторы напряжения (ТН)) и увеличивают вероятность развития междуфазного короткого замыкания. Для предотвращения подобных явлений еще в начале XX века [3] предложено заземлять нейтраль ЭС через катушку индуктивности/дугогасящую катушку (ДГК), а также через резистор.

В ряде работ [4 - 6] рассматривается использование высокоомного резистора, а также отключаемого низкоомного резистора для заземления нейтрали сетей 6-35 кВ с малыми токами замыкания. Авторами отмечена возможность данных способов заземления уменьшать урон от последствий однофазных дуговых замыканий на землю (ОДЗ), однако, в случаях применения низкоомного резистора необходимо своевременное отключение линии с ОДЗ. Одновременно с этим происходит отключение потребителей, у которых отсутствует автономный источник питания или резервные линии электропитания. Данное обстоятельство снижает критерии надёжности и качества электроснабжения [7], а также может повлечь серьёзные экономические потери. В сетях с высокоомным резистивным заземлением увеличивается ток в месте повреждения фазной изоляции в установившемся режиме, снижая электробезопасность и экологичность системы электроснабжения. Повышенный ток замыкания также негативно влияет на ряд эксплуатационно-технических характеристик ЭС.

В работе исследован новый способ импульсного резистивного заземления нейтрали для ЭС среднего класса напряжения, идею которого впервые предложил Качесов В.Е. в 2012 году [8]. Приведены результаты аналитических расчётов, компьютерного моделирования и лабораторных испытаний устройств импульсно-резистивного (ИРЗ) заземления и глубокого ограничения (УГО) дуговых перенапряжений. Исследована возможность применения метода глубокого ограничения дуговых перенапряжений в ЭС 6-35 кВ с целью увеличения надёжности передачи электроэнергии. Рассмотрены существующие и перспективные способы заземления нейтрали ЭС и их режим работы при однофазном дуговом замыкании как на компьютерных, так и физических моделях.

**Целью работы** является разработка и создание средств повышения надёжности передачи электроэнергии, в частности, снижения опасных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях среднего класса напряжения 6-35 кВ, которые приводят к деградации изоляции и увеличивают поток аварийных отключений.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- теоретически доказана возможность применения ИРЗ в распределительных сетях 6-35 кВ на основе анализа производной напряжения в нейтрали ЭС;
- произведено компьютерное моделирование процессов ограничения дуговых перенапряжений в распределительной сети с ИРЗ и УГО;
- изготовлена низковольтная физическая модель распределительной сети с резистивным и импульсно-резистивным способом заземления для проведения лабораторных работ студентов, а также для моделирования способов ограничения перенапряжений с ИРЗ и УГО;
- показаны технические преимущества нового способа глубокого ограничения дуговых перенапряжений перед постоянным резистивным заземлением;
- рассчитаны характеристики, подобраны элементы и изготовлены опытные прототипы устройств ИРЗ и ГО;
- проведены лабораторные испытания прототипов высоким напряжением.

#### **Методы исследований:**

- Математическое/аналитическое моделирование исследуемых процессов с использованием теории электрических цепей;
- Схемотехническое/компьютерное моделирование с использованием апробированного программного обеспечения;
- Активный целенаправленный эксперимент, поставленный как на существующих лабораторных установках, так и на специально разработанных.

#### **Научная новизна положений и результатов работы:**

1. Вне зависимости от способа неэффективного заземления нейтрали электрических сетей 6-35 кВ (изолированная нейтраль, заземленная через ДГК или высокоомный резистор) производная напряжения в нейтрали подавляющего большинства таких сетей при неустойчивых (перемежающихся) замыканиях на землю имеет большое значение, достаточное для классификации такого вида замыкания и запуска устройств, реализующих способ импульсно-резистивного заземления.

2. Разработаны полноценные математические модели распределительных электрических сетей с импульсно резистивным заземлением нейтрали, детально



учитывающие работу полупроводниковых приборов, включая временной разброс включения симисторов, и позволяющие оптимизировать конструкции устройств ИРЗ на стадиях их проектирования и модернизации.

3. Симисторы с большими временами включения в устройствах ИРЗ могут приводить к перегреву их защитных варисторов и, в итоге, к повреждению всего ключа. Исключение такого перегрева выполняется посредством специально разработанного устройства управления в составе устройства ИРЗ. Для защиты «медленных» симисторов рекомендовано применение варисторов повышенной энергоемкости (мощности).

4. В качестве высоковольтного ключа в устройствах ИРЗ принципиально могут применяться управляемые вакуумные разрядники (РВУ), однако, область их устойчивых рабочих разрядных токов начинается с 80А. При меньших разрядных токах происходит «натренировка» РВУ. Значительные разрядные токи разрядников ограничивают их применение в электрических сетях с нормируемыми ПУЭ емкостными токами замыкания на землю.

5. В устройстве глубокого ограничения дуговых перенапряжений целесообразно применять составной ОПН, нижнее плечо которого шунтируется высоковольтным ключом, а верхнее обеспечивает глубокий уровень ограничения дуговых перенапряжений. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) нижнего плеча скоординирована с составной ВАХ защитных варисторов.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

- участия в соавторстве при постановке целей и задач диссертационных исследований;
- разработке математических моделей переходных процессов, сопровождающих однофазные замыкания на землю в сетях с разветвленной топологией;
- постановке и проведении экспериментальных исследований элементов устройств ИРЗ и ГО в лаборатории каф. ТЭВН НГТУ;
- обработке результатов лабораторных и компьютерных экспериментов и формировании технических требований к системе запуска полупроводникового ключа устройств ИРЗ и ГО;
- участия в разработке оригинальной конструкции устройств ИРЗ и ГО;

- участия в разработке устройства управления полупроводниковым симисторным ключом ИРЗ и ГО;
- экспериментальном исследовании коммутационных характеристик высоковольтного вакуумного разрядника.

#### **Практическая значимость результатов работы:**

1. Для тестирования устройств ИРЗ разработана и апробирована высоковольтная испытательная установка, в которой посредством вакуумного выключателя создается переходный колебательный процесс с заданной частотой свободных колебаний, возникающих при перезаряде батарей конденсаторов через специальный высоковольтный дроссель.

2. На низком и высоком напряжениях экспериментально определен уровень чувствительности устройства ИРЗ, созданного на основе высоковольтного составного симисторного ключа.

3. Изготовлено и испытано на высоком напряжении устройство импульсно-резистивного заземления нейтрали электрических сетей 6-10 кВ, рассчитанное на ток до 20 А.

4. Разработан, обеспечен методическими материалами и внедрен в учебный процесс лабораторный стенд – электрофизическая установка, моделирующая замыкания на землю в сетях с неэффективно заземленной нейтралью и использующая новый импульсно-резистивный способ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Импульсно-резистивное заземление нейтрали ЭС принципиально снижает энерговыделение в нейтрали-заземляющем резисторе при временных интервалах между повторными зажиганиями дуги около полупериода промышленной частоты на ~30% по сравнению с режимом его постоянного подключения к нейтрали и устойчивом ОЗЗ; при заметном снижении электрической прочности дефектного участка фазной изоляции и сохранении такого же интервала между повторными зажиганиями дуги, снижение энерговыделения происходит в несколько раз.

2. Напряжение на нейтрали электрической сети в начальный момент замыкания (на I-ой стадии замыкания - разряде фазной емкости сети) может быть определено по методике, в которой затухание волны напряжения нулевой последовательности (НП), распространяющейся к центру питания от места

замыкания, учитывается посредством расчёта преломлений этой волны на распределительных подстанциях (ПС), а увеличение длительности её фронта учитывается как произведение удельного метрического коэффициента на полное расстояние до центра питания. На основе найденного напряжения НП напряжение на выходе ДЗЦ определяется решением несложных дифференциальных уравнений для контура второго порядка.

3. Гарантированная низкочастотная составляющая производной напряжения в нейтрали ЭС (на II-ой стадии замыкания) определяется амплитудой ( $A$ ), свободной перезарядной составляющей переходного процесса, возникающего при замыкании (пробое изоляции) фазного провода на землю; ее значение в относительных единицах приближенно определяется по выражению:  $d_{uN}/dt \cong 2A\beta_1/3$ , где  $A$  и  $\beta_1$  – амплитуда и частота свободных перезарядных колебаний.

4. В системе управления устройством глубокого ограничения должна быть задана необходимая длительность отпирающего импульса ( $t_{отп}$ ), обеспечивающего надежное открытие составного симисторного ключа: значение  $t_{отп}$  должно быть соизмеримо или превышать полупериод свободных перезарядных колебаний в ЭС, т.е.  $t_{отп} \geq \pi/\beta_1$ .

**Достоверность результатов работы** основывается на использовании результатов проведенных в лаборатории экспериментов и хорошем согласии результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными.

#### **Апробация работы и публикации.**

Результаты работы обсуждались на семинарах кафедры ТЭВН и факультета Энергетики НГТУ (2015-2019 гг.), на Международных научно-технических конференциях: «Состояние и перспективы развития электро и теплотехники» (г. Иваново, ИГЭУ, 2015), XIII международной научно практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современного общества» (НГТУ, 2016г.), на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НГТУ, 2015г.)

Результаты работы использованы в учебном процессе на каф. ТЭВН НГТУ в форме лабораторной работы в курсе «Перенапряжения и координация изоляции». Рекомендована опытная эксплуатация устройства ИРЗ в распределительных сетях АО «РЭС» и ОАО «РЖД». Акты о внедрении и использовании результатов

диссертационной работы включены в её текст в виде соответствующих приложений.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах. Из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 2, а также в патентах РФ на изобретение и полезную модель – 2; в научных изданиях, индексируемых базами SCOPUS - 1.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений, содержащего 102 наименование. Объем работы составляет 168 страниц, включая 99 рисунков и 6 таблиц.

## ГЛАВА 1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

### 1.1 Вред, наносимый однофазным замыканием на землю

Число повреждений в распределительных электрических сетях зависит от их суммарной протяженности, конструкции линий, срока службы, качества эксплуатационного обслуживания, степени загрузки. Однофазные замыкания на землю в распределительных сетях 6-10 кВ являются наиболее распространёнными нарушениями нормального режима работы; их доля от общего количества замыканий составляет от 30% до 80% [9].

Однофазным дуговым замыканием называется процесс, когда при замыкании отсутствует устойчивая гальваническая связь с землёй и протекание тока происходит через дугу; 90% однофазных замыканий сопровождаются горением дуги. Длительный процесс перемежающейся дуги приводит к многократным дуговым перенапряжениям, которые могут привести к серьёзным повреждениям изоляции.

Причины возникновения ОДЗ разнообразны. В воздушных линиях они могут возникать из-за механических или электрических разрушений изоляции, дефектов в изоляции и изоляционных конструкциях, ее загрязнения и увлажнения, ошибок монтажа, в результате грозových или внутренних перенапряжений.

Кратность перенапряжений при ОДЗ находится, в основном, в диапазоне до  $3,1 \dots 3,2U_{ф.м}$  ( $U_{ф.м}$  - амплитудное значение фазного напряжения ЭС) [9], они представляют опасность для оборудования со слабой изоляцией (изоляция статоров вращающихся машин), старой и стареющей изоляцией.

Вероятность возникновения перенапряжений с кратностью более  $3U_{ф.м}$  мала и находится в диапазоне от 0,1% до 7% [10]. В воздушных сетях примерно 30% ОДЗ переходят в двухфазные, а в кабельных сетях - 60-65% [11]. В 50% случаев изоляция восстанавливается после отключения-включения поврежденного фидера.

Наиболее уязвимыми ЭС 6-10 кВ при воздействии внутренних перенапряжений являются кабели и места их соединений (до 60% ОДЗ). В воздушно-кабельных сетях большее число повреждений приходится на опорные и проходные изоляторы (20%) и коммутационные аппараты (свыше 20%) [11].

Степень опасности замыканий в трёхфазных ЭС, включая распределительные, по большей части, зависит от состояния нейтрали электрической сети (способе и эффективности её заземления). В Российской Федерации существует три основных типа неэффективного заземления нейтрали: изолированная, «резонансное» заземление (через дугогасящий реактор/катушку – ДГР/ДГК), резистивное (высокоомное, низкоомное).

### **1.1.1 Сеть с изолированной нейтралью**

Режим изолированной нейтрали традиционно применяется в России, странах Европы, Японии. При этом способе заземления нейтральная точка источника (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземлителя. Сети с изолированной нейтралью составляют около 70% в России. Данная популярность обусловлена простотой и малой стоимостью данного способа.

При однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью не возникает сверхток в питающих фидерах (так же, как и при других способах неэффективного заземления нейтрали), и аварийное отключение повреждённого фидера не происходит. Линейные напряжения остаются такими же, как и до замыкания одной фазы на землю, и потребитель получает полноценное электропитание. Данный способ имеет свои преимущества и недостатки.

### **1.1.2 Преимущества и недостатки изолированной нейтрали**

Режим неэффективно заземленной нейтрали позволяет повысить надежность питания потребителей при некоторых видах повреждений в ЭС, в частности, при однофазных замыканиях на землю [12,13]. Режим изолированной нейтрали разрешён ПУЭ для сетей 2-35 кВ [14]. Такой режим работы допускается, например, для сокращения времени поиска места повреждения в сети (используются специальные приборы поиска).

В месте повреждения фазной изоляции при устойчивом низкоомном состоянии заземляющей дуги (т.е. при замыкании, приближенном к «металлическому») протекает емкостный ток замыкания на землю (ЕТЗЗ), разрушающий токоведущие проводники и изоляцию. При неучёте проводимости

изоляции он определяется как:  $I_c=3\omega C_\phi U_\phi$ , где  $C_\phi$  – фазная ёмкость сети,  $\omega$  – угловая промышленная частота сети (100π рад/сек).

Дополнительными недостатками этого режима заземления нейтрали являются возможность возникновения дуговых перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым током (единицы–десятки ампер) в месте однофазного замыкания на землю; возможность возникновения множественных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей и пр.) из-за пробоев изоляции на других присоединениях, связанных с дуговыми перенапряжениями; возможность длительного воздействия на изоляцию дуговых перенапряжений, что ведет к накоплению в ней дефектов и снижению срока службы; необходимость выполнения изоляции электрооборудования относительно земли на линейное напряжение; сложность обнаружения места повреждения; сложность обеспечения правильной работы релейных защит от однофазных замыканий, так как реальный ток замыкания на землю зависит от режима работы сети (числа включённых присоединений); опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в ЭС.

При всех существующих недостатках изолированной нейтрали, ей зачастую отдается предпочтение в тех случаях, когда прерывание электроснабжения ведет к большому ущербу для предприятий.

### **1.1.3 Реальная эксплуатация распределительных электрических сетей**

В сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией ЕТЗЗ допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения [15]. Но зачастую поиск места повреждения занимает длительное время (до нескольких суток): оперативным персоналом на подстанции может быть не замечен факт замыкания на линии из-за неисправности сигнализирующего оборудования или неустойчивости однофазного замыкания.

Стоит отметить, что большая часть воздушных и кабельных линий имеет возраст более 20-30 лет, поэтому изоляция деградирует и теряет электрическую прочность. Ослабленная изоляция не способна выдерживать большие кратности дуговых перенапряжений, возможные в сетях с изолированной нейтралью, что ведет

к росту аварийных ситуаций, вызванных однофазными замыканиями. Замены воздушных и кабельных линий практически не происходят из-за больших объемов трудозатрат и средств, поэтому требуется разработка новых эффективных способов заземления нейтрали.

## 1.2 Заземление нейтрали электрической сети через дугогасящий реактор

### 1.2.1 Принцип работы дугогасящего реактора

Немецким учёным Петерсеном (W. Petersen) в 1919 году впервые предложено заземлять нейтраль ЭС через катушку индуктивности или дугогасительный реактор [3]. Особенности применения ДГР рассмотрены в статьях [16, 17]. При заземлении нейтрали сети через ДГР в месте замыкания протекает ток, который приблизительно, не учитывая проводимость утечки изоляции и высшие гармонические составляющие, можно оценить по формуле (1.1):

$$I_3 = 3\omega U_\phi C_\phi (1 - K_L), \quad (1.1)$$

где  $K_L = \frac{1}{3\omega^2 L_{\text{ДГР}} C_\phi}$  – коэффициент компенсации ЕТЗЗ,  $L_{\text{ДГР}}$  – индуктивность ДГР.

Для минимизации токов замыкания и ограничения дуговых перенапряжений индуктивность реактора подбирается так, чтобы в контуре, образованном катушкой индуктивности и суммарной ёмкостью фазных проводников относительно земли, возникал резонанс токов ( $K_L=1$ ) на промышленной частоте, т.е. выполнялось равенство (1.2):

$$I_C \cong I_{\text{ДГР}}, \quad (1.2)$$

где  $I_{\text{ДГР}}$  – ток в реакторе.

Ток замыкания промышленной частоты  $I_3$  в месте замыкания находится согласно (1.3):

$$I_3 = \dot{I}_C + \dot{I}_{\text{ДГР}} + \dot{I}_a = \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_{\text{ДГР}})^2}, \quad (1.3)$$

где  $I_a$  – активная составляющая тока, обусловленная проводимостью утечки фазной изоляции и конечной добротностью ДГР ( $Q_{\text{ДГР}}=X_{\text{дгр}}/R_{\text{дгр}}$ ;  $X_{\text{дгр}}$  и  $R_{\text{дгр}}$  – индуктивное и активное сопротивления ДГР).



Опыт эксплуатации ЭС показал, что поддержание условий резонанса в электрическом контуре распределительной сети требует постоянной подстройки индуктивности реактора с привлечением все более совершенных принципов автоматического управления. Необходимость в этом возникает из-за частого изменения конфигурации сети, в связи с чем меняется суммарная ёмкость фидеров, и положительный эффект от реактора заметно снижается.

### **1.2.2 Системы автоматической настройки реакторов**

Для автоматического контроля за состоянием дугогасящих реакторов (за их мощностью) различных типов (плунжерного, с подмагничиванием магнитопровода, ступенчато-регулируемых) используются современные микроконтроллерные устройства такие как САНК-6, МИРК-5, REG-DP, Бреслер-0107.060.2 и др. [18,19]. Они позволяют в режиме реального времени подстраивать ДГР на точную компенсацию ЕТЗЗ (как правило, в пределах  $\pm 2\%$ ), а также дополнительно компенсировать несимметрию в ЭС и активную составляющую тока замыкания на землю.

У большинства устройств контроля резонансная настройка ДГР осуществляется путем сравнения частоты свободных колебаний напряжения в нейтрали сети, возбуждаемых блоком смещения нейтрали. Некоторые устройства, например REG-DP, работают на принципе поиска резонанса при естественной несимметрии сети – в пределах до 0,01-0,1В (в утроенном напряжении на нейтрали -  $3U_0$ ) на вторичной обмотке измерительного трансформатора напряжения. Для других регуляторов смещение нейтрали создается специальным трансформатором с изменяемым числом витков одной из фаз (например, трансформатор ТМПС для устройства контроля УАРК).

Большинство устройств автоматического контроля сложны в эксплуатации и требуют квалифицированного обслуживания, что усложняет использование реакторов с автоматическими системами регулирования.

### 1.2.3 Область применения реакторов и их преимущество

Доля сетей среднего напряжения с заземлением через дугогасящий реактор составляет более 19%. В основном ДГР используется в сетях с большими емкостными токами: городских кабельных и генераторных сетях, сетях собственных нужд и промышленных предприятий. Согласно ПУЭ [15] компенсация должна применяться при следующих значениях ЕТЗЗ сети в нормальных режимах ее работы - табл. 1.1.

Таблица 1.1 - Емкостные токи замыкания на землю для сетей класса 6-35 кВ

Напряжение сети, кВ	6 кВ	10 кВ	35 кВ
Емкостной ток замыкания на землю (ЕТЗЗ), $A_{эфф}$	30	20	10
При наличии в сети линии с железобетонными опорами, $A_{эфф}$	10	10	10

Допускается применять компенсацию в сетях 6-35 кВ также и при значениях емкостного тока меньших от приведённых выше значений.

Заземление нейтрали через ДГР обладает следующими преимуществами:

- снижаются перенапряжения при дуговых замыканиях на землю до значений  $2,2-2,4U_{ф.m}$  (при  $K_L \cong 1$ );
- уменьшается ток в месте замыкания до минимального значения (в пределе - до активной составляющей и тока высших гармоник);
- снижается скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе, что способствует лучшему дугогашению заземляющей дуги;
- возможность работы сети с ОЗЗ до принятия мер по безаварийному отключению поврежденного элемента;
- высокая вероятность самогашения дуги и самоликвидации большей части ОЗЗ (при ограниченных значениях остаточного тока в месте повреждения);

Внедрение ДГР в сети, содержащие трансформаторы напряжения контроля изоляции (ТНКИ), исключает возможность возникновения опасных феррорезонансных процессов. Это объясняется тем, что дугогасящие реакторы имеют более низкие сопротивления нулевой последовательности, чем трансформаторы напряжения с подключенной к земле нейтральной точкой, что

приводит к более быстрому стеканию заряда в землю при дуговых замыканиях на землю.

#### 1.2.4 Недостатки дугогасящего реактора

Если электрическая система полностью симметрична, то смещение нейтрали равно нулю; в случае, если система не симметрична, резонансная настройка реактора может вызвать смещение нейтрали, сопровождающееся квазистационарными перенапряжениями резонансного типа. Это является одним из недостатков заземления нейтрали ЭС через ДГР. Смещение нейтрали в нормальном режиме может, в ряде случаев, существенно превышать фазное напряжение. Для снижения напряжения на реакторе в нормальном режиме улучшается симметрия системы, а также вводится некоторая расстройка реактора от резонанса.

При отсутствии в сети с ДГР замыкания на землю напряжение смещения нейтрали допускается не выше 15% фазного напряжения длительно и не выше 30% в течение 1 часа [13, 19]. Пофазные включения и отключения воздушных и кабельных линий, которые могут приводить к напряжению смещения нейтрали, превышающие указанные значения, запрещаются. Согласно ПТЭ [13, п. 2.8.15] допускается настройка ДГР с перекомпенсацией, при которой индуктивная составляющая тока замыкания на землю не превышает 5 А. Данный факт обусловлен трудностями с системами защиты и селективной сигнализации ОЗЗ. Степень расстройки не должна превышать 5%, при большей расстройке увеличивается вероятность возникновения ОДЗ и максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах до  $2,6 \dots 3U_{ф.м}$ .

В ЭС с резонансной компенсацией ЕТЗЗ возникают дополнительные затраты на амортизацию и обслуживание ДГР, а также устройств для автоматического управления настройкой компенсации.

В современных ЭС с резко неоднородной нагрузкой эффективность ДГР с точки зрения компенсации токов замыкания на землю заметно падает, поскольку сетевое напряжение содержит значительное количество высших гармоник, а реактор принципиально компенсирует только промышленную составляющую тока ОЗЗ.

Для сетей с малыми токами замыкания на землю альтернативой является применение нейтральных/заземляющих высокоомных резисторов  $R_N$ .

## 1.3 Заземление нейтрали через резистор

### 1.3.1 Типы резистивного заземления

В последние годы в Российской Федерации начали применять резистивное заземление нейтрали. Резистивный способ заземления нейтрали предложен Петерсенем (так же, как и заземление через ДГК) в начале 20-го века. Доля распределительных ЭС с резистивным заземлением нейтрали составляет порядка 3% (в России это сети 6-35 кВ). Одной из причин столь малой доли сетей с резистивным заземлением является поздний выход седьмого издания ПУЭ [14], официально разрешившего использование нейтрале-заземляющих резисторов, а также некоторые недостатки этого способа, о которых будет отмечено ниже.

Существует два типа резистивного заземления в зависимости от величины протекающего через них тока на землю при нарушении режима работы сети: низкоомное и высокоомное [20].

Отключаемые резисторы (условно - низкоомные). Целью низкоомного резистивного заземления является ограничение токов ОЗЗ [21]. Быстрое отключение по сверхтоку обеспечивается релейной защитой. Несомненно, при этом исключается развитие дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений.

Время работы низкоомного резистора во включенном состоянии составляет обычно 5-10 секунд [22]. Его использование принципиально изменяет саму концепцию создания ЭС с неэффективно заземленной нейтралью, согласно которой потребитель может не отключаться при нарушении фазной изоляции.

Неотключаемый (высокоомный) резистор сопротивлением  $R_N$  в нейтрали ЭС позволяет в паузах между повторными зажиганиями снимать заряд и напряжение с нейтрали сети и, соответственно, снижать интенсивность переходного процесса ОЗЗ и дуговые перенапряжения.

### 1.3.2 Расчёт и выбор нейтрале-заземляющего резистора

Резистор в нейтрали ЭС должен обеспечивать стекание избыточного заряда с нейтрали ЭС за типичное время между пробоями фазной изоляции. Если предположить, что резистора в нейтрали нет (она изолирована от земли), то теоретически предельные перенапряжения (по теории Петерсена) возникают при

повторных пробоях, наступающих с интервалами, равными полупериоду промышленной частоты ( $T_0/2$ ). При меньших интервалах смещение напряжения в нейтрали ЭС меньше и, значит, требования к стеканию остаточного заряда становятся менее жесткими.

Заземляющий резистор  $R_N$  выбирается из условия приблизительного равенства ЕТЗЗ ( $I_C$ ) активному току замыкания на землю  $I_R$  [23], обусловленному включением  $R_N$  в нейтраль электрической сети по формуле (1.4):

$$I_R \cong I_C = \frac{U_{\phi.m}}{R_N} = 3\omega C_{\phi} U_{\phi.m}. \quad (1.4)$$

Однако, установка заземляющего резистора в нейтраль сети приводит к увеличению полного установившегося тока замыкания на землю в режиме устойчивого замыкания. В связи с этим резистивное заземление обладает следующими недостатками:

- ухудшение условий самогашения заземляющей дуги;
- повышенное разрушение изоляции и проводников в месте горения дуги;
- дополнительные потери энергии в нейтрали-заземляющем резисторе при установившемся ОЗЗ;
- снижение электробезопасности и экологичности ЭС.

При типичном выборе резистора из условия  $I_R \cong I_C$  (резистивный коэффициент компенсации  $K_r = I_R/I_C \cong 1$ ) увеличение тока замыкания на землю  $I_3$  составляет  $\sim \sqrt{2}$  раз согласно формуле (1.5):

$$I_3 = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (1.5)$$

Высокоомный резистор практически не влияет на разрядную и перезарядную составляющие тока замыкания, т.к. его сопротивление много больше, чем индуктивное сопротивление типичных мощных понизительных трансформаторов 32...63 МВА для наиболее вероятного диапазона частот собственных колебаний в перезарядном контуре эквивалентной схемы замещения ЭС.

Стоит отметить, что одним из преимуществ резистивного заземления нейтрали ЭС является незначительное снижение пика гашения [9], что способствует уменьшению вероятности возникновения повторных зажиганий дуги. Степень снижения ( $K$ ) при  $K_r \approx 1$  вычисляется по формуле (1.6):

$$K \approx 1 - \exp\left(-\frac{\omega\pi}{\beta_1}\right), \quad (1.6)$$

где  $\beta_1$  - круговая частота свободных колебаний в контуре прямой последовательности,  $\beta_1=(L_s C_1)^{-0.5}$ ,  $C_1$  – емкость сети для этой последовательности,  $L_s$  – эквивалентная индуктивность источника. Для промышленной частоты ( $\omega=100\pi$ ) и наиболее вероятного диапазона частоты  $\beta_1=1\dots 5$  кГц -  $K=0,145\dots 0,03$ . При первичном пробое фазной изоляции напряжение пика гашения составляет, как правило,  $U_{п.г.}=0.3\dots 0.5U_{ф.м.}$

Одновременно с пиком гашения уменьшается и скорость нарастания напряжения на повреждённой фазе, позволяя дополнительно снизить вероятность повторного пробоя изоляции поврежденной фазы.

При заземлении нейтрали через ДГР также снижается вероятность повторного пробоя; отличием является то, что напряжение пика гашения и скорость восстановления практически не меняются (ввиду большого индуктивного сопротивления ДГР при частотах  $\beta_1=1\dots 5$  кГц). Но реактор длительное время после самогашения дуги позволяет сохранять низкое напряжение  $U=U_{п.г.}/2$  практически промышленной частоты при  $K_L=I_L/I_C \cong 1$ .

В случае устойчивого («металлического») замыкания нейтрали-заземляющий резистор может работать длительное время. При таком режиме заземления нейтрали и малом токе замыкания есть возможность работы сети с ОЗЗ в течение времени поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом [24]. На практике время поиска может занять до нескольких суток; при таком режиме работы требуется резистор большой номинальной мощности, материалоемкости и стоимости. В ЭС происходит увеличение установившегося тока замыкания на землю, приводящего к снижению электробезопасности, экологичности, ухудшению условий самогашения дуги, повышенному разрушению изоляции и оборудования в месте повреждения, потерям электроэнергии. Также при длительной работе резистора в закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) происходит его разогрев, что увеличивает пожароопасность [25].

Таким образом, основными достоинствами резистивного высокоомного заземления являются:

- отсутствие дуговых перенапряжений высокой кратности и снижение вероятности многоместных повреждений в ЭС;
- исключение феррорезонансных процессов, соответствующих перенапряжений и повреждений измерительных трансформаторов напряжения;
- побочным положительным эффектом является улучшение условия выделения поврежденного фидера благодаря увеличенному току ОЗЗ.

Основной причиной применения высокоомного резистивного заземления, послужили высокие кратности дуговых перенапряжений, присущие изолированной нейтрали. Однако из-за приведенных выше недостатков, высокоомное резистивное заземление используется крайне редко.

Перечисленные недостатки можно устранить посредством предложенного и запатентованного способа импульсного резистивного заземления нейтрали (ИРЗ) [26-33].

#### **1.4 Задача работы**

Высокоомное резистивное заземление нейтрали позволяет снизить дуговые перенапряжения и, как сопутствующий положительный эффект - повысить селективность выбора поврежденного фидера. Но ток замыкания на землю возрастает в  $\sqrt{2}$  раз, что приводит к появлению существенных недостатков этого способа заземления (см. п.п. 1.3.2).

Несмотря на простоту и дешевизну (по сравнению с заземлением нейтрали ЭС через ДГР) данным способом заземления зачастую пренебрегают. Высокоомное резистивное заземление требует переосмысления и доработки. В связи с этим в задачи работы входит доказать преимущества нового способа импульсного резистивного (высокоомного) заземления перед постоянным.

## ГЛАВА 2 ТЕОРИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

### 2.1 Импульсное резистивное заземление нейтрали электрической сети

#### 2.1.1 Концепция импульсного резистивного заземления нейтрали электрической сети

На кафедре ТЭВН НГТУ разработано устройство импульсного резистивного заземления нейтрали ЭС. Принцип его работы заключается в подключении нейтрали-заземляющего резистора посредством некоторого управляемого ключа только при дуговых неустойчивых (перемежающихся) замыканиях на землю, а при устойчивых замыканиях он автоматически отключается от контура заземления станции или подстанции [26]. Таким образом, в случае однофазного замыкания на землю сеть продолжает работать некоторое время (до момента обнаружения места замыкания и устранения повреждения).

Алгоритм работы импульсного резистивного заземления можно представить следующим образом: сеть в нормальном режиме работает с изолированной нейтралью, в случае неустойчивого дугового замыкания на землю (ОДЗ) она автоматически переходит в режим резистивного заземления. В режиме устойчивого однофазного замыкания на землю (УОЗЗ) сеть возвращается обратно на работу с изолированной нейтралью.

#### 2.1.2 Принцип работы устройства импульсного резистивного заземления нейтрали электрической сети

Управление режимами заземления нейтрали ЭС возможно благодаря способности устройства «различать» устойчивые однофазные замыкания на землю (УОЗЗ) и неустойчивые (ОДЗ).

Остановимся подробнее на механизме работы устройства. Система запуска ключа ИРЗ реагирует на производную (скорость изменения) напряжения на нейтрали ЭС. При устойчивом (близком к «металлическому») ОЗЗ (УОЗЗ) производная синусоидального напряжения  $du_N/dt$  на нейтрали реальной сети приблизительно равна произведению угловой частоты ( $\omega$ ) на максимальное фазное напряжение  $U_{ф.м}$ .



Принимая изменение напряжения по синусоидальному закону по формуле (2.1):

$$u_N(t) \cong U_{\phi.m} \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

тогда

$$\frac{du_N(t)}{dt} \cong U_{\phi.m} \omega \cos(\omega t), \quad (2.2)$$

или представляя (2.2) в относительных единицах, полагая  $U_{\phi.m}=1$  о.е., производная напряжения будет определяться по формуле (2.3):

$$\frac{du_N(t)}{dt} \cong \omega \cos(\omega t). \quad (2.3)$$

Максимальное значение производной при устойчивом ОЗЗ и частоте сети 50 Гц  $du_N/dt_m=\omega$ , т.е. будет находиться в районе  $\sim 100\pi$  о.е./с.

Но, как было отмечено в п. 1.1, 90% замыканий на землю протекают неустойчиво с перемежающейся дугой. Рассмотрим процессы при дуговом замыкании в простейшей сети, приведенной на рисунке 2.1, где  $L_s$  и  $E_\phi$  представляют эквивалентный источник;  $L_\phi$ ,  $C_\phi$ ,  $C_{мф}$  – фазные индуктивность и емкость, а также междуфазная ёмкость эквивалентной Г-образной линии.

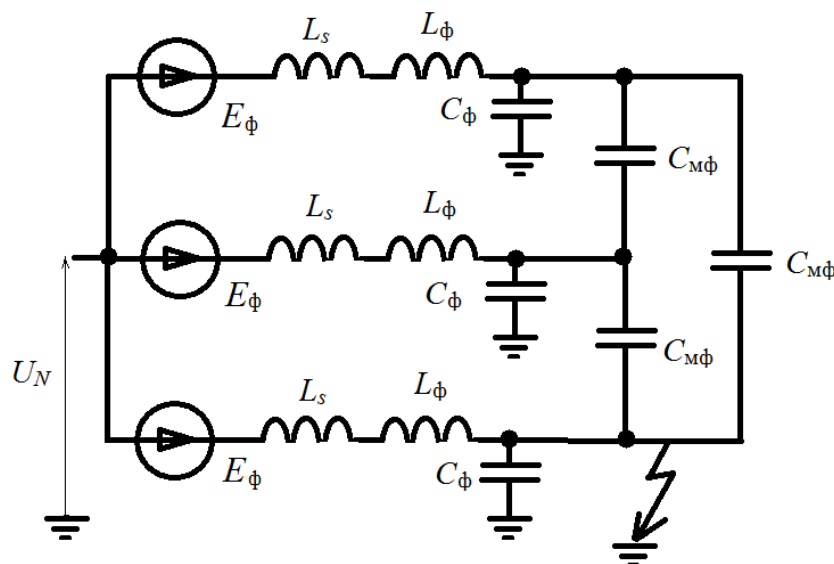


Рисунок 2.1 – Схема замещения сети с однофазным замыканием на землю

Производная напряжения в режиме неустойчивого замыкания много больше, чем при устойчивом. Скорость изменения напряжения на нейтрали сети после замыкания фазы на землю зависит от параметров сети и удалённости места замыкания от центра питания.

При зажигании дуги напряжение на нейтрали ЭС содержит быстрые перепады/скачки, что обусловлено наличием в нем широкого спектра свободных

колебаний высших частот, вызываемых пробоями изоляции. Фронт напряжения  $u_N(t)$  формируют основные частоты свободных колебаний [34] - частоты  $\beta_1, \beta_2$ . Первая частота  $\beta_1$  определяется перезарядными процессами ёмкостей неповрежденных фаз по формуле (2.4):

$$\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{1.5(L_S + L_\Phi)^2(C_\Phi + C_{M\Phi})}} \quad (2.4)$$

Вторая ( $\beta_2$ ) обусловлена разрядом фазной ёмкости поврежденной линии через землю, канал дуги и индуктивность поврежденной фазы (разрядный контур поврежденной фазы).

Способ неэффективного заземления нейтрали ЭС практически не влияет на частоты собственных колебаний тока замыкания. Так для воздушных сетей частота колебаний ( $\beta_1$ ) находится в диапазоне 250 – 1000 Гц. Меньшие значения наблюдаются в неразветвленных сетях с длинными линиями, большие - для разветвленных сетей с короткими кабельными линиями. Частоты свободных колебаний ( $\beta_1$ ) в кабельных сетях, как правило, в разы превосходят частоты в воздушных сетях и составляют 1000 – 3000 Гц [9]. Это следствие, главным образом, несоизмеримо меньшей индуктивности кабелей, хотя они одновременно обладают заметно большей ёмкостью.

Очевидно, что значение производной при однофазном дуговом замыкании  $du_N/dt_{\text{ОДЗ}}$  (рисунок 2.2) значительно больше производной при устойчивом замыкании  $du_N/dt_{\text{УОЗ}}$ . Данное условие является обязательным для селективной работы устройства импульсного (резистивного) заземления, т.е. должно выполняться неравенство  $du_N/dt_{\text{ОДЗ}} > du_N/dt_{\text{УОЗ}}$ .

В момент зажигания и последующего горения заземляющей дуги (соединения фазного провода с землей через переходное сопротивление канала дуги) происходит быстрый рост напряжения на нейтрали электрической сети  $u_N$ , поэтому формируется достаточное запускающее напряжение  $du_N/dt$ . Возникший и протекающий в заземляющем резисторе ток  $i_N$  приводит к экспоненциальному снижению напряжения на нейтрали сети.

После установления устойчивого замыкания, начиная с момента времени  $t_y$  (рисунок 2.2), напряжение на нейтрали сети  $u_N = u_{\text{устан}}$  имеет форму близкую к синусоидальной, ключ запирается, сеть переходит в режим изолированной нейтрали,

напряжение к нейтрале-заземляющему резистору не прикладывается, и ток замыкания на землю определяется только его емкостной составляющей.

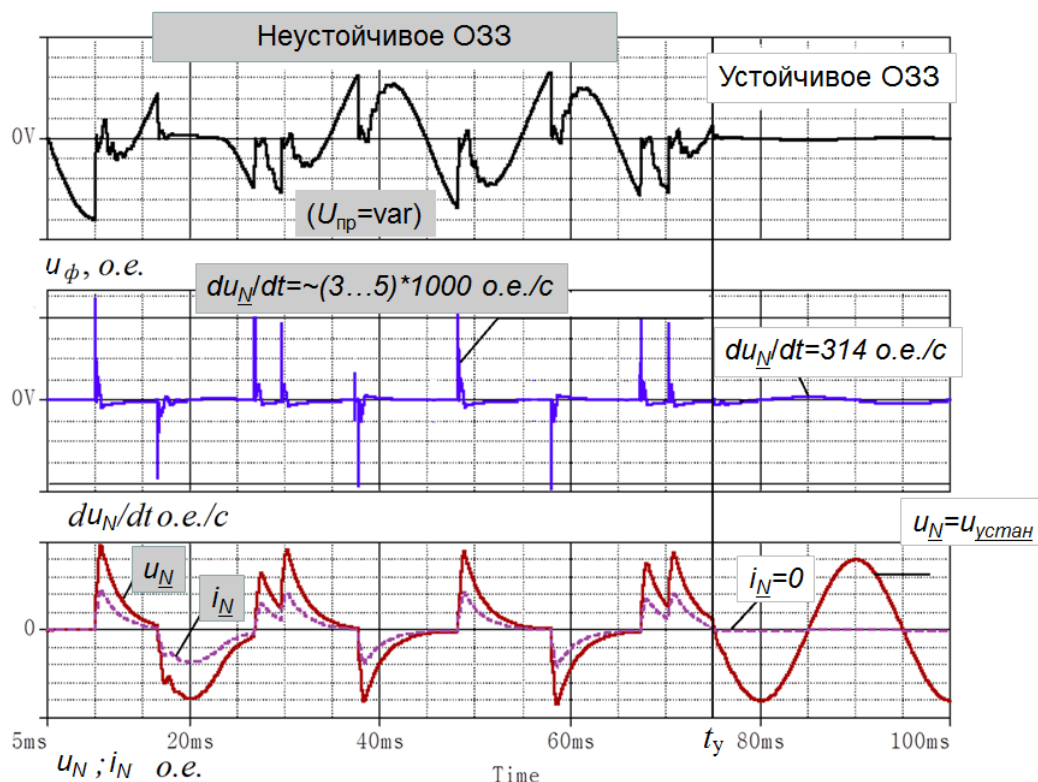


Рисунок 2.2 - Процесс дугового замыкания с повторными пробоями (неустойчивое ОЗЗ), значение производной напряжения на нейтрали ЭС ( $du_N/dt$ ), напряжение на нейтрали ( $u_N$ ) и ток в резисторе ( $i_N$ ), а также вид процессов при устойчивом ОЗЗ (устойчивое ОЗЗ)

### 2.1.3 Первый прототип импульсного резистивного заземления

Как было отмечено выше, запускающий ключ должен своевременно реагировать на скачкообразный рост напряжения на нейтрали ЭС, подключая нейтрале-заземляющий резистор только при неустойчивом ОЗЗ (т.е. при ОДЗ).

Простейшей современной реализацией такого ключа может выступать высоковольтный полупроводниковый симметричный тиристор (симистор).

Симисторы имеют пятислойную структуру, три электрода и симметричную вольт-амперную характеристику [35, 36]. Открытие симистора происходит управляющими сигналами, подаваемыми на управляющий электрод. В отличие от тиристоров они имеют возможность проводить ток в двух направлениях, поэтому на них можно подавать переменное напряжение. Важнейшими параметрами тиристор/симисторов являются: импульсное повторяющееся напряжение в

закрытом состоянии ( $U_{DRM}$ ), средний ток ( $I_{TRMS}$ ), напряжение в открытом состоянии ( $U_{T(TO)}$ ), ток отпирания ( $I_L$ ), ток удержания ( $I_H$ ), импульсный ток ( $I_{TSM}$ ), время включения ( $t_{gt}$ ) и отключения ( $t_{gd}$ ).

Запускающий ток симистора формируется посредством дифференцирующе-запускающей цепи (ДЗЦ). В простейшем случае это может быть дифференцирующая  $RC$ -цепочка в соответствии с рисунком 2.3, а, подключённая между нейтралью сети и контуром заземления подстанции/станции, или  $LC$ -контур (рисунок 2.3,б,в). При скачкообразном изменении напряжения на нейтрали ЭС ДЗЦ формирует импульс напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора, а напряжение вторичной обмотки управляет симисторным ключом – цепью последовательно соединенных полупроводниковых приборов. Время подключения нейтрале-заземляющего резистора к контуру заземления (подстанции) складывается из времени подъема напряжения на нейтрали сети до некоторого порогового значения достаточного для включения симисторов и времени перехода всей цепочки симисторов в открытое состояние.

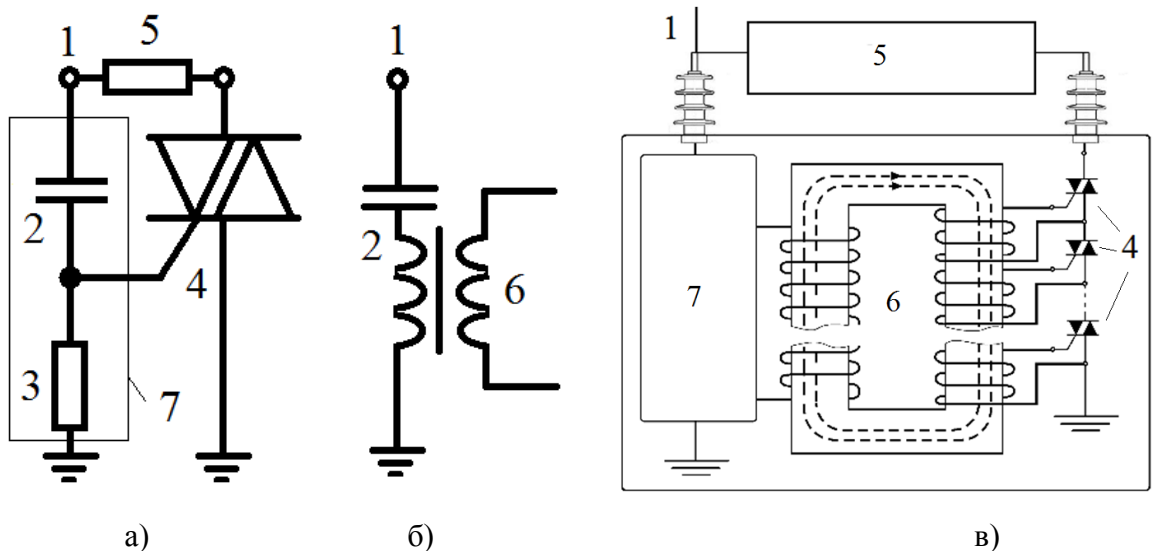


Рисунок 2.3 - Схема импульсного-резистивного заземляющего устройства нейтрали сети (а), дифференцирующая цепь (б), внешний вид ИРЗ (в); (1- вывод для подключения к нейтрали сети, 2 – ёмкость конденсатора ДЗЦ ( $C_d$ ), 3 – сопротивление резистора ДЗЦ ( $R_d$ ), 4 – симисторная последовательная цепь, 5 – нейтрале-заземляющий резистор  $R_N$ , 6 - запускающий (импульсный) трансформатор, 7 - дифференцирующая цепь)

### 2.1.4 Устройство импульсного резистивного заземления без системы управления запуском

Протейшая ДЗЦ в виде  $LC$ -контура показана на рисунке 2.3, б. Однако такая схема имеет серьёзный недостаток: из-за естественного разброса напряжений пробоя фазной изоляции существует вероятность незапуска одного или нескольких симисторов. Действительно, напряжение пробоя варьируется в широком диапазоне -  $U_{пр} \in [0; \sim 2U_{ф.м}]$ , поэтому и импульсные напряжение/ток запуска симисторов также принципиально меняется от некоторого максимального до минимального (по модулю). На рисунке 2.4, а изображена осциллограмма импульса  $u_3$ , при котором происходит срабатывание 5-ти одинаковых симисторов с разной чувствительностью (см. П.1.3). Чувствительность симисторов, определяемая значением тока управления  $I_{gt}$ , заметно различается, и возможна ситуация невключения одного или нескольких приборов: самая неблагоприятная – невключение одного симистора. При этом на данный симистор через нейтрале-заземляющий резистор будет прикладываться все напряжение между нейтралью ЭС и землёй. Каждый симистор может быть защищён от перенапряжений варистором относительно малой мощности – будем называть его «защитный варистор». При длительном протекании по нему тока он перегревается и может выйти из строя. Это приведет к потере защиты от перенапряжений одного из симисторов, его пробоем и выходу из строя всего устройства.

Предположим ситуацию, когда напряжение на нейтрали сети после самопогасания дуги равно половине фазного амплитудного значения ( $U_0 = 0,5U_{ф.м}$ ). Если в последовательной цепи симисторов не открылся один, то к нему прикладывается всё это напряжение, оно же ограничивается защитным варистором до требуемого уровня. Максимальное напряжение на симисторе для его надежной (устойчивой) работы не должно, приблизительно, превышать  $\sim 0,8U_{DRM}$ . В случае невключения одного симистора, напряжение на нейтрали сети будет снижаться (по модулю) до остающегося напряжения на одном из защитных варисторов. Поскольку дифференциальное сопротивление защитного варистора ( $R_{д.вар}$ ) много меньше сопротивления ( $R_N$ ) нейтрале-заземляющего резистора (см. рисунок 2.4, б), и в

области рабочих токов защитного варистора можно грубо положить  $U_{var}=\text{const}$ , ток через защитный варистор будет изменяться по закону (2.5):

$$i_{var}(t) \cong (U_0 - U_{var}) e^{\frac{-t}{3R_N C_\phi}}. \quad (2.5)$$

Энергия, выделившаяся в защитном варисторе за одно повторное зажигание заземляющей дуги, составит согласно (2.6):

$$E_{var} = U_{var} \int_0^{\frac{T_0}{2}} i_{var}(t) dt, \quad (2.6)$$

или после интегрирования (2.6) получим формулу (2.7):

$$E_{var} = \frac{U_{var}(U_0 - U_{var})}{R_N} \frac{(1 - e^{-\pi})}{\omega} \cong \frac{U_{var}(U_0 - U_{var})}{\omega R_N}. \quad (2.7)$$

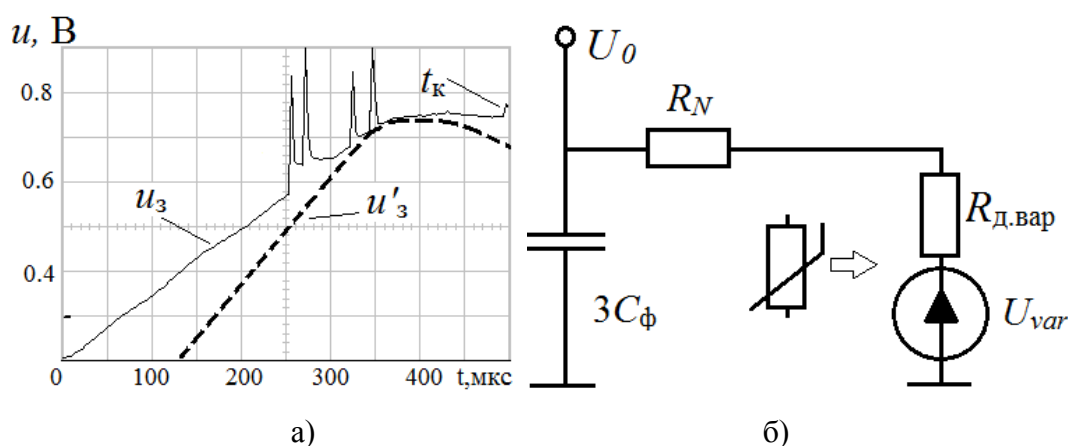


Рисунок 2.4 - Осциллограммы импульса напряжения запуска симисторов (а). Всплески на осциллограмме соответствуют моментам открытия симисторов,  $t_k$  – момент открытия последнего симистора; б) - схема для расчёта энергии в защитном варисторе.

Незаниженная оценка этой энергии для симистора, например с напряжением  $U_{DRM}=1,2$  кВ ( $U_{ном}=10$  кВ, ЕТЗЗ  $I_C=20$  А,  $K_R=1$ ,  $U_{var}=0,8$  кВ,  $U_{DRM}=0,96$  кВ,  $U_0=0,5U_{\phi,m}$ ), равна  $E_{var}=33$  Дж. В предположении стократного срабатывания в течение одной секунды (повторяющиеся неустойчивые ОДЗ) рассеиваемая в варисторе мощность составит 3.3 кВт. Хотя рассматриваемое событие крайне маловероятно, требование к рассеиваемой мощности очень жёсткое: реально допустимые мощности варисторов (единицы Вт) на много порядков меньше максимального расчётного значения, указанного выше.

При повышении чувствительности симисторов путем снижения тока управления и повышении энергии управления, подводимой через ДЗЦ, требования к энергоёмкости/мощности защитных варисторов снижаются благодаря снижению

напряжения на нейтрали ЭС, при котором возможен незапуск одного из симисторов. Незначительное повышение чувствительности симисторов возможно путем их подбора из большой партии, что достаточно трудоемко. Увеличение энергии запуска симисторов возможно путем увеличения ёмкости конденсатора ДЗЦ. Однако при этом ухудшаются дифференцирующие свойства цепи и увеличиваются требования к габаритам устройства ИРЗ.

Нечувствительность устройства ИРЗ к невключению одного из симисторов принципиально наступает тогда, когда невключение происходит при напряжении на нейтрали ЭС меньшем, чем защитный уровень варистора, т.е. когда  $U_0 < 0.8U_{DRM}$ . В этом случае невключение одного симистора не приведет к появлению значительного тока в защищающем его варисторе.

Оценим ток, необходимый для запуска всех симисторов в цепи. Он должен превышать  $I_{gt}$ , т.е.  $I_{зап} \geq I_{gt}$ .

### 2.1.5 Методика расчёта тока в запускающей цепи симистора

Найдём аналитически (приближенно) ток, протекающий в цепи управления симистора. Примем, что  $L_{p.сумм} = L_s + L_{p.и}$  - суммарная индуктивность рассеяния питающего/силового и импульсного запускающего трансформаторов. Для этого по закону Ома в операторной форме определим ток в эквивалентной схеме замещения, показанной на рисунке 2.5 по формуле (2.8 и 2.9):

$$I_{зап}(p) = \frac{U_0(p)}{pL_{p.сумм} + \frac{1}{pC_d} + R_э}, \quad (2.8)$$

$$R_э = R_{ВН} + R_{НН}K_T n, \quad (2.9)$$

где  $R_э$  - эквивалентное сопротивление первичной и вторичной обмоток запускающего трансформатора;  $R_{НН}$ ,  $R_{ВН}$  - сопротивление вторичной и первичной обмоток ЗТ;  $n$  - количество симисторов;  $K_T$  - коэффициент трансформации запускающего трансформатора.

Для линейно нарастающего на нейтрали ЭС напряжения  $u(t) = K_{имп}t$ ,  $U_0(p) = K_{имп}/p^2$ , тогда после упрощения (2.8) получим уравнение (2.10):

$$I_{зап}(p) = \frac{K_{имп}pC_d}{p\left(\frac{p^2}{\beta^2} + p\tau + 1\right)}, \quad (2.10)$$

где  $K_{имп}$  - крутизна фронта импульса напряжения;  $\tau = R_эC_d$  - постоянная времени.

Тогда частота свободных колебаний определяется по формуле (2.11):

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{L_{p.сумм}C_d}} \quad (2.11)$$

Точный расчёт индуктивности рассеяния  $L_s$  требует достоверной информации о конструкции трансформатора и его обмотках. В качестве приближенного значения можно принимать индуктивность, определенную на основе напряжения короткого замыкания. Следует, однако, отметить, что для рассматриваемого случая индуктивность рассеяния силового трансформатора оказывает минимальное влияние на процессы в ДЗЦ вследствие значительной индуктивности рассеяния импульсного запускающего трансформатора  $L_{p.и}$  (т.е.  $L_{p.и} \gg L_s$ ), которая определяется экспериментально.

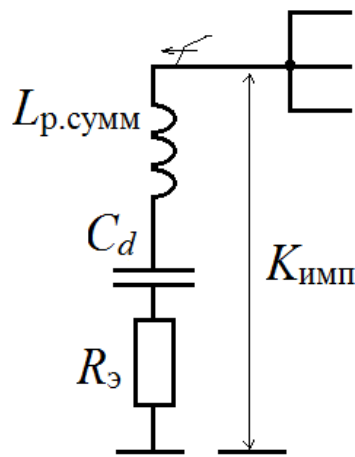


Рисунок 2.5 - Схема замещения дифференцирующей цепи и запускающего трансформатора

Переходя во временную область, решение запишется согласно (2.12):

$$i_{зап}(t) = \left( 1 + \frac{1}{\beta^2\tau^2 - 4} \left( e^{-\frac{1}{2}t\tau\beta^2} \left( (-\beta^2\tau^2 + 4) \left( e^{\frac{1}{2}t\sqrt{\beta^2(\beta^2\tau^2 - 4)}} + e^{-\frac{1}{2}t\sqrt{\beta^2(\beta^2\tau^2 - 4)}} \right) / 2 - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \tau\sqrt{\beta^2(\beta^2\tau^2 - 4)} \left( e^{\frac{1}{2}t\sqrt{\beta^2(\beta^2\tau^2 - 4)}} - e^{-\frac{1}{2}t\sqrt{\beta^2(\beta^2\tau^2 - 4)}} \right) / 2 \right) \right) \right) K_{имп} C_d. \quad (2.12)$$

Интерес представляет максимальный ток в  $RLC$ -цепи, достигаемый спустя полупериод свободных колебаний, его можно определить по формулам (2.13-2.16):

$$I_{зап.мах} = I_{мах} \left( 1 + e^{-\frac{\delta\pi}{\beta'}} \right); \quad (2.13)$$

$$I_{мах} = K_{имп} C_d; \quad (2.14)$$

$$\beta' = \sqrt{\beta^2 - \delta^2}; \quad (2.15)$$



$$\delta = \frac{R_{\Sigma}}{2L_{p.сумм}}; \quad (2.16)$$

где,  $\delta$  – коэффициент затухания,  $\beta'$  - частота свободных колебаний с учётом затухания. Для приближенных расчётов достаточно принять  $\beta = \beta'$ .

Ток в управляющей цепи симистора можно определить по формуле (2.17):

$$I = \frac{I_{зап.мах} K_T}{n}. \quad (2.17)$$

Найдем ток запуска симистора при условии его работы в устройстве, предназначенном для ЭС 10 кВ. Как было отмечено в п.2.1.2, в среднем перезарядная частота колебаний  $\beta_1/2\pi$  составляет 1 кГц. Примем, что амплитуда импульса напряжения пришедшего на нейтраль сети при ОДЗ, составляет  $U_{ф.м.}$  Крутизна фронта [37] эквивалентного импульса представленного синусоидой частотой 1 кГц, может быть определена согласно формуле (2.18):

$$K_{имп} \approx \frac{0.6U_{ф.м}\beta_1}{0.815}. \quad (2.18)$$

При принятых параметрах ДЗЦ  $L_{p.сумм}=0.1$  Гн, коэффициент трансформации трансформатора ( $K_T=12$ ), и количестве симисторов  $n=11$  ток в управляющей цепи составит  $I=164$ мА. Условие  $I > I_{gt}$  выполняется  $I_{gt}=150$  мА, однако для  $n=12$  ток запуска уже приближается к критическому значению и может оказаться недостаточным.

### 2.1.6 Энергия, выделяемая в нейтрале-заземляющем резисторе

Преимуществом импульсного резистивного заземления является уменьшение вреда, наносимого токоведущим частям и фазной изоляции за счёт меньшего тока в установившемся режиме ОЗЗ в месте замыкания, а также в снижении потерь в самом нейтральном резисторе.

Сравним количество энергии, выделенной в резисторе при установившемся режиме ОЗЗ и в режиме перемежающегося дугового замыкания. Примем  $K_R=1$ , тогда постоянная времени убыли напряжения нулевой последовательности при неустойчивых замыканиях равна  $\tau=1/\omega$ . Относительная энергия в нейтрале-заземляющем резисторе с некоторым условным сопротивлением  $R_N=1$  Ом, выделяемая в течение полупериода промышленной частоты  $\pi/\omega$  после самогашения заземляющей дуги, определяется по формуле (2.19):

$$E_{\text{ИРЗ}} = \int_0^{\pi} (U_{N0} e^{-\omega t})^2 dt = \frac{U_{N0}^2 (1 - e^{-2\pi})}{2\omega} \cong \frac{U_{N0}^2}{2\omega}, \quad (2.19)$$

где  $U_{N0}$  – теоретическое максимальное начальное напряжение на нейтрали сети по отношению к фазному максимальному значению ( $U_{\phi.m}$ ) после самогашения заземляющей дуги.

Относительная энергия, выделяемая при устойчивом («металлическом») замыкании на землю при напряжении в сети  $U_{\phi.m}=1$  о.е. и постоянно включённом заземляющем резисторе, определяется по (2.20) как:

$$E_R = \int_0^{\pi} \sin^2 \omega t dt = \frac{\pi}{2\omega}, \quad (2.20)$$

а соотношение энергий может быть определено по формуле (2.21):

$$\frac{E_{\text{ИРЗ}}}{E_R} = \frac{U_{N0}^2}{\pi}. \quad (2.21)$$

Теоретически максимальное напряжение на нейтрали сети, определяемое напряжением на неповрежденных фазах после погасания заземляющей дуги при первом переходе высокочастотной (перезарядной) составляющей тока через нулевое значение, оценивается по (2.22) без учета затухания как:

$$U_{N0} = \frac{2}{3} \left[ 1.5 U_{\phi.m} + U_{\phi.m} \frac{C_{\phi}}{C_{\phi} + C_{\text{мф}}} \right], \quad (2.22)$$

и для типичных соотношений  $C_{\text{мф}}/C_{\phi}=0.25\dots 0.3$  равно  $U_{N0}=1.51\dots 1.53$  о.е. [30]. Приближенно принимая  $U_{N0}=1.5$  о.е., отношение энергий по (2.21) равно:

$$\frac{E_{\text{ИРЗ}}}{E_R} = \frac{1.5^2}{\pi} = 0.72. \quad (2.23)$$

Таким образом, при импульсном заземлении нейтрали ЭС через резистор  $R_N$ , рассеиваемая в нем мощность согласно (2.23), как минимум, на 28% меньше, чем при его постоянном подключении к нейтрали сети.

В реальных сетях в силу потерь как в самой сети, так и в дуговом канале заземляющей дуги среднее начальное смещение напряжения на нейтрали сети заметно меньше теоретически максимального значения, оно составляет (в относительных единицах) приблизительно  $U_{N0} \approx 1$  [38]. Поэтому требуемая мощность заземляющего резистора  $R_N$  при импульсном заземлении составляет лишь ~32% по отношению к мощности, требуемой при его постоянном включении.

При длительном горении заземляющей дуги напряжение пробоя изоляции и, соответственно, начальное напряжение на нейтрали сети заметно снижаются, и соотношение энергий  $\frac{E_{ИРЗ}}{E_R}$  становится еще меньше, но при условии, что сохраняется пауза между пробоями - около одного полупериода промышленной частоты. При частых пробоях изоляции (т.е. при малых напряжениях пробоя) с паузами менее полупериода  $\frac{E_{ИРЗ}}{E_R}$  повышается.

## 2.2 Производная напряжения на нейтрали электрической сети

Скорость изменения напряжения на нейтрали ЭС при неустойчивом ОДЗ в зависимости от ее параметров (мощности источника, нагрузки, протяженности линий) и удаленности замыкания от центра питания изменяется в широких пределах. Приближенно можно оценить производную, зная частоты собственных колебаний сети при однофазном замыкании. Поскольку распределительные сети содержат длинные линии, в общем случае, переходные процессы в них имеют волновой характер. Однако, согласно [9] для грубого расчёта частотных характеристик подходят упрощенные схемы замещения, где линии представлены сосредоточенными элементами. Оценим частотные характеристики сетей 6-35 кВ.

### 2.2.1 Частоты собственных колебаний в радиальной сети

Радиальная распределительная сеть содержит пункт (центр) питания (понижающую подстанцию) и питающие линии (фидера), подключаемые к понижающим трансформаторам на трансформаторных подстанциях (рисунок 2.6, а).

При замыкании на одной из отходящих линий в сети возникает переходный процесс, связанный с перезарядом емкостей неповрежденных фаз и разрядом емкости поврежденной фазы [39] через канал дуги (рисунок 2.6, б). Схема замещения сети в которой линии представлены эквивалентной Т - схемой, соответствующая режиму разряда емкости неповрежденных фаз [40] представлена на рисунке 2.6, б. Поврежденная линия и нагрузка моделируются элементами  $L_n$ ,  $L_{\phi}$ ,  $C_{мф}$ ,  $C_{\phi}$ .

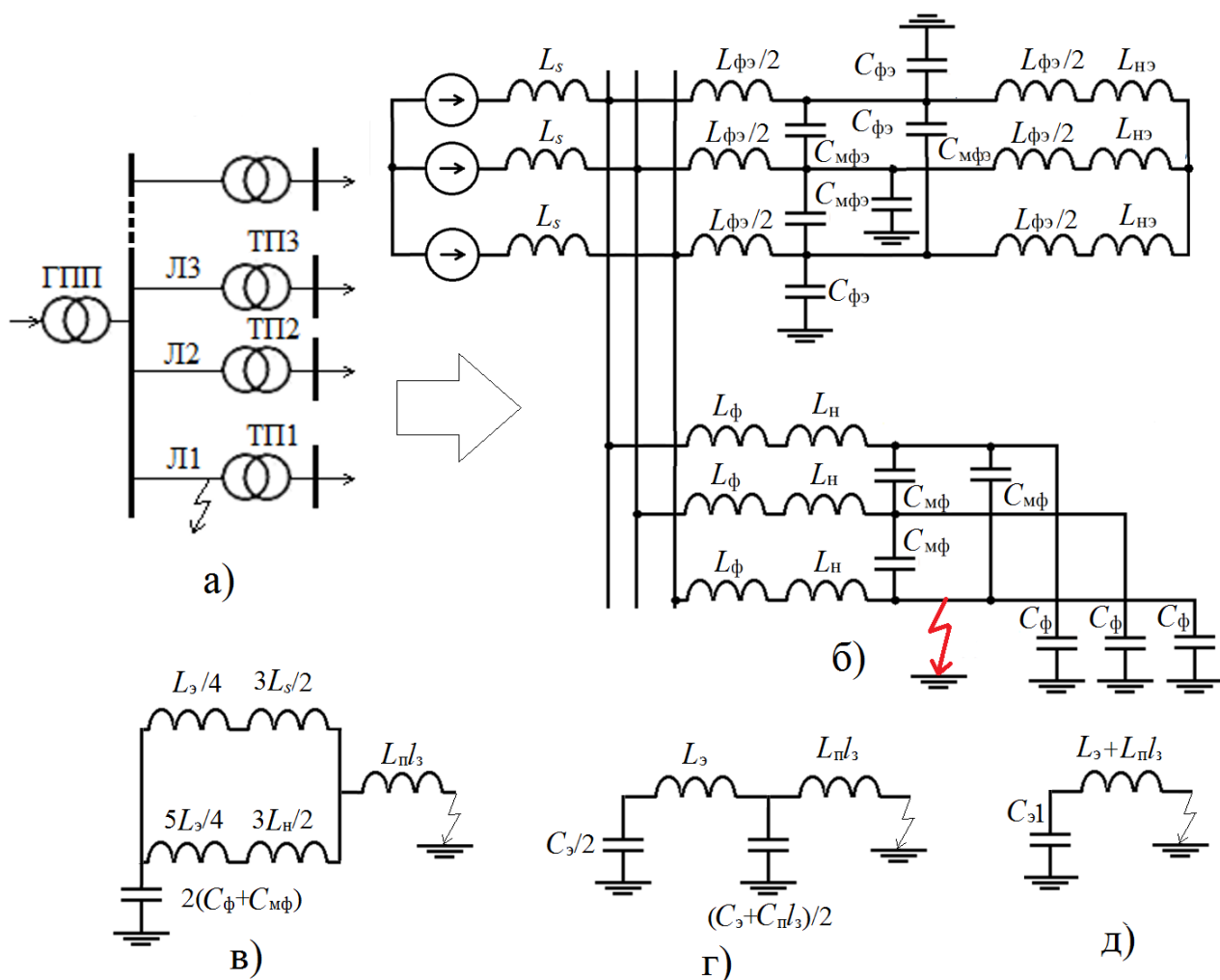


Рисунок 2.6 - Простейшая радиальная распределительная сеть 6-35 кВ (а), схема сети с выделенной поврежденной линией (б), эквивалентная схема для определения низшей частоты свободных колебаний (в), схемы замещения при разряде емкости поврежденной фазы (г, д)

При пренебрежении током, протекающим через место повреждения со стороны нагрузки поврежденного фидера, который в большинстве случаев много меньше, чем ток разряда, протекающий через источник и эквивалентную нагрузку, низшая («перезарядная») частота свободных колебаний может быть определена по упрощенной схеме согласно рисунку 2.6, в по формуле (2.24):

$$\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{2L(C_\phi + C_{мф})}}, \quad (2.24)$$

где

$$L = \frac{(3L_s/2 + L_\phi/4)(3L_n/2 + 5L_\phi/4)}{3(L_s + L_\phi + L_n)/2} + L_n l_3, \quad (2.25)$$

$L_n$  - эквивалентные индуктивности источника и нагрузки;

$l_3$  – относительное (отнесенное к длине поврежденного кабеля) расстояние от шин питающей подстанции до места замыкания;

$L_3$  и  $L_n$  – эквивалентная индуктивность неповрежденных линий и фазная индуктивность поврежденной линии, соответственно.

Вторая более высокая частота  $\beta_2$  собственных колебаний напряжения обусловлена разрядом собственной фазной емкости поврежденной фазы (см. п. 2.1.2.). На рисунке 2.6, г изображена эквивалентная схема, соответствующая этому процессу, в которой симметричной эквивалентной П – схемой представлены неповрежденные линии ( $L_3$  и  $C_3$  – параметры этой линии) и Г- схемой представлена поврежденная линия. После упрощения - преобразования схемы изображенной на рисунке 2.6 г, к одночастотному контуру (рисунок 2.6, д), где:

$$C_{\text{э}1} = \frac{L_3 C_3 + 2C_3 L_n l_3 + C_n L_n l_3^2}{2(L_3 + L_n l_3)} \quad (2.26)$$

частоту  $\beta_2$  можно приближенно определить, согласно (2.27), следующим образом:

$$\beta_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{L_3 C_3 + 2C_3 L_n l_3 + C_n L_n l_3^2}}, \quad (2.27)$$

где  $C_n$  - фазная емкость поврежденной линии.

Из выражений (2.25) и (2.26) видно, что частота собственных колебаний зависит от расстояния до места замыкания. Однако эта зависимость слабо проявляется из-за того, что индуктивность источника и нагрузки много больше, чем индуктивность поврежденной фазы (т.е.  $L_s \gg L_n$ ,  $L_n \gg L_n$ ). Кроме того, частота колебаний в значительной степени определяется нагрузкой ( $L_n$ ).

Зависимость второй собственной частоты от расстояния до места замыкания проявляется в большей степени, чем первой, особенно, при подключении к шинам источника малого количества линий небольшой протяженности и значительной протяженности поврежденной линии. На значение частоты  $\beta_2$  очень слабо влияют параметры источников и нагрузки. Частотозадающими параметрами выступают как фазная индуктивность поврежденной части кабеля (от начала линии до места замыкания), так и емкость этой части (в меньшей степени) - соответствующие коэффициенты  $L_n l_3$  и  $C_n l_3$ .

## 2.2.2 Оценка параметров радиальной распределительной сети и производной $du_N/dt$

Городские и сельские распределительные сети, сети собственных нужд ТЭС имеют сложную древовидную топологию. Однако частотные свойства каждой ветви при увеличении расстояния от центра питания (понижительной подстанции) до места замыкания остаются, принципиально, такими же, как и для одиночного фидера, т.е. частота собственных колебаний  $\beta_2$  понижается.

Оценим зависимость производной напряжения в нейтрали сети от длины линии [41]. Данные погонных параметров линий приведены в табл. 2.2, расчёт произведен для среднестатистического трехжильного кабеля с поясной изоляцией сечением 95 мм<sup>2</sup> [42]. Зная зарядные токи  $I_{зар}$  и токи замыкания  $I_3$  для разных напряжений (табл. 2.1), находят ёмкость прямой последовательности кабеля  $C'_1$ , фазная и междуфазная ёмкости согласно формулам (2.28-2.30):

$$C'_1 = \frac{I_{зар}}{\omega U_{ф.м}}, \quad (2.28)$$

$$C_\phi = \frac{I_3}{3\omega U_{ф.м}}, \quad (2.29)$$

$$C_{мф} = \frac{C'_1 - C_\phi}{3}. \quad (2.30)$$

Таблица 2.1 - Значения зарядного тока и тока ОЗЗ для кабеля 95 мм<sup>2</sup>

Напряжение	6 кВ		10 кВ		35 кВ	
Параметр	$I_{зар}$ , А/км	$I_3$ , А/км	$I_{зар}$ , А/км	$I_3$ , А/км	$I_{зар}$ , А/км	$I_3$ , А/км
	0.51	0.82	0.96	1	1.4	4.1

Индуктивность прямой последовательности кабеля  $L_1$  найдем согласно справочным данным приведённым в [43] табл. 2.2 по формулам (2.31,2.32):

$$L_1 = L_\phi - L_{\phi\phi}; \quad (2.31)$$

$$L_\phi \cong \frac{L_1}{0.7}, \quad (2.32)$$

где  $L_{\phi\phi}$  и  $L_\phi$  – соответственно междуфазная и фазная индуктивность; примем, что  $L_{\phi\phi}/L_\phi \cong 0.3$ .

Для расчёта параметров воздушной линии воспользуемся стандартными формулами расчёта погонных параметров, основанных на методе зеркального отображения [44].

Таблица 2.2 - Параметры ВЛ и КЛ среднего класса напряжения

Напряжение	6 кВ		10 кВ		35 кВ	
Параметр	$L_{\text{пог.ф.}}$ , мГн/км	$C_{\text{пог.ф.}}$ , мкФ/км	$L_{\text{пог.ф.}}$ , мГн/км	$C_{\text{пог.ф.}}$ , мкФ/км	$L_{\text{пог.ф.}}$ , мГн/км	$C_{\text{пог.ф.}}$ , мкФ/км
ВЛ	2,406	0,003747	2,406	0,003747	2,409	0,00442
КЛ	0,074	0,33	0,079	0,13	0,12	0,156

Примем мощность силового трансформатора, установленного в центре питания  $S=16$  МВА, а его напряжение короткого замыкания  $U_k=10\%$ , и вычислим его индуктивность как:

$$L_S = \frac{U_k \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S \omega}. \quad (2.33)$$

Тогда в предположении электропитания сети от системы бесконечной мощности индуктивность источника/трансформатора составит  $L_S=1.9$  мГн.

Найдём зависимость производной  $du_N/dt$  от расстояния до места повреждения - от центра питания до точки ОДЗ. Точка замыкания перемещается вдоль линии, т.е. длина поврежденной линии варьируется. Параметры линий приведены в таблице 2.1.

Приближенная оценка скорости изменения напряжения на нейтрали ЭС может быть получена с помощью эквивалентной схемы замещения, приведенной на рисунке 2.7.

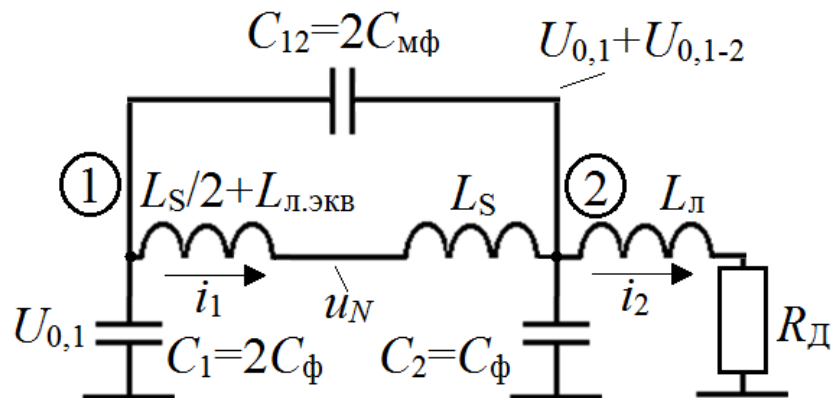


Рисунок 2.7 - Эквивалентная расчётная схема замещения распределительной сети при замыкании на землю

Система дифференциальных уравнений (2.34), описывающая свободный переходный процесс в двухчастотном контуре (схеме замещения ЭС в режиме замыкания фазы на землю) имеет вид:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{C_\phi}{K_C} & \frac{2C_{M\phi}}{K_C} \\ 0 & 0 & \frac{-3C_\phi}{K_C} & \frac{2C_\phi}{K_C} \\ 0 & \frac{1}{1.5L_S + L_{L\text{ЭКВ}}} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{L_L} & \frac{-1}{L_L} & 0 & \frac{-R_D}{L_L} \end{bmatrix} \mathbf{X}, \quad (2.34)$$

где вектор переменных состояния  $\mathbf{X}=[u_{C1} \ u_{C12} \ i_1 \ i_2]^T$ ;  $K_C=6C_\phi C_{M\phi}+2C_\phi^2$ .

При первичном пробое фазной изоляции на положительном максимуме сетевого напряжения вектор начальных условий равен:  $\mathbf{X}_0=[-0.5 \ 1.5 \ 0 \ 0]^T$ . Решение системы дифференциальных уравнений можно численно выполнить методом трапеций.

Производная  $du_N/dt$  вычисляется от напряжения на нейтрали, представляемого согласно (2.35):

$$u_N(t) = u_{C1} + u_{C12} \frac{0.5L_S + L_{L\text{ЭКВ}}}{1.5L_S + L_{L\text{ЭКВ}}} \quad (2.35)$$

Расчётные значения максимальной производной  $du_N/dt_{max}$  от индуктивности поврежденного фидера ( $L_L=[0,05; 1]$  мГн), пропорциональной расстоянию до места замыкания применительно к параметрам кабельной сети, приведены на рисунке 2.8.

Из рисунка 2.8 видно, что производная  $du_N/dt$  достаточно большая - по отношению к производной на промышленной частоте она в 20 раз больше и вполне достаточна для работы ИРЗ.

Однако при ОДЗ в конце очень длинных ВЛ (например, на ВЛ электрохимической защиты нефте- и газопроводов) частота свободных колебаний (и, соответственно, производная) может быть очень низкой, и не исключается возможность невключения устройства ИРЗ при малых напряжениях пробоя фазной изоляции (т.е. в таких случаях  $du/dt_{\text{ОДЗ}} \cong du/dt_{\text{УОЗ}}$ ).



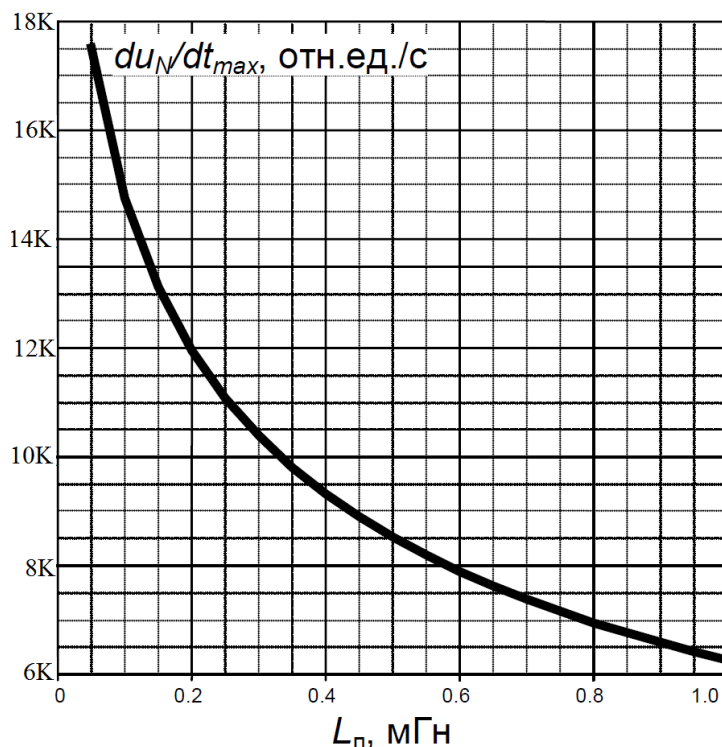


Рисунок 2.8 - Расчётная зависимость максимальной производной напряжения в нейтрали распределительной кабельной сети от индуктивности поврежденного фидера (масштабный коэффициент по оси ординат  $K=1000$ )

### 2.2.3 Методика определения производной $du_N/dt$ для электрических сетей с бинарной топологией

Производную напряжения на нейтрали ЭС условно можно разделить на две составляющие: «высокочастотную» (ВЧ) и «низкочастотную» (НЧ). Первая обусловлена скоротечными разрядными процессами на поврежденной фазе. ВЧ составляющая производной формируется на фронте волны НП, приходящей от места ОЗЗ, т.е. на условно первом этапе замыкания. Эту составляющую можно описать волновыми процессами. Выше в упрощенной схеме замещения сети эти процессы характеризовались частотой  $\beta_2$ .

Для более точной оценки возможности работы (запуска) ИРЗ оценим уровень запускающего сигнала на дифференцирующей  $RC$ -цепи устройства. Полагается, что такой сигнал необходимой амплитуды запускает всю последовательную цепь высоковольтных симисторов.

При удаленном от центра питания замыкании на землю волна напряжения на нейтраль ЭС и, соответственно, на ДЗЦ придет с некоторой задержкой. Также произойдет деформация (затягивание/заваливание) фронта волны благодаря потерям: поверхностному эффекту в проводах и земле и эффекту близости, который в заметной степени проявляется в кабельных линиях (рисунок 2.9). По мере продвижения электромагнитной волны напряжения к центру питания фронт импульса увеличивается из-за отличия фазовых скоростей на разных частотах, происходит уменьшение амплитуды импульса из-за преломлений импульса в местах присоединения нескольких линий: в качестве таких мест (узлов), как правило, выступают распределительные подстанции. В воздушных ЭС возможно ветвление линий вне распределительных подстанций.

Рассмотрим одноканальную ЭС с топологией в виде бинарного дерева, представленного на рисунке 2.9. В ней однофазное замыкание предполагается в конце линии, включенной между узлами «3» и «4».

Для упрощения расчёта амплитуды волны, пришедшей на шины центра питания, примем, что при замыкании на землю в сети возникает единичный прямоугольный импульс напряжения большой длительности, а кабели имеют одинаковую длину и равные волновые сопротивления  $Z_c$ . Пренебрежем уменьшением/затуханием импульса напряжения в самом кабеле.

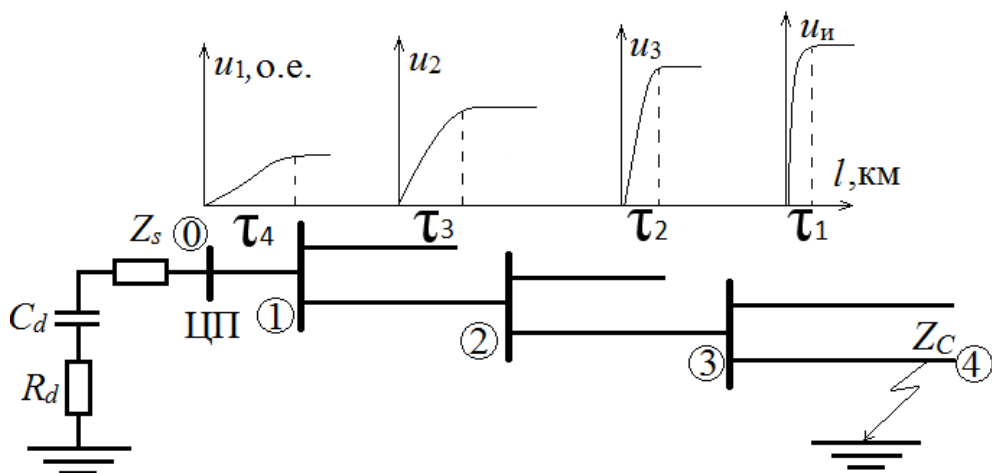


Рисунок 2.9 - Однолинейная схема распределительной сети с диаграммой напряжений в узлах сети при ОДЗ в конце линии 3-4;  $C_d$  и  $R_d$  - ёмкость и сопротивление дифференцирующей цепи;  $Z_{с\text{тр}}$  - элемент схемы замещения обмоток питающего (силового) трансформатора;  $Z_c$  - волновое сопротивление линии;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$  - длительности фронтов импульсов ( $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$ )

Коэффициенты преломления волны напряжения в узлах 1-3, соответственно, равны:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . В соответствии с принятым предположением о равенстве волновых сопротивлений линий  $\alpha_3=\alpha_2=\alpha_1=\alpha$ , который вычисляется по формуле (2.36):

$$\alpha = \frac{2 \cdot \frac{Z_C}{2}}{Z_C + \frac{Z_C}{2}} = \frac{2}{3}. \quad (2.36)$$

При условии распространения от места замыкания единичного импульса, напряжение на шинах ЦП (в узле «0») будет пропорционально произведению коэффициентов преломления в каждом узле по формуле:

$$U_{iN} = 2\alpha_1\alpha_2\alpha_3 = 2\left(\frac{2}{3}\right)^n, \quad (2.37)$$

где  $n$  – количество узлов от места замыкания до ЦП.

Последнее выражение (2.37) справедливо при условии, что сумма эквивалентного волнового сопротивления обмоток трансформатора ( $Z_{CTP}$ ) и дифференцирующего сопротивления  $RC$ -цепи ( $R_d$ ) много больше эквивалентного волнового сопротивления кабеля, т.е. для бинарной сети должно выполняться неравенство  $Z_{CTP}+R_d \gg Z_C$ . Для кабелей с изоляцией из полиэтилена (ПЭ) и бумажно-пропитанной изоляции (БПИ)  $Z_C \approx 25-50$  Ом. При приближенно принятых параметрах дифференцирующей цепи и реальных параметрах силовых трансформаторов это условие с запасом выполняется.

В трехфазной постановке (в трехфазной линии электропередачи) электромагнитные волны распространяются сразу во всех трех фазах. На соседних фазах амплитуда волны определяется коэффициентом электростатической связи, поэтому набегающую от места замыкания волну напряжения НП следует представить по формуле (2.38):

$$u_0 = (u_A + u_B + u_C) / 3 = U_{пр} K_\eta, \quad (2.38)$$

где  $K_\eta = \frac{1+2\eta}{3}$  – амплитудный коэффициент волны НП, ( $U_{пр}$  – напряжение пробоя,  $\eta = C_{мф} / (C_{мф} + C_\phi)$  – ёмкостной коэффициент связи).

Усложним задачу и рассчитаем амплитуду набегающей волны  $U_{in}$  для древовидной радиальной ЭС, имеющей  $m$  узлов с  $n$  линиями и собственными волновыми сопротивлениями  $Z_{nk}$ . Такая сеть представлена на рисунке 2.10.

Однофазное замыкание на землю происходит на линии с волновым сопротивлением  $Z_{1m}$  в узле  $m$ .

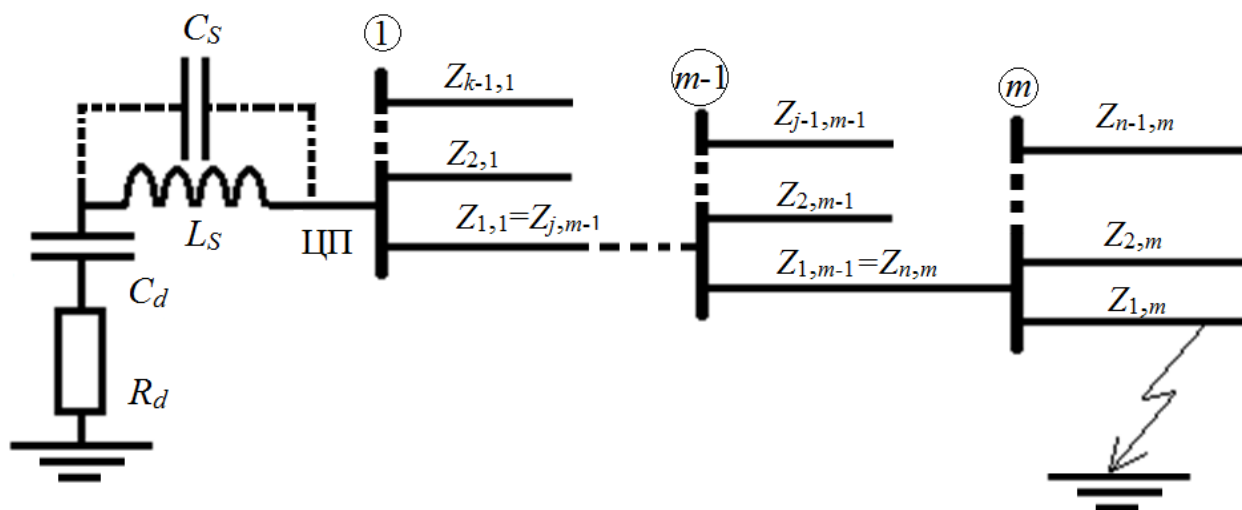


Рисунок 2.10 - Однолинейная схема распределительной сети с  $n$  количеством линий и  $m$  узлов

По аналогии с бинарной сетью найдем коэффициент преломления волны для узла  $m$ , рассчитав эквивалентное сопротивление нижнего плеча резистивного делителя через волновые проводимости линий определяется согласно (2.39):

$$\alpha_m = \frac{2 \left( \sum_{j=2}^n \frac{1}{Z_{jm}} \right)^{-1}}{\left( \sum_{j=2}^n \frac{1}{Z_{jm}} \right)^{-1} + Z_{1m}}, \quad (2.39)$$

где  $n$  – количество линий в  $m$ -ом узле,  $Z_{jm}$  – волновое сопротивление  $j$ -ой линии в  $m$ -ом узле,  $m$  – количество узлов сети, в которых происходит преломление (и отражение) волны напряжения.

Далее определим амплитуду импульса напряжения в узле 1 (т.е. в ЦП) при условии воздействия импульса напряжения  $U_0$ :

$$U_{in} = U_0 \frac{\alpha_1}{2} \prod_{i=2}^m \alpha_i. \quad (2.40)$$

Для расчёта напряжения на выходе ДЗЦ необходимо знать крутизну фронта импульса, пришедшего на обмотку НН трансформатора (рисунок 2.11), т.е. на шины ЦП. Согласно [39] для широкого диапазона кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) метрическое увеличение длительности фронта  $t_d$  находится в

диапазоне 1,5 нс/м для кабелей 6-10 кВ ( $S_{\text{каб}}=120 \text{ мм}^2$ ), для кабелей с ПЭ можно приближенно принять - 1,2 нс/м ( $S_{\text{каб}}=120 \text{ мм}^2$ ).

Тогда длительность фронта импульса, пришедшего в ЦП, приблизительно определяется по формуле (2.41):

$$t_{\phi} = t_d l, \quad (2.41)$$

где  $l$  – суммарная длина кабелей от места замыкания до обмотки трансформатора (шин ЦП).

Импульс  $u_{in}(t)$  имеет вид, приведенный на рисунке 2.11. Аналитически его можно записать согласно выражению (2.42):

$$u_{in}(t) = U_{in}(1 - e^{-\alpha' t}). \quad (2.42)$$

В операторной форме получим выражение (2.43):

$$U_{in}(p) = \frac{U_{in}}{p} \frac{\alpha'}{p + \alpha'}, \quad (2.43)$$

где  $\alpha' = \frac{1}{\tau_{\phi}}$  и  $\tau_{\phi} = \frac{t_{\phi}}{4}$ .

Для воздушных линий электропередачи и удельного сопротивления грунта  $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $t_d$  можно принять равным 2.8 нс/м на основе расчётов в программе ЕМТР. Значение  $Z_{\text{сгр}}+R_d$  соизмеримо с волновым сопротивлением линии  $Z_{\text{свл}}$  (волновое сопротивление ВЛ с нерасщепленным фазным проводом находится в диапазоне нескольких сотен Ом -  $Z_{\text{свл}}\approx 500 \text{ Ом}$ ), поэтому необходимо принимать в расчёт отходящие от ЦП линии. Если представить, что импульс набегаёт на ЦП от некоторого источника, то его эквивалентное сопротивление (на ограниченном временном интервале) равно волновому сопротивлению линии, деленному на количество фидеров  $n$ , отходящих от центра питания. Напряжение на резисторе ДЗЦ  $R_d$  вычисляется по формуле (2.44):

$$U'_d = \frac{U_d R_d}{R'_d}, \quad (2.44)$$

где  $R'_d = R_d + Z_{\text{свл}}/n$ .

Максимальное напряжение на выходе ДЗЦ можно определить, рассчитав переходный процесс в простейшей схеме замещения, приведенной на рисунке 2.12.

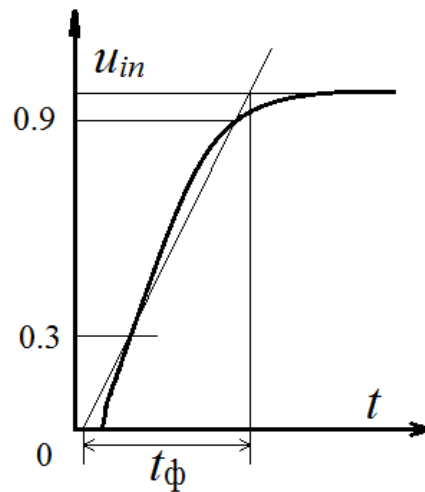


Рисунок 2.11 - Импульс напряжения, пришедший из сети на шины станции/подстанции

#### 2.2.4 Простейший расчёт напряжения на выходе делителя дифференцирующе-запускающей цепи (метод №1)

На схеме, приведенной на рисунке 2.12, изображена эквивалентная схема замещения обмоток низкого напряжения трансформатора  $Z_{с\text{тр}}$ , дифференцирующая  $RC$  цепь и эквивалентный источник импульсного напряжения  $u_{in}(t)$ . Внутреннее сопротивление источника - сопротивление  $R_{in}$ , которое приближенно определяется эквивалентным волновым сопротивлением. В первом приближении для упрощения расчётов им можно пренебречь, т.к. волновое сопротивление обмотки трансформатора и дифференцирующей цепи много больше эквивалентного волнового сопротивления сети:  $R_d + Z_{с\text{тр}}/3 \gg R_{in}$ . Поэтому предположим, что источник сигнала бесконечной мощности. Тогда емкостью ошиновки  $C_{in}$  также можно пренебречь – она шунтируется «идеальным» источником.

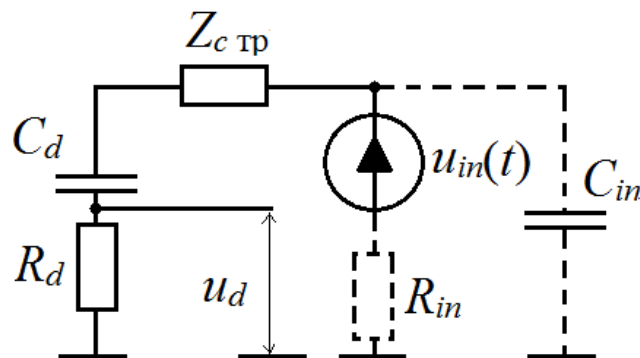


Рисунок 2.12 - Расчётная схема замещения. Трансформатор представлен волновым сопротивлением (метод расчёта №1)

Приняв диапазон изменения эквивалентного волнового сопротивления обмоток трансформатора  $Z_{C_{тр}}=0.3...1$  кОм [45], определим напряжение на нижнем плече  $RC$ -делителя (т.е. на выходе ДЗЦ). Предположим, что длительность фронта набегающего импульса напряжения меньше двух постоянных времени распространения волны по обмотке низкого напряжения (НН) трансформатора  $t_{\phi} < 2\tau_{обм}$ . Принятые допущения ( $R_{in}=0$ ,  $C_{in}=0$ ), несомненно, несколько завышают крутизну воздействующей волны напряжения и, значит, завышают значение производной. Напряжение на выходе дифференцирующей цепи в операторной форме будет определено как:

$$U_d(p) = \frac{2U_{in}(p)R_d}{Z_{C_{тр}} + \frac{1}{C_d p} + R_d} = 2 \frac{\alpha' U_{in}}{p(p+\alpha')} \frac{pR_d C_d}{pC_d(R_d + Z_{C_{тр}}) + 1}, \quad (2.45)$$

где выражение для  $\alpha'$  приведено в п. 2.2.3.

Введем обозначения:

$$\tau_d = C_d R_d; \quad (2.46)$$

$$\tau = C_d (R_d + Z_{C_{тр}}); \quad (2.47)$$

В результате, подставив (2.46) и (2.47) в (2.45) получим выражение (2.48):

$$U_d(p) = \frac{\tau_d \alpha' 2U_{in}}{(p+\alpha')(p\tau+1)}. \quad (2.48)$$

Во временной области для  $t < 2\tau_{обм}$  напряжение на сопротивлении  $R_d$  определяется по формулам (2.49) и (2.50):

$$u_d(t) = \frac{2U_{in} \alpha' \tau_d (e^{-t/\tau} - e^{-\alpha' t})}{\alpha' \tau - 1}, \quad (2.49)$$

$$\tau_{обм} = l_{НН} \sqrt{C'_2 L'_S}, \quad (2.50)$$

где  $C'_2$ ,  $L'_S$  – погонные ёмкость на корпус и индуктивность рассеяния обмотки НН трансформатора.

Произведем расчёт напряжения при  $t=2\tau_{обм}$  и построим зависимости уровня сигнала на выходе ДЗЦ от волнового сопротивления трансформатора для сети с 3-мя узлами и варьируемым количеством линий.

В качестве расчётного выберем автотрансформатор АТ-7 200000/220/110/10-689Л, параметры ёмкостей обмоток (относительно корпуса) которого приведены в [46], а также примем длину обмотки/катушки низкого напряжения  $l_{НН}=2$  м. Параметры автотрансформатора:  $u_K=20.7\%$ ,  $S_{НОМ}=200$  МВА,  $U_{НОМ}=10.5$  кВ,  $C_2=0.293$

нФ. По формуле (2.33) находим значение  $L_s=0.363\text{мГн}$ , тогда  $2\tau_{\text{обм}}=0.65\text{ мкс}$ ,  $Z_{\text{С.обм}}=1110\text{ Ом}$ ,  $Z_{\text{С.тр}}=370\text{ Ом}$ . Зависимости сигнала на выходе ДЗЦ представлены на рисунке 2.13.

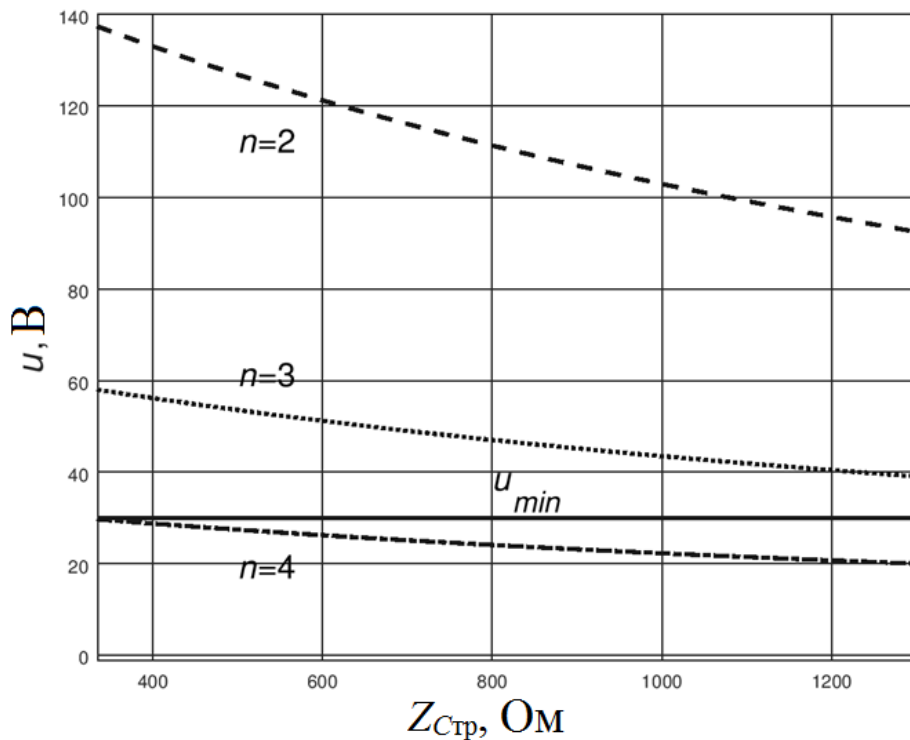


Рисунок 2.13 - Зависимость напряжения на выходе ДЗЦ от волнового сопротивления обмотки трансформатора при замыкании на землю в бинарной сети ( $n=2$ ), триадной ( $n=3$ ), тетраэдной ( $n=4$ ), и пороговое напряжение срабатывания ( $u_{\text{min}}$ );  $n$  – количество линий, отходящих от каждого узла сети, длина каждой линии - 2 км,  $2\tau_{\text{обм}}=0.65\text{ мкс}$

Полученные зависимости напряжения позволяют оценить минимальный уровень напряжения на выходе ДЗЦ. Параметры дифференцирующей цепи соответствуют значениям, используемым в реальной установке. Из рисунка видно, что для всех искусственных топологий сети (с тремя РП) напряжение на выводе дифференцирующей цепи ниже порогового значения только для тетраэдной сети ( $n=4$ ). Для остальных конфигураций сети напряжение на выходе ДЗЦ «достаточно» для запуска ИРЗ. Фактически уровень выходного напряжения на ДЗЦ для конфигураций сети с  $n=4$  может оказаться больше  $u_{\text{min}}$ . Однако, простота этой методики расчёта не предусматривает расчёт волновых процессов в обмотке трансформатора. Недостатком схемы замещения, показанной на рисунке 2.12, является то, что она справедлива только до тех пор, пока не пришла волна напряжения, отраженная от источника, т.е. принципиально  $u_d(2\tau_{\text{обм}})$  занижено.



### 2.2.5 Расчёт в схеме замещения с трансформатором, представленным сосредоточенной индуктивностью (метод №2)

На пологих фронтах воздействующего импульса напряжения обмотку низшего напряжения можно приближенно представить в виде катушки (рисунок 2.14), индуктивность которой равна индуктивности рассеяния обмотки ( $L_S$ ). Формально параллельно этой катушке следует включить сопротивление, учитывающее потери в обмотке на высоких частотах ( $R_{s,тр}$ ). Индуктивность обмотки трансформатора оценим по формуле (2.32).

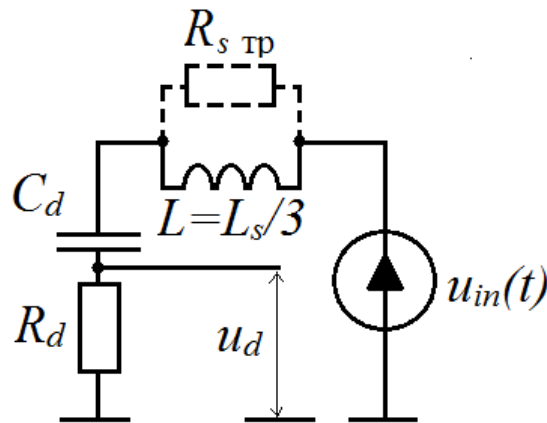


Рисунок 2.14 - Расчётная схема замещения трансформатора с сосредоточенными параметрами №2

Принципиально решение для напряжения  $u_d$  на резисторе  $R_d$  можно найти в аналитическом виде. Однако перспективнее его получить в численном виде, решая систему дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в несложном контуре. В этом случае  $u_{in}(t)$  может иметь сложную (произвольную) форму.

Запишем дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_{in} - u_C - i_C R_d, \\ C_d \frac{du_C}{dt} = i_C, \end{cases} \quad (2.51)$$

В (2.51) ток  $i_C$  определяется согласно (2.52):

$$i_C = \frac{u_{in} - u_C + R_{s,тр} i_L}{R_d + R_{s,тр}}. \quad (2.52)$$

Перепишем уравнения в матричном виде и приведем к форме Коши:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{X} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U}_{in} \quad (2.53)$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор переменных состояния  $(i_L, u_C)^T$ ,  $\mathbf{U}_{in}$  – вектор внешних воздействий,  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  – матрицы топологии и параметров элементов, и вклада внешних воздействий, которые определяются согласно (2.54), (2.55).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{S\text{тп}}R_d}{LR_{S\text{тп}}+LR_d} & \frac{R_d}{LR_{S\text{тп}}+LR_d} - \frac{1}{L} \\ \frac{R_{S\text{тп}}}{C_dR_{S\text{тп}}+C_dR_d} & -\frac{1}{C_dR_{S\text{тп}}+C_dR_d} \end{bmatrix}; \quad (2.54)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{R_2}{LR_{S\text{тп}}+LR_d} + \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_dR_{S\text{тп}}+C_dR_d} \end{bmatrix}. \quad (2.55)$$

Напряжение на резисторе  $u_d$  определяется как  $u_d = i_C R_d$ .

В матричном виде уравнение для выходного вектора  $\mathbf{Y}=u_d$  определяется согласно (2.56-2.60) как:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X} + \mathbf{D} \mathbf{U}_{in}; \quad (2.56)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{R_{S\text{тп}}R_d}{R_{S\text{тп}}+R_d} & -\frac{R_2}{R_{S\text{тп}}+R_d} \end{bmatrix}; \quad (2.57)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{R_d}{R_{S\text{тп}}+R_d} \end{bmatrix}; \quad (2.58)$$

$$\mathbf{U}_{in} = \begin{bmatrix} u_{in}(1 - e^{-t\alpha'}) \\ u_{in}(1 - e^{-t\alpha'}) \end{bmatrix}, \quad (2.59)$$

где  $\alpha' = \frac{1}{\tau_\phi}$ .

Итерационная формула для решения в искомый момент времени  $t_{k+1}=(k+1)h$  уравнения (2.53) в соответствии с методом трапеций имеет вид (2.60):

$$\mathbf{X}_k = \left( \mathbf{1} - \frac{h}{2} \mathbf{A} \right)^{-1} \left\{ \left( \mathbf{1} + \frac{h}{2} \mathbf{A} \right) \mathbf{X}_k + \frac{h}{2} \mathbf{B} (\mathbf{U}_{in,k} + \mathbf{U}_{in,k+1}) \right\}, \quad (2.60)$$

где  $h$  – шаг дискретизации по времени,  $k$  – номер шага (отсчета),  $\mathbf{1}$  – единичная матрица.

Погрешности этого метода кроются в приближенности определения индуктивности обмотки НН и её емкости на корпус.

### 2.2.6 Расчёт в схеме замещения с обмоткой, представленной линией с распределенными параметрами (метод №3)

Повысить точность расчёта можно, заменив линией с распределенными параметрами обмотку трансформатора (рисунок 2.15). Также, помимо реакции цепи на коротечный экспоненциальный импульс напряжения, формируемый коротким фронтом напряжения во время замыкания на землю, можно наложить на импульс и низкочастотную составляющую переходного напряжения, вызванную перезарядными процессами на неповрежденных фазах.

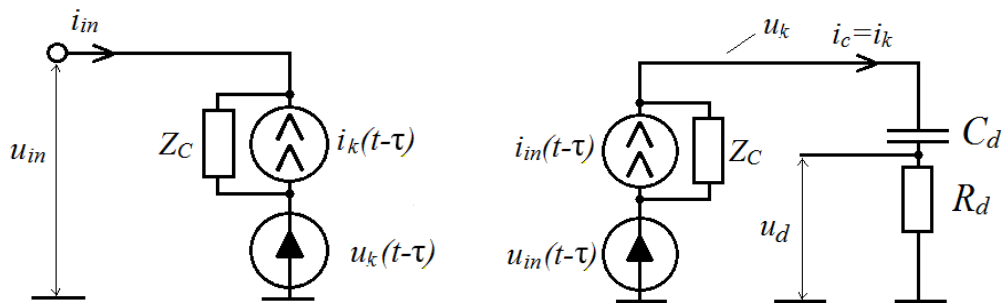


Рисунок 2.15 - Расчётная схема замещения с трансформатором – линией  $Z_{Cnp}=Z_C$

Воспользовавшись методом бегущих волн, уравнения (2.61), (2.62) для искомых величин в начале и конце линии имеет вид:

$$\begin{cases} u_{in} = U_{in}(1 - e^{-t\alpha'}); \\ i_{in} = \frac{u_{in} - u_k(t-\tau)}{Z_C} + i_k(t - \tau); \end{cases} \quad (2.61)$$

$$\begin{cases} C \frac{du_C}{dt} = \frac{u_{in}(t-\tau) + i_{in}(t-\tau)Z_C + u_C}{Z_C + R_d} = i_k = i_C; \\ u_k = i_k R_d + u_C. \end{cases} \quad (2.62)$$

Напряжение на выходе ДЗЦ:  $u_d = i_k R_d$ .

Данный метод расчёта позволяет с достаточной точностью найти напряжение на выходе ДЗЦ для импульсов напряжения с произвольной длительностью, т.к. учитывает многократные отражения волн от источника.

Стоит отметить, что приближенными методами можно пользоваться тогда, когда по результатам расчётов производная вполне достаточна (т.е. получена с большим запасом). В противном случае следует прибегать к точным методам моделирования, включая компьютерное с более полной моделью сети.

## 2.3 Приближенная оценка выходного напряжения на дифференцирующе-запускающей цепи для распределительной сети с реальной топологией

### 2.3.1 Производная $du_N/dt$ в реальной кабельной сети

В действующей кабельной ЭС 10 кВ г. Барнаула в 2001 г. проводился опыт искусственного ОДЗ [38,47]. Мощность питающего трансформатора составляла 40 МВА, емкостный ток замыкания был равен  $I_C=19,4$  А. По результатам осциллографирования фазных напряжений определены напряжение на нейтрали сети (на шинах НН подстанции 110/10 кВ) и его производная. Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рисунке 2.16.

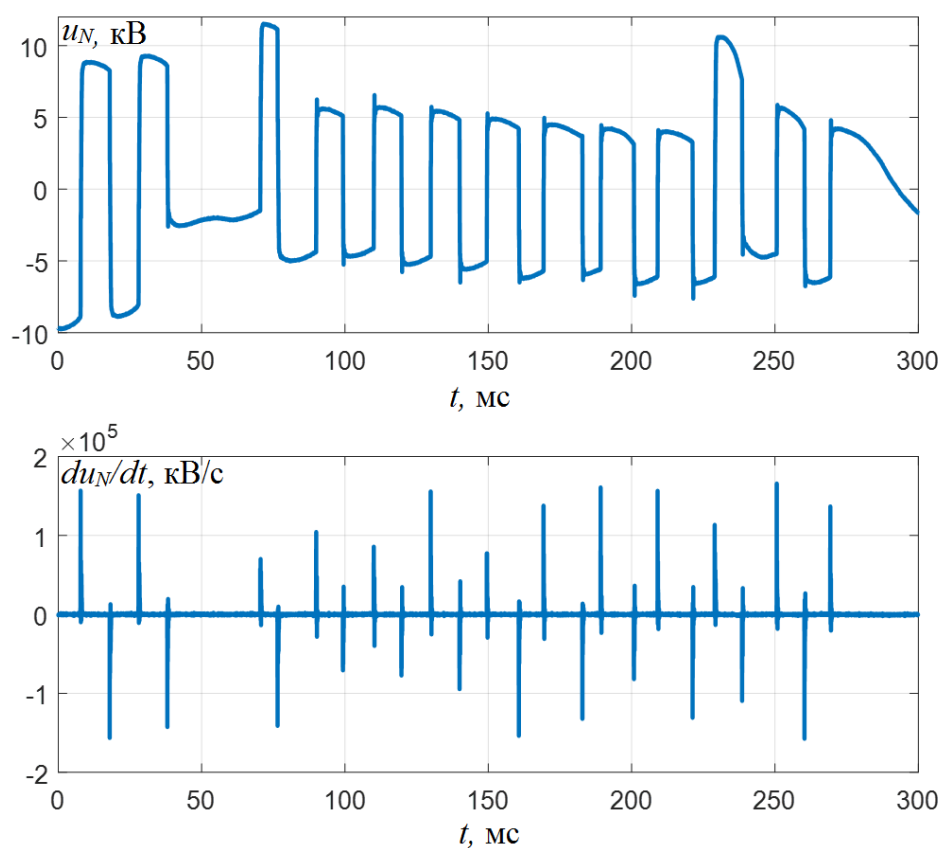


Рисунок 2.16 - Напряжение (кВ) на нейтрали кабельной действующей ЭС 10 кВ и его производная (кВ/с) при ОДЗ

При напряжении в нейтрали ЭС не более  $1,4 U_{ф.м}$  производная находится в диапазоне  $0,8...1,6 \cdot 10^5$  кВ/с или в относительных единицах для указанного сетевого напряжения –  $9220...18840$  о.е./с. Столь значительная производная (по отношению к производной на промышленной частоте при УОЗЗ превышение составляет 29-60 раз) объясняется незначительным удалением места ОДЗ от центра питания -  $\sim 500$  м.

Популярные современные системы моделирования переходных процессов не позволяют правильно учесть частотно-зависимые потери в кабельных линиях с бумажно-пропитанной изоляцией, которые преобладают в России [39], но достаточно точно моделируют процессы деформации волны в воздушных линиях электропередачи. Оценку деформации электромагнитной волны в ВЛ можно выполнить, рассчитав процесс ее распространения с учетом поверхностного эффекта в земле [48-50].

На рисунке 2.17 приведены фронты волны напряжения на разных удалениях от места замыкания, на основании которых может быть оценена погонная деформация (увеличение фронта) волны.

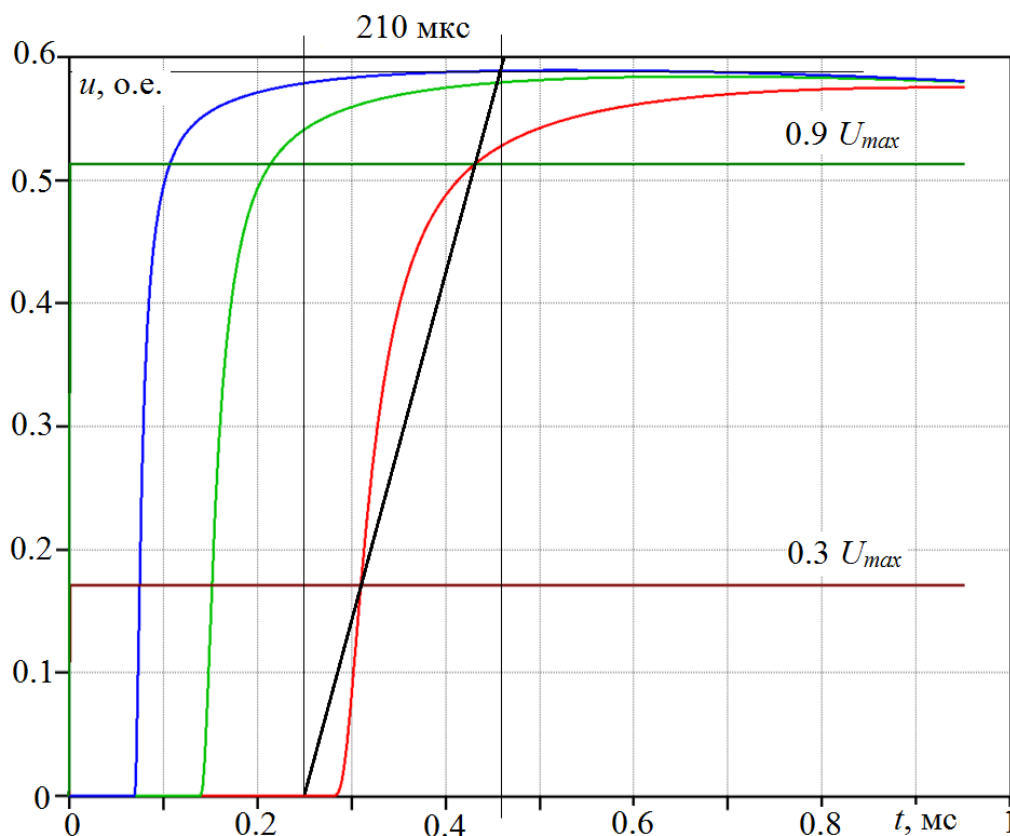


Рисунок 2.17 - Напряжение волны напряжения НП на поврежденной фазе, распространяющейся от места ОДЗ в сторону ЦП (отсчеты на 20, 40 и 80 км; ВЛ 10 кВ)

Для типичной воздушной ЛЭП 10 кВ с удельным сопротивлением земли 100 Ом·м увеличение длительности фронта составило приблизительно  $\tau_d = 2,8$  нс/м. На основе этого значения может быть оценена длительность фронта импульса и при известной топологии сети также амплитуда набегающей волны напряжения нулевой последовательности на шинах центра питания.

Для определения минимально возможной крутизны импульса напряжения на нейтрали ЭС выбирается наиболее длинная ветвь в схеме электроснабжения. Путем умножения погонной деформации фронта волны ( $\tau_d$ ) на длину линии определяется длительность фронта импульса напряжения на шинах ЦП –  $t_\phi = \tau_d l$ . Для расчёта напряжения на выходе ДЗЦ принимаем, что входной импульс имеет экспоненциальную форму, определяемую по (2.63):

$$u_{in}(t) = U_{in} K_n (1 - e^{-t/\tau_\phi}), \quad (2.63)$$

Далее по одной из 3-х методик (п.п. 2.2.4-2.2.6) определяем напряжение на выходе ДЗЦ.

### 2.3.2 Оценка сигнала производной $du_N/dt$ в воздушной электрической сети

Для оценки работоспособности изложенных методик применительно к воздушным ЭС выполнены расчёты напряжения на нейтрали сети и на выходе ДЗЦ для сети с триадной древовидной структурой, электрическая схема которой приведена на рисунке 2.18.

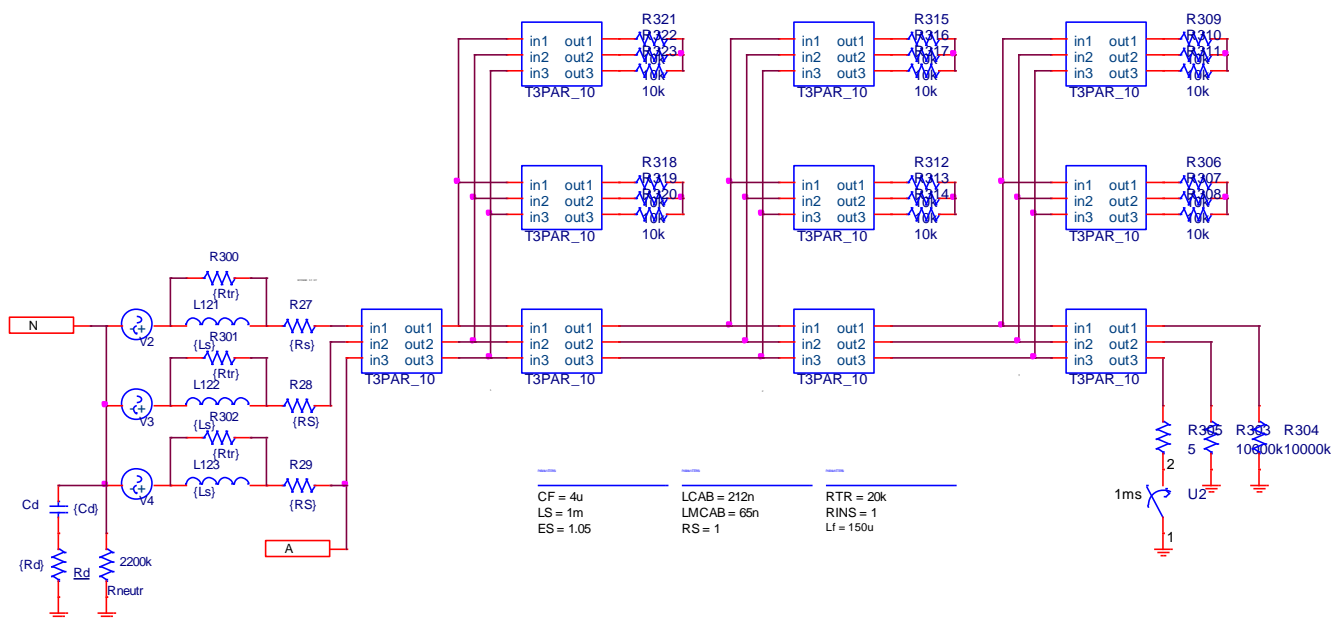


Рисунок 2.18 - Расчётная схема воздушной распределительной сети с триадной древовидной структурой ( $l_{ВЛ}=10$  км)

Параметризованные модели ВЛ, разработанные Качесовым В.Е. и Шутовичем А.Ю [51], учитывают частотные зависимости первичных параметров линии, т.е. позволяют получить достоверные оценки деформации импульсов напряжения.

В качестве гарантированного уровня входного сигнала на ДЗЦ принимается первый скачок напряжения ( $\sim 0.13$  о.е.): на рисунке 2.19,а,в он выделен овалом. Запас по чувствительности в рассмотренном примере достигает четырехкратного значения ( $3.8u_{min}=114$  В). В реальных сетях в силу суперпозиции колебаний глобальный максимум напряжения на выходе ДЗЦ может заметно превышать первый максимум с некоторой задержкой его появления (до сотен микросекунд). Однако такая задержка не является критичной, поскольку среднее время сброса заряда с нейтрали сети составляет около полупериода промышленной частоты.

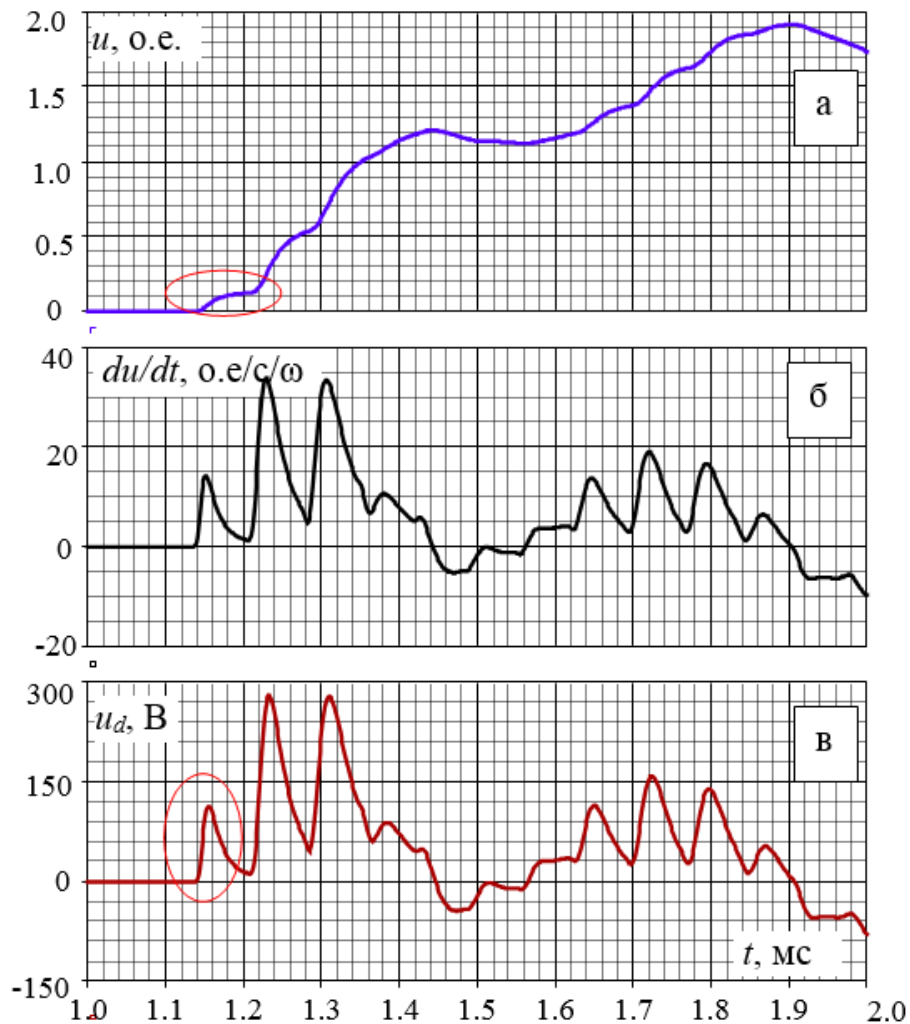


Рисунок 2.19 – Расчётные осциллограммы: а) - напряжения на нейтрали ЭС, постоянная времени нарастания импульса набегающей волны -  $\tau_{\phi}=2.8 \cdot 40/4=2.8$  мкс, б) - его производная  $du_N/dt$ , в) - напряжение на выходе ДЗЦ

Выполним аналитический расчёт напряжения на выходе ДЗЦ для ЭС, представленной на рисунке 2.18. Согласно (п. 2.2.3) количество узлов в триадной сети на рисунке –  $m=3$ , коэффициент преломления  $\alpha=0.25$ . Для используемых в ЭС

ВЛ амплитудный коэффициент приблизительно равен  $K_n=0.58$ , тогда амплитуда волны напряжения на нейтрали ЭС при полном замыкании на землю составит:  $U_{ф.м} \alpha K_n$ . В относительных единицах –  $U_{in}=U_0=0.143U_{ф.м}$ , что согласуется с результатами моделирования, приведенными на рисунке 2.19.

Для оценки напряжения на выходе ДЗЦ (на резисторе  $R_d$ ) по методикам №1, №2, №3 (п. 2.2.4-2.2.6) написана программа в среде программирования OSTATE. Расчётное время распространения волны по обмотке трансформатора (см. п. 2.2.4) составляет  $\tau_{обм}=0.327$  мкс. Результаты расчётов напряжения на резисторе  $R_d$  для разных методов приведены на рисунке 2.20.

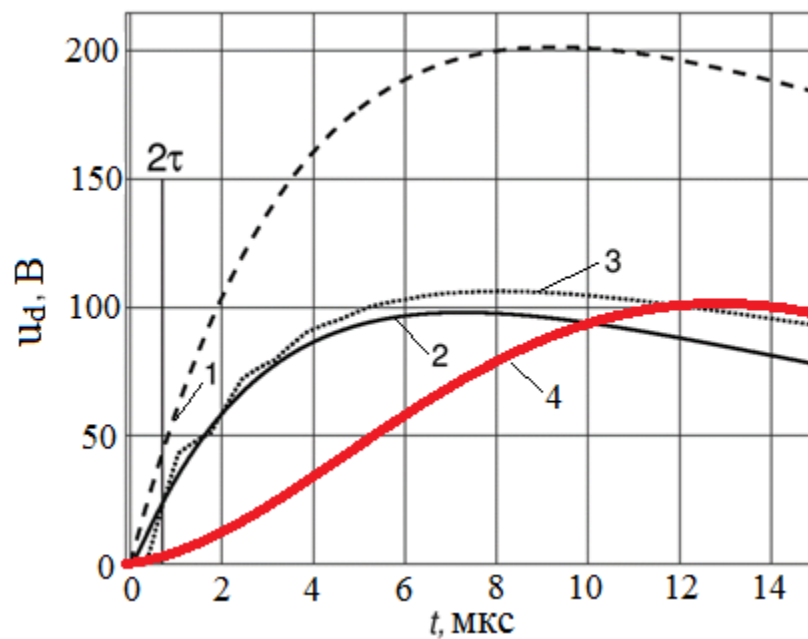


Рисунок 2.20 - Зависимость напряжения на резисторе ДЗЦ для разных методов расчёта (применительно к ЭС 10 кВ), 1 – для метода №1, 2 – для метода №2, 3 – для метода №3, 4 – для компьютерного моделирования

Расчёт по методу №1 показывает большую погрешность  $u_d \approx 50$  В и не применим к данной конфигурации сети, т.к. скорость нарастания напряжения на нейтрали ЭС многократно меньше постоянной времени  $RC$ -цепи ДЗЦ. Первый метод применим для ЭС с большими уровнями производных. Моделируя этим методом, необходимо знать только волновое сопротивление обмотки НН трансформатора.

В качестве альтернативного (универсального) можно использовать метод №2 (п. 2.2.5). Для реализации данного метода достаточно знать индуктивность рассеяния обмотки НН трансформатора, а также сопротивление, отвечающее за



потери в стали на высоких частотах. Его неучёт даёт несколько заниженные результаты, и поэтому, рассчитывая с запасом, его можно не принимать во внимание.

Согласно компьютерной модели напряжение на резисторе ДЗЦ (рисунок 2.19, выделенная область) находится на уровне  $u_d=105$  В. Аналитический расчёт по методу №3 и №2 показал погрешность в диапазоне  $+(5...10\%)$  в сравнении с компьютерным моделированием (рисунок 2.20). Данные методы вполне можно использовать для оценки напряжения на выходе ДЗЦ. Третий метод более точный и даёт оценку напряжения на ДЗЦ для времен  $t > 2\tau_{обм}$ , однако, для большей достоверности модели необходимо знать длину обмотки НН трансформатора, а также её ёмкость на землю.

Использованные в этом подразделе методики не учитывают сложную форму импульса напряжения на нейтрали ЭС, содержащего помимо ВЧ составляющей производной, имеющей волновую природу, также и НЧ, связанную с перезарядными процессами на неповрежденных фазах ЭС, основная частота которых близка к  $\beta_1$ .

### 2.3.3 Учёт низкочастотной составляющей производной напряжения

Даже если напряжение на ДЗЦ, найденное для высокочастотной составляющей производной, оказывается малым, это не означает, что устройство ИРЗ не включится, поскольку низкочастотная составляющая производной даёт значительный и гарантированный вклад в напряжение запуска. Грубо (без учета ВЧ составляющей производной) напряжение на нейтрали ЭС после *первичного* замыкания на землю определяется согласно формуле (2.64):

$$u_N(t) = -U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi_3) + 2U_{\phi m} [1 - C_{мф} / (C_{мф} + C_{\phi})] \cos(\beta_1 t) \sin(\varphi_3) / 3, \quad (2.64)$$

а максимальная производная, нормированная по отношению к амплитуде фазного напряжения ( $U_{\phi.m}$ ) и промышленной частоте ( $\omega$ ), в зависимости от угла зажигания  $\varphi_3$  равна:

$$u'_N = -\cos(\varphi_3) - 2K_{\beta 1} [1 - C_{мф} / (C_{мф} + C_{\phi})] \sin(\varphi_3) / 3, \quad (2.65)$$

где  $K_{\beta 1} = \beta_1 / \omega$ .

Проанализируем зависимость максимума производной  $u'_N$  при варьировании фазы замыкания  $\varphi_3 \in [0, \pi]$ , принимая частоту свободных перезарядных колебаний  $\beta_1 = 5\omega$ ,  $\beta_1 = 10\omega$ ,  $\beta_1 = 20\omega$ . Графики зависимостей нормированной производной от угла зажигания приведены на рисунке 2.21.

Пусть уставка срабатывания устройства ИРЗ по производной будет принята в о.е. равной  $2\omega$  (см. далее п. 2.3.5). Тогда из условия равенства производной уставке по напряжению  $u'_N = U_{уст}$  ( $\varphi_3 \in [0, \pi/2]$ ) определяется диапазон углов зажигания и, соответственно, напряжений пробоя, при котором срабатывает ИРЗ. Определение минимального пробивного напряжения может быть выполнено по рисунку 2.21. Для частоты свободных колебаний принятой  $\beta_1 = 10\omega$  диапазон углов зажигания, при которых превышает уставку, равен  $\Delta\varphi_3 = 10-130$  градусов, т.е. работоспособность ИРЗ сохраняется при напряжениях пробоя изоляции от  $U_{пр} > \sin(10^\circ)U_{ф.м} = 0.17U_{ф.м}$ . На спадающей части фазного напряжения ( $\varphi_3 > 90^\circ$ ) пробой изоляции крайне маловероятны.

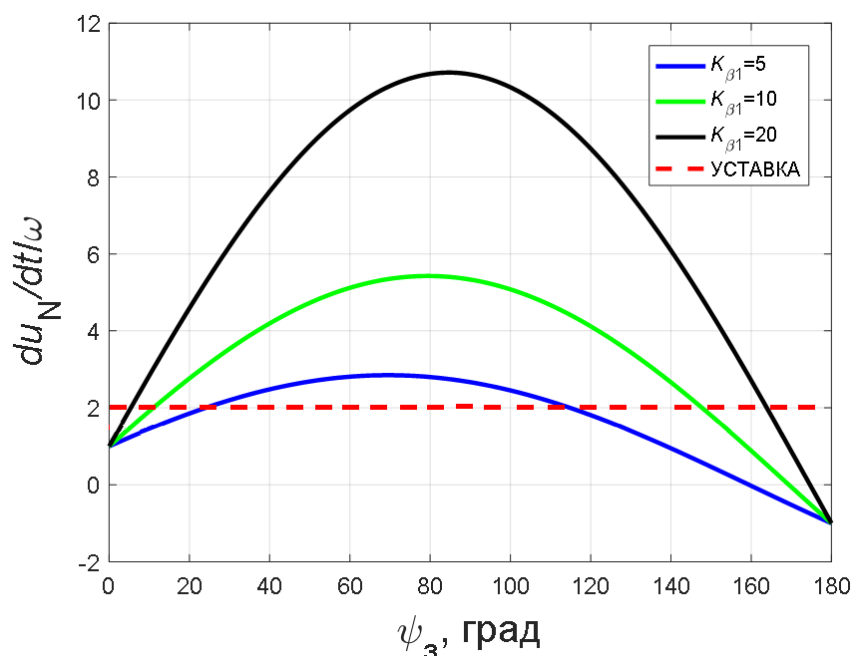


Рисунок 2.21 - Зависимость «низкочастотной» составляющей производной напряжения в нейтрали ЭС (с обратным знаком) от фазы зажигания дуги

Первое слагаемое в выражении для НЧ компоненты производной в (2.65) обусловлено промышленной составляющей сетевого напряжения, а второе – свободной. Как правило, для большинства ЭС сетей  $\beta_1 > 10\omega$ , и при фазах зажигания,

превышающих  $30^\circ$ , второе слагаемое в выражении для производной в (2.65) превышает первое приблизительно в 3 раза. Поэтому, обозначив амплитуду свободных перезарядных колебаний напряжения по формуле (2.66)

$$A = [1 - C_{мф} / (C_{мф} + C_{ф})] \sin(\varphi_3), \quad (2.66)$$

НЧ составляющую производной (не заниженное значение) можно записать в виде (2.67):

$$u'_N \approx 2K_{\beta 1} A / 3. \quad (2.67)$$

### 2.3.4 Отстройка от ложных срабатываний

Устройство ИРЗ необходимо отстроить от ложного срабатывания в нормальном режиме работы сети, т.е. напряжение на  $RC$ -делителе ДЗЦ должно быть меньше напряжения (уставки) запуска  $U_d < U_{зап}$ . Одной из причин срабатывания устройства в нормальном режиме может стать наличие высших гармонических составляющих в сети. Частоты гармоник от 21 и выше уже сопоставимы с частотами собственных колебаний при однофазном замыкании, но их амплитуды много меньше. Так согласно [52] коэффициент гармонических составляющих напряжения для сетей 6-35 кВ не должен превышать 5%. Среди них доля гармоник выше 21 не должна превышать 0.2%.

Для определения максимальной амплитуды напряжения на выходе ДЗЦ  $U_d$  предположим, что 5% от номинального напряжения в сети приходится на 21 гармонику, и она присутствует в напряжении на нейтрали ЭС в режиме устойчивого замыкания. Напряжение согласно формуле (2.68)

$$u'(t) = K_{н.р.} \left( U_{ф.m} \sin(\omega t) + 0.05 U_{ф.m} \sin(N\omega t) \right), \quad (2.68)$$

где  $N$ - номер высокочастотной гармоники (принимается  $N=21$ );  $K_{н.р.}$ - коэффициент допустимого превышения номинального напряжения в ЭС (для сетей 6-35 кВ  $K_{н.р.}=1,2$  [53]).

Напряжение на нижнем плече делителя (на выходе ДЗЦ) будет определено по формуле (2.69):

$$U_d = \frac{u' R_d}{R_d + (j\omega C_d)^{-1}}. \quad (2.69)$$

Сопrotивление резистора  $R_d$  рассчитывается по условию незапуска устройства в режиме УОЗЗ.

Воспользовавшись методом суперпозиции, найдем  $U_d$  в виде двух слагаемых в формуле (2.70): составляющей промышленной частоты (с амплитудой  $U_{\phi.m}$ ) и высокой частоты с амплитудой  $0.05U_{\phi.m}$ :

$$U_d = K_{н.р.} R_d U_{\phi.m} \left( \frac{1}{R_d - j \frac{1}{\omega C_d}} + \frac{0.05}{R_d - j \frac{1}{N \omega C_d}} \right). \quad (2.70)$$

Для опытного прототипа устройства ИРЗ рассчитаем максимальное напряжение на выходе ДЗЦ по формуле:

$$U_{dmax} = K_{н.р.} R_d U_{\phi.m} \left( \frac{1}{\sqrt{R_d^2 + \frac{1}{\omega^2 C_d^2}}} + \frac{0.05}{\sqrt{R_d^2 + \frac{1}{\omega^2 N^2 C_d^2}}} \right). \quad (2.71)$$

С учетом того, что  $\frac{1}{\omega \cdot C_d} \gg R_d$  и  $\frac{1}{\omega N C_d} \gg R_d$ , запишем (2.71) в виде:

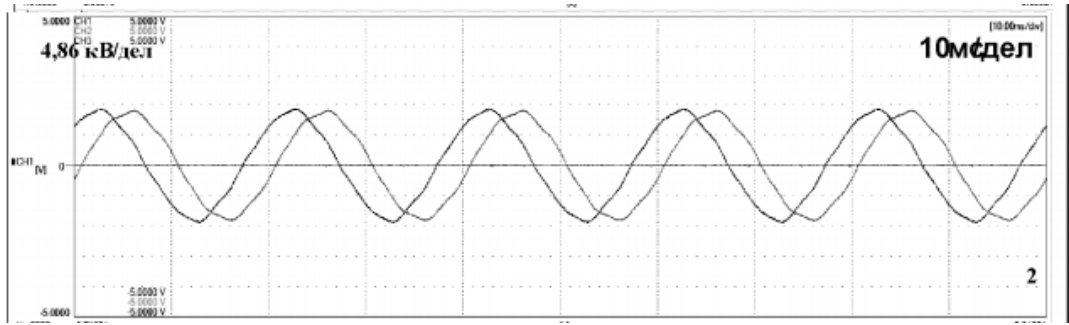
$$U_{dmax} \cong K_{н.р.} R_d U_{\phi.m} (\omega C_d + 0.05 \omega N C_d) \cong K_{н.р.} R_d U_{\phi.m} \omega C_d (1 + 0.05N).$$

При  $N=21$  формула (2.71) примет вид:

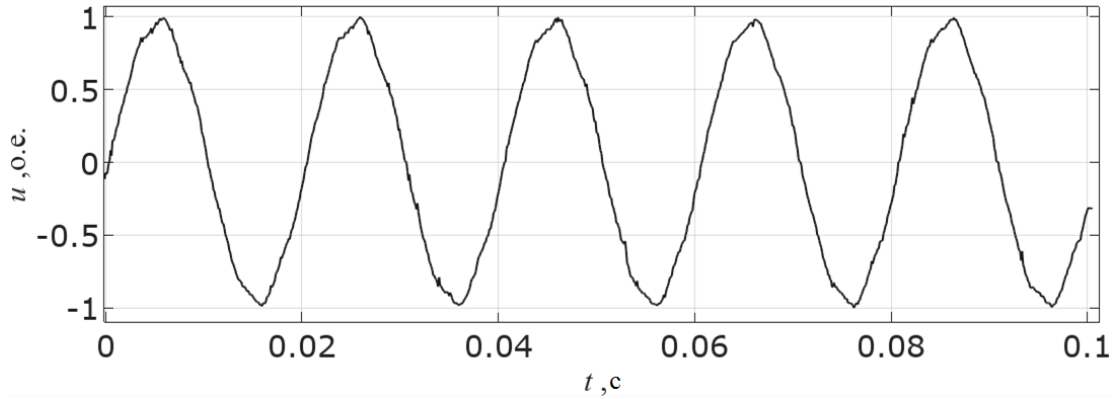
$$U_{dmax} \cong K_{н.р.} R_d U_{\phi.m} 2\omega C_d.$$

При принятых параметрах ДЗЦ  $U_{dmax} \cong 20.64\text{В}$ , что в 1.5 раза меньше принятой уставки ( $U_{уст} \cong 30\text{В}$ ). Таким образом, обеспечивается надежная отстройка как от повышения напряжения в сети, так и от гармонических искажений напряжения.

В качестве примера оценим максимальное значение производной в режиме установившегося замыкания. В работах [54] и [55] получены осциллограммы фазных напряжений в режиме ОЗЗ, которые представлены на рисунке 2.22. По ним определено напряжение в нейтрали сети, для которого получен спектральный состав, представленный на рисунке 2.23.



а)



б)

Рисунок 2.22 - Осциллограмма напряжения в фазах (а); напряжение на нейтрали ЭС в о.е. (б)

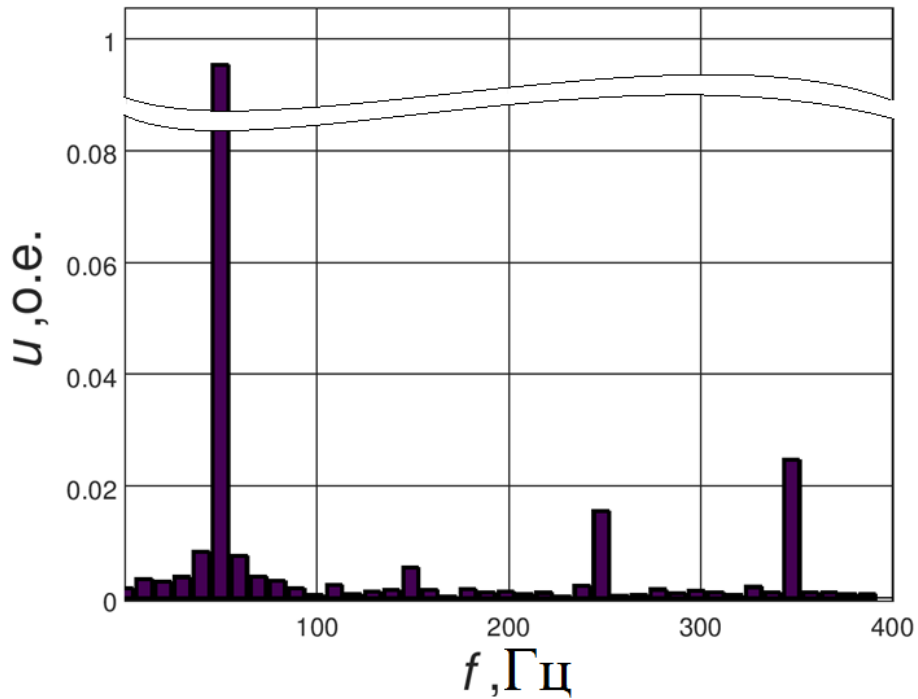


Рисунок 2.23 - Спектральный состав экспериментально измеренного напряжения на нейтрали ЭС при УОЗЗ

Очевидно, что производные высших частот напряжения на нейтрали ЭС в относительных единицах, приведенных к промышленной частоте ( $100\pi$  рад/с),

увеличиваются пропорционально произведению амплитуды на номер гармоники (рисунок 2.24).

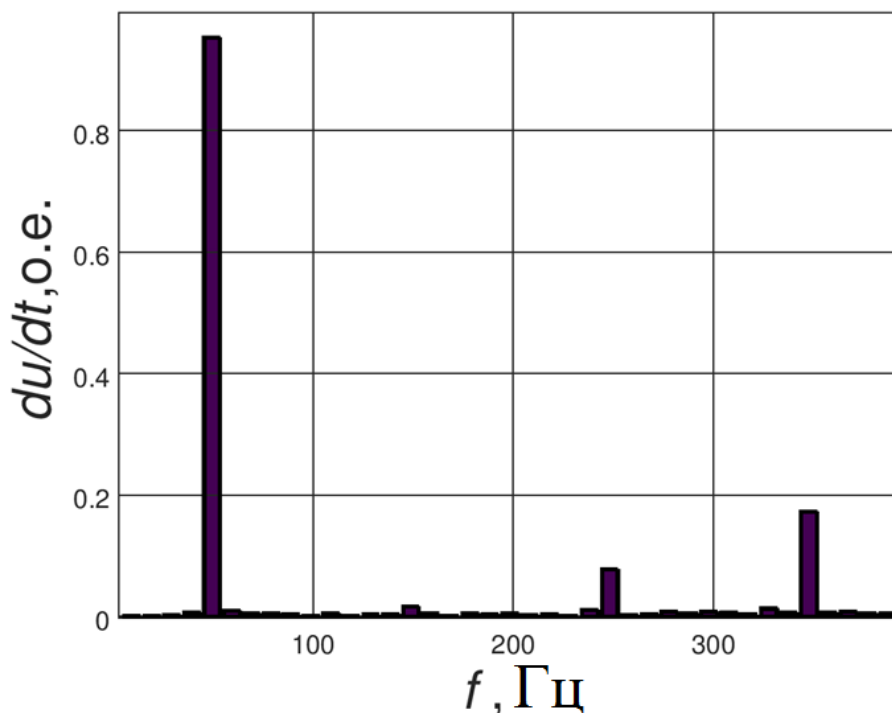


Рисунок 2.24 - Производные гармоник высоких частот, входящих в состав напряжения на нейтрали сети при ОЗЗ

Наибольшее искажение в кривую напряжения вносят 5-ая (250Гц) и 7-ая (350 Гц) гармоники. При доле 7-й гармоники в 0.025 о.е. и 5-ой - 0.015 о.е. максимальный прирост производной составит лишь 0,25 о.е., Таким образом, приведенная оценка производной на нейтрали ЭС с учетом высших гармонических составляющих и повышения напряжения до наибольшего рабочего равна  $du_N/dt=1.2(1+0.25)=1.5$ , что меньше принятой уставки по производной  $K_{уст}=2K_{н.р.}=2.4$ .

### Выводы по второй главе

1. Показано, что скорость изменения напряжения (производная) в нейтрали ЭС при ОДЗ в несколько раз больше производной при УОЗЗ. Данное условие принципиально позволяет обеспечить селективное срабатывание устройства ИРЗ только при ОДЗ.

2. Импульсно-резистивное заземление нейтрали ЭС уменьшает энерговыделение в нейтрале-заземляющем резисторе на ~30% при временных интервалах между повторными зажиганиями дуги около полупериода промышленной

частоты. При заметном снижении электрической прочности дефектного участка фазной изоляции и сохранении такого же интервала между повторными зажиганиями дуги уменьшение энерговыделения происходит в несколько раз.

3. Управление симисторами принципиально возможно посредством подачи отпирающих импульсов напряжения через ДЗЦ на переходы управляющие электроды - катоды, однако при таком способе возможны случаи неоткрытия части симисторов, что порождает повышенные требования к энергоемкости защитных варисторов.

4. Для двухчастотной схемы замещения ЭС с неэффективно заземленной нейтралью получена оценка производной напряжения  $du_N/dt$ , которая показала, что для подавляющего большинства ЭС выполняется условие запуска устройства ИРЗ.

5. Разработана методика оценки переходного напряжения НП на шинах центра питания ЭС, основанная на представлении ЭС в виде линий с распределенными параметрами. Затухание сигнала (волны напряжения НП, формируемой замыканием) при распространении его к ЦП происходит в узлах сети (на распределительных ПС), а увеличение фронта волны определяется суммарной длиной пробега электромагнитной волны от места замыкания до ЦП. Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность такого подхода.

6. Разработано несколько упрощенных схем замещения понизительного трансформатора и ДЗЦ, позволяющих приблизительно оценить значение производной на выходе ДЗЦ при известном напряжении (его амплитуде и длительности фронта) на шинах ЦП. Первая упрощенная методика, в которой обмотка НН (10 кВ) понизительного трансформатора замещается активным сопротивлением, равным волновому сопротивлению обмотки, работоспособна только для крутых импульсов напряжения - постоянная времени экспоненциального фронта импульса не должна превышать половину постоянной времени RC-цепи ДЗЦ. Она может применяться, в основном, только для кабельных сетей. Остальные схемы, где обмотка трансформатора замещается индуктивностью рассеяния трансформатора либо линией с распределенными параметрами, работоспособны в широком диапазоне временных параметров набегающего импульса напряжения.

7. Сделана оценка амплитуды высших гармонических составляющих напряжения на выходе ДЗЦ в режиме установившегося ОЗЗ, показано, что наличие

высших гармоник неспособно привести к ложным срабатываниям устройства при устойчивом замыкании на землю.

8. Минимальная чувствительность устройства ИРЗ может быть определена на основе лишь основной частоты собственных колебаний  $\beta_1$ , возникающих при замыкании на землю в ЭС, – ее перезарядной составляющей. Так, для  $\beta_1=5\omega$  и уставке по производной  $2\omega$  напряжение пробоя, при котором срабатывает ИРЗ составляет  $0,17U_{ф.т}$ .



## ГЛАВА 3 ФИЗИЧЕСКАЯ НИЗКОВОЛЬТНАЯ СТЕНДОВАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИМПУЛЬСНЫМ РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ

### 3.1 Низковольтная стендовая модель

Для оценки работоспособности разработанного способа ИРЗ [56, 57] на кафедре ТВН НГТУ разработан и создан низковольтный физический стенд, моделирующий трехфазную ЭС с основными способами заземления нейтрали, включая импульсно-резистивный [58-61]. Низковольтная физическая модель предназначена для демонстрации дуговых процессов при однофазных замыканиях на землю, оценки дуговых перенапряжений и выбора способов защиты от них в учебных и научно-исследовательских целях (рисунок 2.25).

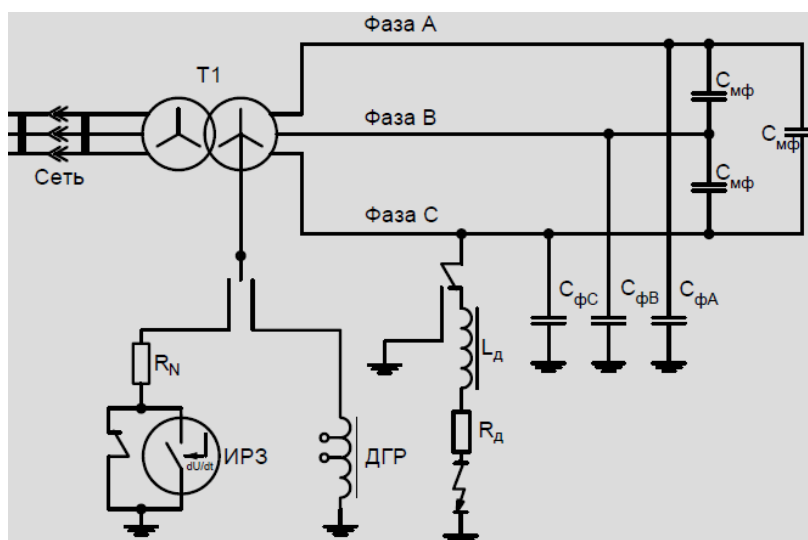


Рисунок 3.1 – Упрощенная электрическая схема физической модели ЭС с неэффективным заземлением нейтрали

Процесс возникновения дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях 6-35кВ - достаточно сложное явление. В лабораторном стенде на данный момент реализованы две популярные (классические) модели горения заземляющей дуги, определяющие характер переходных процессов при замыканиях.

Элементом, моделирующим заземляющую дугу, выступает симистор, управляемый динистором с заданным напряжением пробоя. Такой подход к модели дуги позволяет при оптимальном подборе полупроводниковых ключей воплотить

два основных механизма поведения заземляющей дуги - по Петерсену [9, 61], и Петерсу и Слепяну [62].

### 3.2 Модели заземляющей дуги

Существуют три хорошо известных популярных модели, описывающих процесс горения и повторных зажиганий заземляющей дуги: Петерсена (W. Petersen), Петерса (E. Peters) и Слепяна (J. Slepian), теория Н. Н. Белякова [63,64].

Переходный процесс при первичном зажигании заземляющей дуги одинаков для всех моделей. Принимается, что в момент ОДЗ напряжение на повреждённой фазе при первичном пробое близко к максимальному/минимальному фазному значению, например, составляет – минус  $U_{ф.м}$ , тогда на обеих здоровых фазах –  $+0,5U_{ф.м}$ . Такое предположение допустимо, поскольку протяженная распределенная фазная изоляция подвергается различным воздействиям (электрического поля, тепловым и механическим нагрузкам) и постепенно деградирует. Электрическая прочность электрически ослабленного участка сети постепенно снижается до уровня амплитудного фазного напряжения.

Далее рассматривается простейшая (классическая) модель распределительной сети, представленная на рисунке 2.1 (см. п. 2), в которой фидеры (линии) представлены сосредоточенными емкостями.

#### 3.2.1 Дуговое замыкание на землю по теории Петерсена

Согласно теории Петерсена [9] первичный пробой фазной изоляции происходит при максимуме напряжения: например, на фазе  $C$  на отрицательной полярности. В результате замыкания фазные ( $C_{ф}$ ) и междуфазные емкости ( $C_{мф}$ ) неповреждённых фаз оказываются включёнными параллельно (см рисунок 2.1, п. 2). При этом происходит практически мгновенное перераспределение зарядов между ними. Источник будет дозаряжать/перезаряжать емкости неповрежденных фаз ЭС до  $1,5U_{ф.м}$  в высокочастотном колебательном процессе. Частота свободных колебаний  $\beta_1$  во много раз больше промышленной частоты сети ( $\beta_1 \gg \omega$ ), поэтому приближенно можно считать, что за полупериод свободных колебаний напряжение источника остается примерно постоянным.

При зажигании дуги частота свободных колебаний, существующих лишь полупериод  $0,5T_1$  ( $T_1=2\pi/\beta_1$ ), определяется суммарной (эквивалентной) индуктивностью  $L=L_s+L_\phi$  цепи замыкания на землю (согласно схеме замещения, показанной на рисунке 2.1) и ёмкостью неповреждённых фаз. Если бы замыкание оказалось устойчивым («металлическим»), то после затухания свободных колебаний переходный процесс был бы закончен.

Однако, при достижении на неповреждённой фазе максимального напряжения [64]  $U_{B.max} \cong U_{A.max} \cong 1,5U_{\phi.m} + U_{\phi.m}(1-k) \cong 2,22U_{\phi.m}$  ( $k \cong 0,2$  – коэффициент электростатической связи для реальных ЭС; потери в сети не принимаются во внимание) ток свободной составляющей равен нулю, и дуга гаснет. После этого оставшийся заряд на обеих неповреждённых фазах  $Q=2C_\phi 2,22U_{\phi.m}$  распределяется поровну между ёмкостями всех трех фаз с частотой  $f'_2$  (3.1), определяемой параметрами контура прямой последовательности:

$$f'_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_\phi + 3C_{м\phi})}}. \quad (3.1)$$

Избыточный заряд на фазах формирует мало изменяющееся напряжение смещения нейтрали для всей сети [9]. При первом зажигании дуги смещение нейтрали оказывается равным  $U_{N1} \cong 2/3U_{B.max} \cong 1,5U_{\phi.m}$  [63], при повторном зажигании –  $U_{N2} \cong 2,19U_{\phi.m}$ .

После погасания дуги на повреждённой фазе спустя полпериода  $T_2/2=1/2f'_2$  появляется пик восстанавливающегося напряжения, называемый «пиком гашения» [65]. Так как заряд ёмкости неповреждённых фаз переходит на ёмкость повреждённой фазы через индуктивность эквивалентного источника  $L_s$ , процесс имеет колебательный характер. Повышение напряжения на повреждённой фазе создает возможность повторного зажигания дуги на прежнем месте, еще сохранившем остаточную ионизацию. Особенностью данной теоретической модели [66] является то, что повторные зажигания происходят регулярно через каждый полупериод промышленной частоты при максимуме напряжения на повреждённой фазе. На каждом полупериоде перенапряжения они изменяют свой знак. Неоправданным допущением этой модели (но для оценки максимальных перенапряжений – полезным) является предположение о повторных зажиганиях дуги в моменты максимума напряжения на повреждённой фазе. Такое

предположение, несомненно, опровергается длительным мониторингом переходных процессов в ЭС.

В процессе горения заземляющей дуги диэлектрическая прочность изоляции ослабленного участка постепенно снижается, изоляция разрушается, и повторные зажигания происходят зачастую при более низких напряжениях.

Для большего приближения поведения физической модели к реальным процессам в лабораторном стенде также реализована модель горения дуги по теории Петерса и Слепяна.

### 3.2.2 Дуговое замыкание на землю по теории Петерса и Слепяна

Согласно теории Петерса и Слепяна [62] первичное зажигание дуги происходит при максимальном (по модулю) напряжении на повреждённой фазе, а гашение - при прохождении промышленной составляющей тока замыкания через нулевое значение. Эскалация напряжения на нейтрали ЭС не происходит, поэтому интенсивный переходный процесс не возникает. Длительность горения заземляющей дуги приближается к полупериоду промышленной частоты, при этом отсутствуют пики гашения, и напряжение на повреждённой фазе восстанавливается плавно с промышленной частотой.

В наиболее неблагоприятный момент повторного зажигания напряжение на повреждённой фазе составит  $U_{\text{пр}} = -2U_{\text{ф.м}}$ , а на неповреждённых  $\pm 0,5U_{\text{ф.м}}$ . При таком характере горения дуги, перенапряжения в сети без потерь достигают значения:

$$U_{\text{max}} = 1,5U_{\text{ф.м}} + |U_{\text{пр}}|(1-k), \quad (3.2)$$

не увеличиваясь в процессе повторения зажиганий (не считая первого) и не меняя знака. Токи замыкания на землю представляют собой высокочастотные колебания с частотой  $\beta_1$ , наложенные на ток промышленной частоты. Особенностью данного режима горения дуги, является то, что максимальное напряжение смещение нейтрали не превышает фазное значение, т.е.  $U_{N\text{max}} < U_{\text{ф.м}}$ . Ограниченное на этом уровне напряжение смещение нейтрали говорит о том, что дуговые перенапряжения, согласно формуле (3.2) при таком характере горения дуги принципиально меньше, чем по теории Петерсена.

Рассмотренные теории в отличие от теории Белякова Н.Н. не учитывают процесс восстановления электрической прочности в месте поврежденной фазной изоляции.

### 3.2.3 Дуговое замыкание на землю по теории Белякова

По теории Белякова дуга погасает при каждом прохождении тока замыкания через нуль, но приближенно учитывается процесс восстановления электрической прочности на дуговом промежутке. Если напряжение пика гашения превышает значение примерно равное  $\sim 0,4U_{\phi.m}$  [64], то происходит повторное зажигание дуги, т.е. считается, что в момент пика гашения электрическая прочность изоляции ограничена указанным выше значением. Это вызывает повторное зажигание дуги, при этом предельное перенапряжение ( $3,2 U_{\phi.m}$ ) достигается уже при втором зажигании дуги, тогда как по теории Петерсена от зажигания к зажиганию происходит постепенное возрастание перенапряжений.

Напряжение пика гашения ( $U_{\text{пг}} < 0,4U_{\phi.m}$ ) ограничивает напряжение смещения нейтрали величиной  $1,2U_{\phi.m}$ , поэтому эскалация напряжения на нейтрали заметно ограничена по сравнению с теорией Петерсена. Теория Белякова по величине кратности максимальных перенапряжений занимает среднее место между теорией Петерсена и Петерса-Слепяна.

В реальности уровни перенапряжений значительно ниже, чем теоретические оценки, т.к. на переходный процесс оказывают влияние активные потери в цепи замыкания (в канале дуги, проводах, земле), проводимости утечки изоляции, дополнительное линейное оборудование (трансформаторы напряжения контроля изоляции) и многое другое.

Существенную роль в механизме развития дуговых перенапряжений играет характер восстановления электрической прочности дугового промежутка после гашения дуги. От скорости восстановления прочности дугового промежутка и ее величины зависит амплитуда смещения напряжения нейтрали ЭС и, следовательно, и кратность перенапряжений.

Практическое моделирование процесса восстановления изоляционного промежутка с изменяемой скоростью восстановления электрической прочности

является достаточно сложной задачей. Поэтому в физической установке воспроизводится лишь теории, предложенные Петерсеном и Петерсом и Слепяном.

Модели заземляющих дуг, горящих по теориям Петерсена и Петерса и Слепяна в лабораторном стенде реализованы с помощью полупроводниковых ключей. Подбор параметров полупроводниковых приборов и других компонентов, реализующих эти модели в физической установке, выполнен с помощью программы компьютерного схемотехнического моделирования.

### **3.3 Компьютерная PSPICE модель низковольтного физического стенда**

#### **3.3.1 Основные характеристики программы PSPICE**

Моделирование сложных электрических схем (протекающих в них процессов), может быть выполнен с помощью программы PSPICE или её аналогов [67]. PSPICE — это комплекс программ схемотехнического моделирования общего назначения, который позволяет проводить до 10 типов анализа электрических схем. Основные виды анализа приведены ниже.

- 1) Анализ нелинейных цепей постоянного тока (Non-linear DC analysis).
- 2) Анализ переходных процессов и анализ Фурье в нелинейных цепях (Nonlinear transient and Fourier analysis) позволяет рассчитать напряжение и ток как функции времени; анализ Фурье дает частотный спектр сигналов.
- 3) Анализ линейных цепей переменного тока (Linear AC Analysis) вычисляет выходную функцию как функцию частоты, строится график Боде.
- 4) Параметрический анализ (Parametric analysis) и т.д.

Кроме того, PSPICE имеет обширные библиотеки, включающие модели реальных как аналоговых, так и цифровых элементов, предоставляемых самими производителями. Это делает программу полезным инструментом для исследования широкого круга аналоговых и цифровых схем. К числу первых относятся многофазные электрические сети и электрические системы любых классов напряжения. Все исследования могут быть выполнены при различных температурах. Температура по умолчанию — 300°K. Схема может содержать следующие компоненты: зависимые и независимые источники тока и напряжения, все типы пассивных элементов, многоканальные/многофазные линии передачи (с распределёнными параметрами), управляемые ключи, а также все

полупроводниковые элементы, нелинейные резисторы и т.д. При отсутствии какого-либо требуемого элемента, последний может быть представлен макро моделью в компонентном базисе программы.

### 3.3.2 Компьютерное моделирование дугового замыкания

Для того, чтобы смоделировать единичное дуговое замыкание на землю, может использоваться ключ, управляемый напряжением (в PSpice это Sbreak). Однако для большей достоверности поведения дуги необходимо воспроизвести ее периодическое зажигание и гашение в определенные моменты времени.

Чтобы реализовать такой алгоритм поведения дуги применяется динистор, моделирующий дефектный изоляционный промежуток на повреждённой фазе. Переходя в проводящее низкоомное состояние, динистор управляет симистором, открывая его *p-n* переходы. Таким образом, динистор и симистор моделируют дугу. Применение различных динисторов (отпираемых различным напряжением) позволило добиться эффекта изменения электрической прочности изоляции повреждённой фазы. Сопротивление канала дуги резко нелинейно. В использованной модели заземляющей дуги последовательно с полупроводниковым ключом включалось линейное сопротивление, значительно превышающее сопротивление открытых переходов симистора. Хотя такая модель дуги с практически линейным сопротивлением лишь приблизительно описывает ее реальное поведение, в исследуемых переходных процессах это не вносит заметных расчётных погрешностей. В результате, получена достоверная компьютерная модель физической низковольтной установки, представленная на рисунке 3.2.

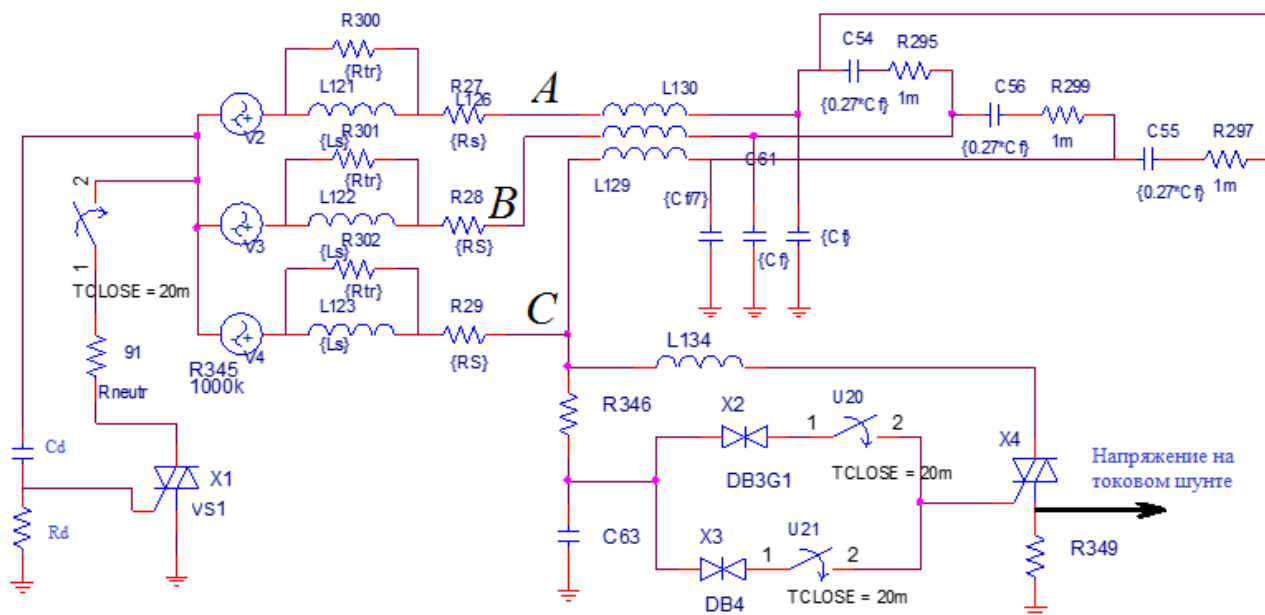


Рисунок 3.2 - Компьютерная SPICE-модель физической модели

Посредством компьютерного моделирования получены компьютерные осциллограммы переходных процессов при ОДЗ на фазе С, соответствующие теориям Петерсена и Петерса и Слепяна. Они приведены на рисунках 3.3, 3.4.

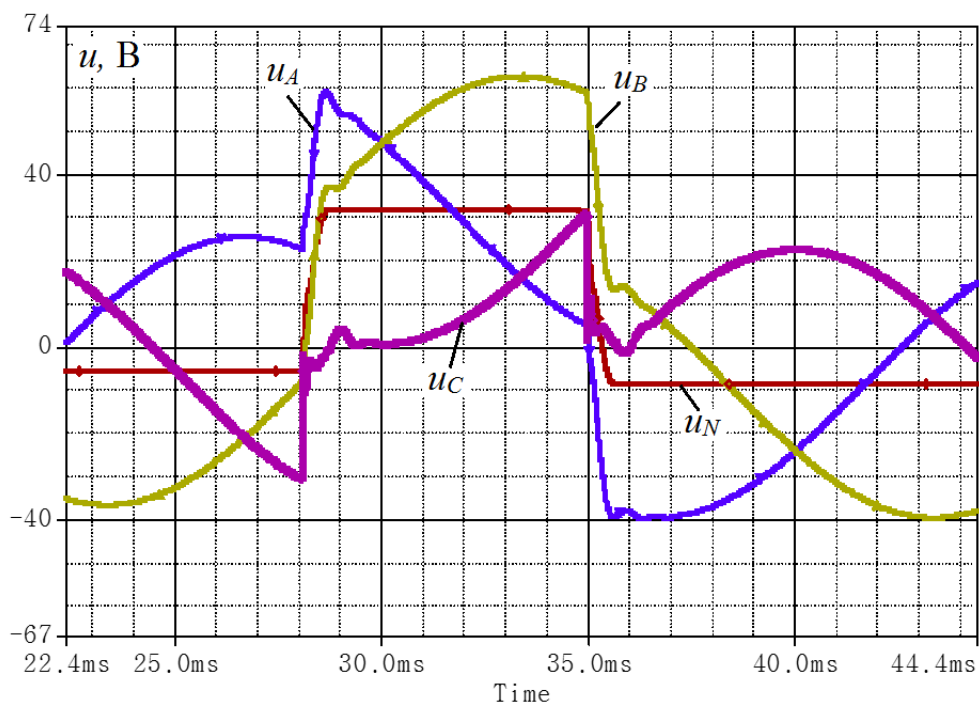


Рисунок 3.3 - Компьютерное моделирование дуговых перенапряжений в лабораторном стенде при ОДЗ согласно теории горения дуги по Петерсену (напряжение пробоя фазной изоляции 30В)



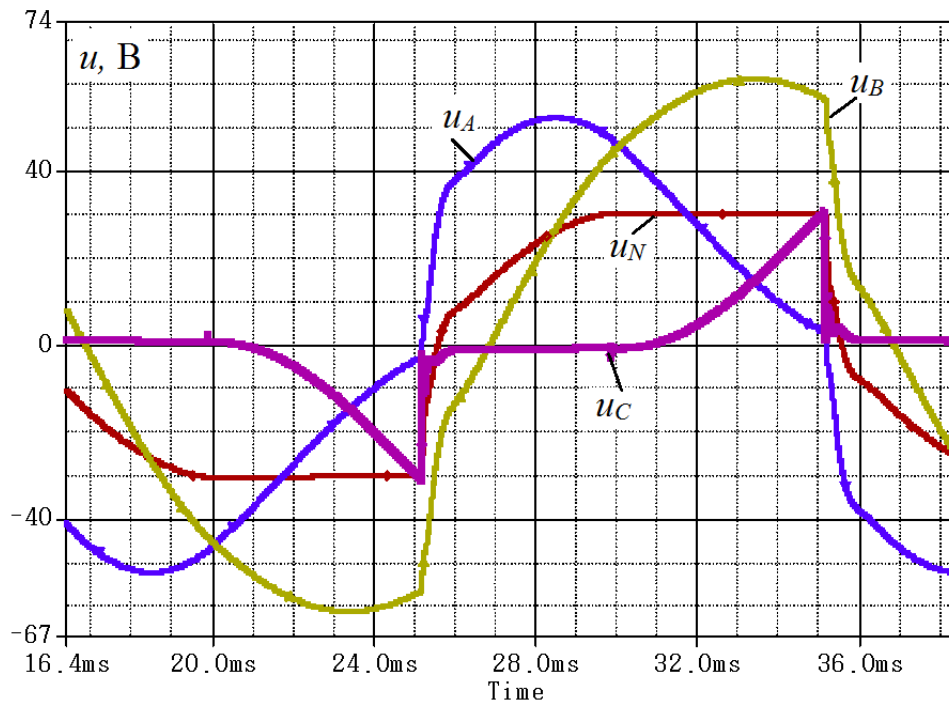


Рисунок 3.4 - Компьютерное моделирование перенапряжений в лабораторном стенде согласно теории Петерса и Слепяна (напряжение пробоя фазной изоляции 30В)

Реализация механизма горения дуги по теории Петерса и Слепяна на практике сопряжена со сложностью выбора подходящего полупроводникового ключа (симистора). В ходе вычислительных опытов было обнаружено, что маломощный симистор может не отключить ток замыкания («дуги») при первом прохождении им нулевого значения, а силовой отключает. Это связано с разным временем стекания избыточного заряда (восстановления) с полупроводниковых переходов в маломощном («медленном») и силовом («быстром») симисторах [68, 69].

### 3.4 Скоростные характеристики симистора

Время отключения симистора – промежуток времени от момента, когда ток симистора достиг нулевого значения до момента восстановления его запирающей способности.

Выключение симистора, как и тиристора, происходит при переходе через ноль тока, проходящего через его главные электроды. Обратное восстановление происходит из-за некоторого остаточного заряда, накопленного между условными р-п-р-п структурами, она изображены на рисунке 3.5.

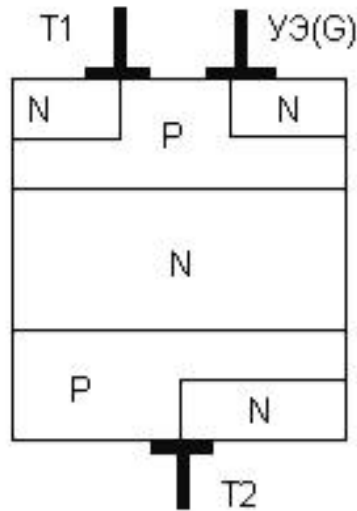


Рисунок 3.5 - Структура симистора: T2 – условный анод (УА), T1- условный катод (УК), УЭ – управляющий электрод

Поэтому при смене полярности симистору требуется некоторое время чтобы перезарядиться на текущую полярность. Процесс занимает определенное время. За это время полярность вновь может поменяться. Скорость изменения напряжения при коммутации, определяется инерционностью процесса обратного восстановления симистора при отключении индуктивной нагрузки и не должна превышать некоторого значения, называемого критической скоростью изменения напряжения при коммутации.

В модели горения дуги по Петерсу и Слепяну используется слаботорочный, «медленный» симистор. На рисунке 3.6 приведена схема измерения скоростных характеристик симистора на физической модели заземляющей дуги для выше указанной модели горения дуги. На осциллограмме, приведенной на рисунке 3.7, изображен процесс попыток отключения высокочастотной составляющей тока замыкания - моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , когда ток проходит через нулевое значение. Обе попытки не приводят к запираению симистора.

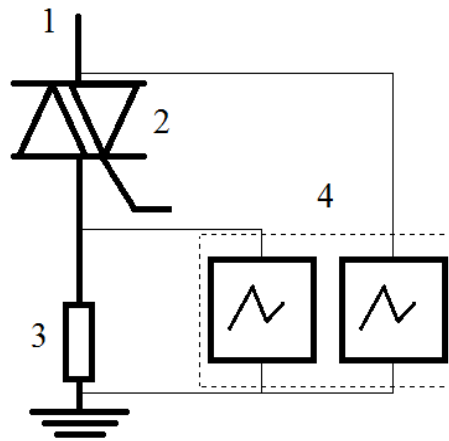


Рисунок 3.6 - Схема измерения напряжения на симисторе: 1- к «поврежденной» фазе лабораторной установки, 2 – маломощный симистор, 3 – токовый шунт (1 Ом), 4 – двухканальный осциллограф

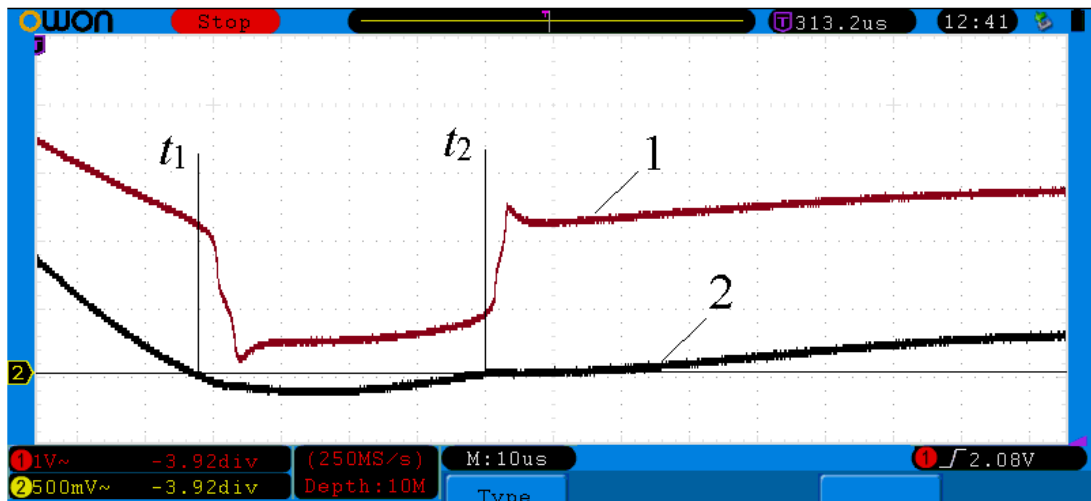


Рисунок 3.7 - Осциллограммы тока и напряжения на симисторе (сигналы инвертированы);  
1- напряжение на симисторе, 2- напряжение на шунте.

В некоторых случаях симистору удаётся отключить высокочастотную составляющую, причем такое событие наиболее часто случается при положительной полярности тока. На осциллограмме (рисунок 3.8) при третьем прохождении тока ( $t_3$ ) через ноль, когда его производная достаточно мала, происходит его отключение.

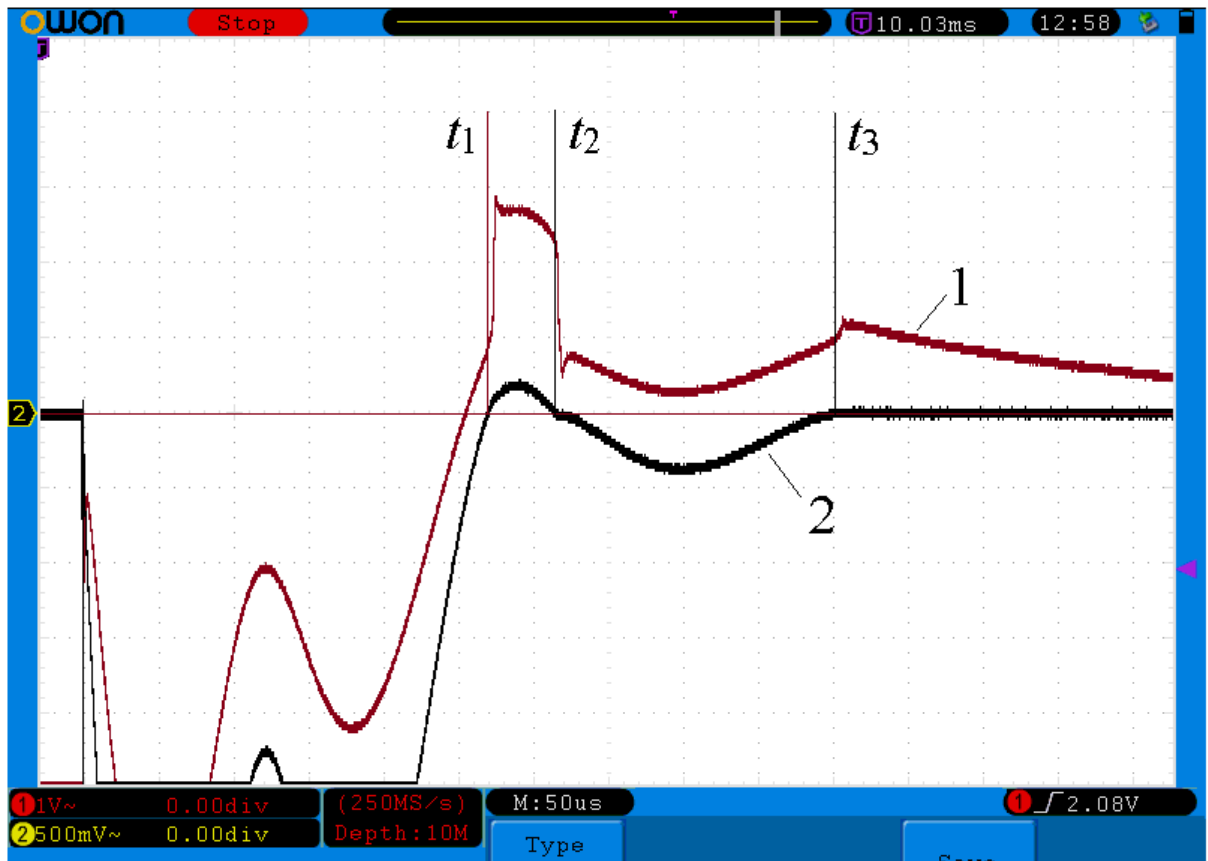


Рисунок 3.8. Осциллограмма тока и напряжения на симисторе (сигналы инвертированы); 1- напряжение на симисторе, 2- напряжение на шунте (ток).

Для реализации теории Петерсена достаточно использовать более «быстрый» симистор, прерывающий ток замыкания при первом прохождении им нулевого значения.

### 3.5 Физическая модель

В установке применяется простейшая модель распределительной сети, в которой линии ЭС смоделированы элементами с сосредоточенными параметрами. Без потери основных физических процессов линии представлены сосредоточенными фазными и междуфазными емкостями (конденсаторами), а источник питания (источник напряжения с внутренней индуктивностью и сопротивлением) – силовым трансформатором.

Учёт нагрузки может быть опущен, поскольку последний, в основном, изменяет лишь частоты собственных колебаний в сети и влияет на коэффициенты затухания свободных колебаний.

Симисторы, моделирующие дугу, управляются посредством интегрирующей и запускающей цепочки, состоящей из конденсатора и резистора. Значения параметров ёмкости и резистора выбираются из условия обеспечения требуемого тока отпирания в переходе управляющий электрод-условный катод симистора. Два механизма реализации гашения дуги происходят естественным образом в разных полупроводниковых приборах (см. п. 3.4).

Повторные зажигания заземляющей дуги по обеим моделям легко осуществляются подбором напряжения пробоя динистора близкого к фазному максимальному значению. Эскалация напряжения на нейтрали сети по теории Петерсена может встречаться в реальных сетях лишь крайне редко и фрагментарно, например, когда по каким-то причинам электрическая прочность дефектной изоляции увеличивается. Для моделирования такой ситуации предусмотрен набор параллельно включённых динисторов с разными пробивными напряжениями. Путем регистрации длительного переходного процесса и ручного переключения выключателей (SA-7...SA-10, рисунок 3.9) на динистор с большим напряжением пробоя удастся получить фрагмент процесса с возрастающим напряжением на нейтрали ЭС.

#### **3.4.1 Схема физической модели**

На рисунке 3.9. приведена схема физической модели. Глухое («металлическое») замыкание на поврежденной фазе моделируется специально предусмотренным переключателем SA1.

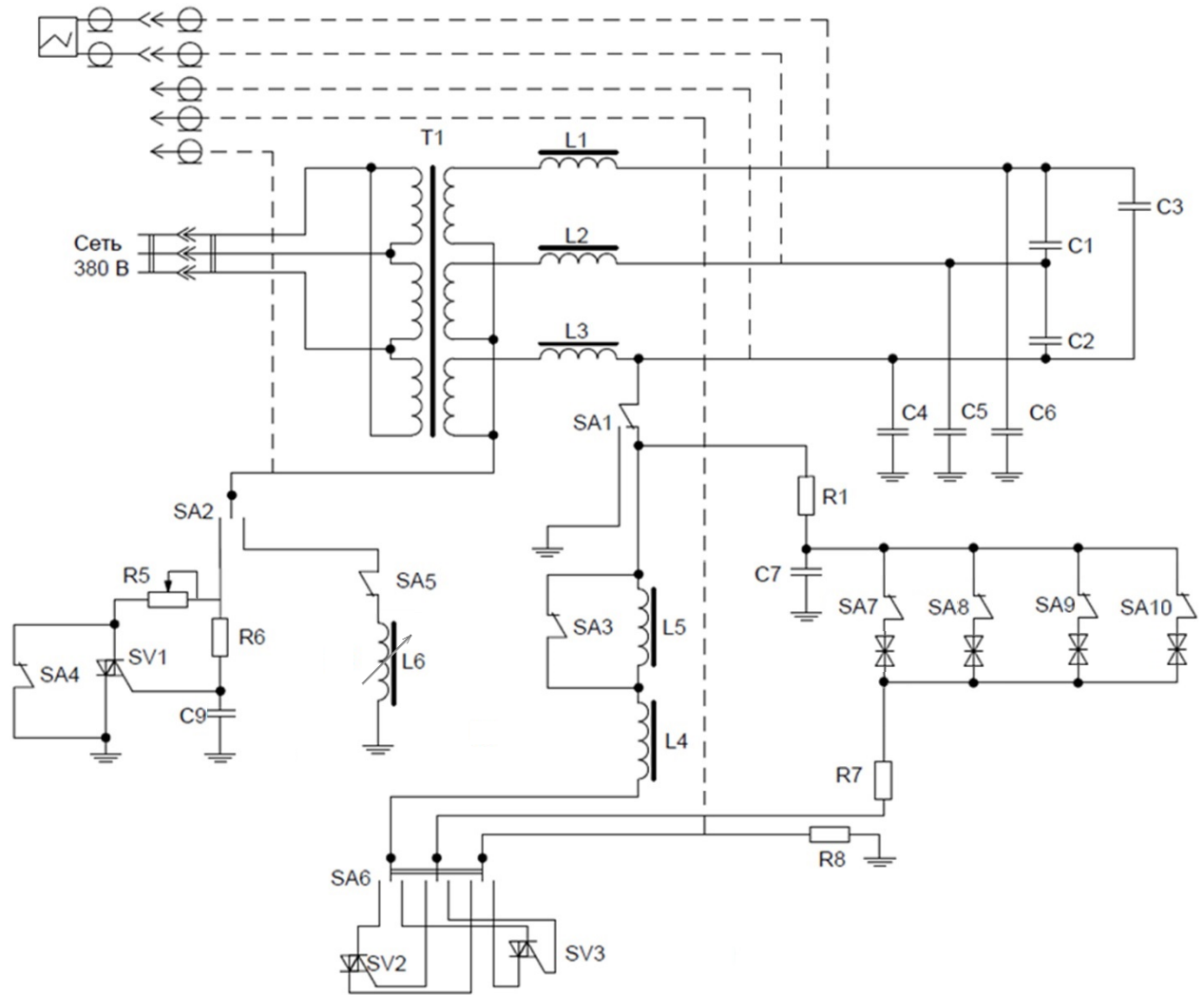


Рисунок 3.9 - Принципиальная схема лабораторной установки

В реальной электрической сети всегда в токе замыкания присутствует разрядная составляющая (с частотой колебаний  $\beta_2$  - см. п. 2), обусловленная разрядом емкости поврежденной фазы. Для формирования этой составляющей тока замыкания предусмотрена специальная катушка индуктивности L5. Ее можно рассматривать как некоторое отнесение места замыкания от центра питания. В лабораторной установке, на рисунке 3.9, реализована возможность изменять эту индуктивность. Тем самым изменяется частота свободных колебаний в разрядном контуре [70, 71]. В перезарядном контуре влияние этой индуктивности ослаблено большим значением индуктивности источника.

В роли источника выступает трехфазный трансформатор 380/42 В мощностью 4 кВт с соединением обмоток треугольник-звезда с выведенной нейтралью. Индуктивности L1-L3 являются добавочными к индуктивности трансформатора.

Увеличение индуктивности необходимо для получения частот, близких к частотам в реальных распределительных сетях. Согласно [9, 25] для распределительных сетей характерные частоты (перезарядных процессов) чаще находятся в диапазоне 1-3 кГц: они определяются емкостно-индуктивными параметрами линий, эквивалентного источника и нагрузки. Частота собственных колебаний в указанном диапазоне частот обеспечена также выбором соответствующих фазных и междуфазных емкостей.

Всего в схеме имеется три симистора, два из которых моделируют разные режимы (теории) горения дуги:

SV3 – сильноточный «быстрый» симистор моделирует заземляющую дугу по теории Петерсена;

SV2 – слаботочный «медленный» симистор моделирует заземляющую дугу по теории Петерса и Слепяна.

Для реализации разных способов заземления к выведенной нейтрали вторичной обмотки трансформатора могут быть подключены резистор или катушка индуктивности (ДГР). Трехпозиционный выключатель SA2 служит для перевода модели в режим резистивного заземления, а также в режим работы с ИПЗ или в режим с ДГР. SV1 - симистор, моделирующий работу ИПЗ. При переводе выключателя в среднее положение имитируется изолированная нейтраль. Выключатель SA4 шунтирует симистор SV1 для постоянного резистивного заземления.

Катушки индуктивности, моделирующие дугогасящий реактор, представляют собой однофазный многообмоточный понижающий трансформатор на напряжение 220В. Первичная обмотка трансформатора настроена на полную компенсацию ЕТЗЗ регулированием зазора в магнитопроводе. С этой целью трансформатор был расшихтован и собран со съёмной верхней частью стального магнитопровода. Для моделирования режима недо- или перекомпенсации вторичная обмотка L7 (на схеме не показана) с малым количеством витков включается встречно или согласно основной обмотке L6. За включение отвечает выключатель SA5.

Механизм импульсного резистивного заземления (ИПЗ) обеспечивается работой симистора SV1, подключающего заземляющий резистор к нейтрали только при перемежающихся ОДЗ, т.е. при переводе схемы в режим установившегося

замыкания выключателем SA1 симистор SV1 автоматически отключает нейтрале-заземляющий резистор R5.

Основным органом управления симистором ИРЗ служит дифференцирующе-запускающая цепочка (R6-C9). Благодаря малой постоянной времени RC-цепи происходит дифференцирование напряжения на нейтрали сети, и формируется сигнал достаточный для запуска симистора и подключения нейтрале-заземляющего резистора к «земле» установки.

При устойчивом замыкании сигнал недостаточен для включения симисторного ключа. При необходимости режим ИРЗ может быть заменен на постоянное подключение к нейтрали заземляющего резистора R5. Переключения в цепи нейтрале-заземляющего резистора позволяют получать коэффициенты резистивной компенсации  $K_R = \{1.0; 1.1\}$ .

Для измерения фазных напряжений, напряжения в нейтрали используются омические делители, соединенные с многоканальной платой сбора данных (АЦП). Ток замыкания осциллографируется путем измерения напряжения на шунте, включённом последовательно с симистором, моделирующим дугу. Вывод информации на монитор в виде осциллограмм осуществляется с помощью программы ADCLab. Внешний вид установки представлен на рисунке 3.10.

На тыльной стороне установки предусмотрены специальные клеммы для вывода фазных напряжений и напряжения на нейтрали. Это позволяет испытать модель устройства глубокого ограничения дуговых перенапряжений (УГО), которое разработано на кафедре ТВН НГТУ и предназначено для ограничения дуговых перенапряжений до уровня порядка  $1.8U_{ф.m}$  совместно с работой устройства ИРЗ.



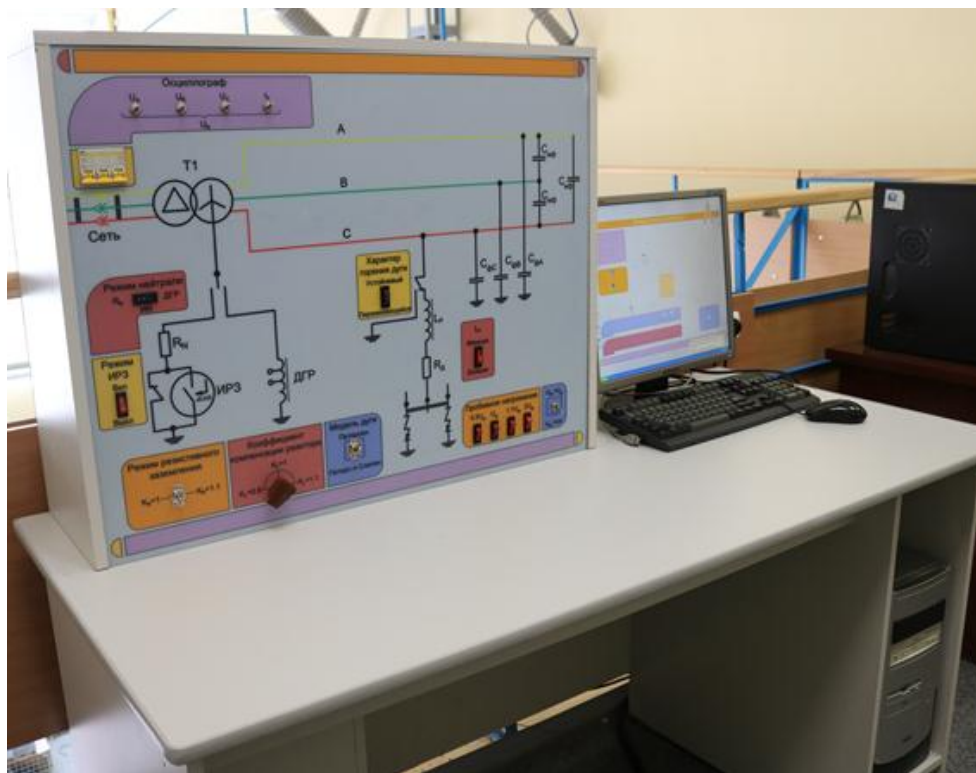


Рисунок 3.10 - Внешний вид лабораторной установки

### 3.6 Использование стенда в учебных целях

Установка применяется для ознакомления студентов с основными моделями горения дуги и, в целом, процессами, происходящими при однофазных дуговых замыканиях в ЭС.

Для сети с изолированной нейтралью снимаются осциллограммы нормального режима, устойчивого замыкания на землю и с перемежающейся дугой. Поскольку питание стенда происходит от реальной сети на осциллограммах напряжений и токов наблюдаются реальные искажения.

При моделировании на физической установке механизма горения дуги по теории Петерсена напряжение на изолированной нейтрали имеет форму близкую к меандру (рисунок 3.11). Такая форма получается за счёт нестекания заряда с нейтрали после гашения дуги (после закрытия симистора, моделирующего заземляющую дугу).

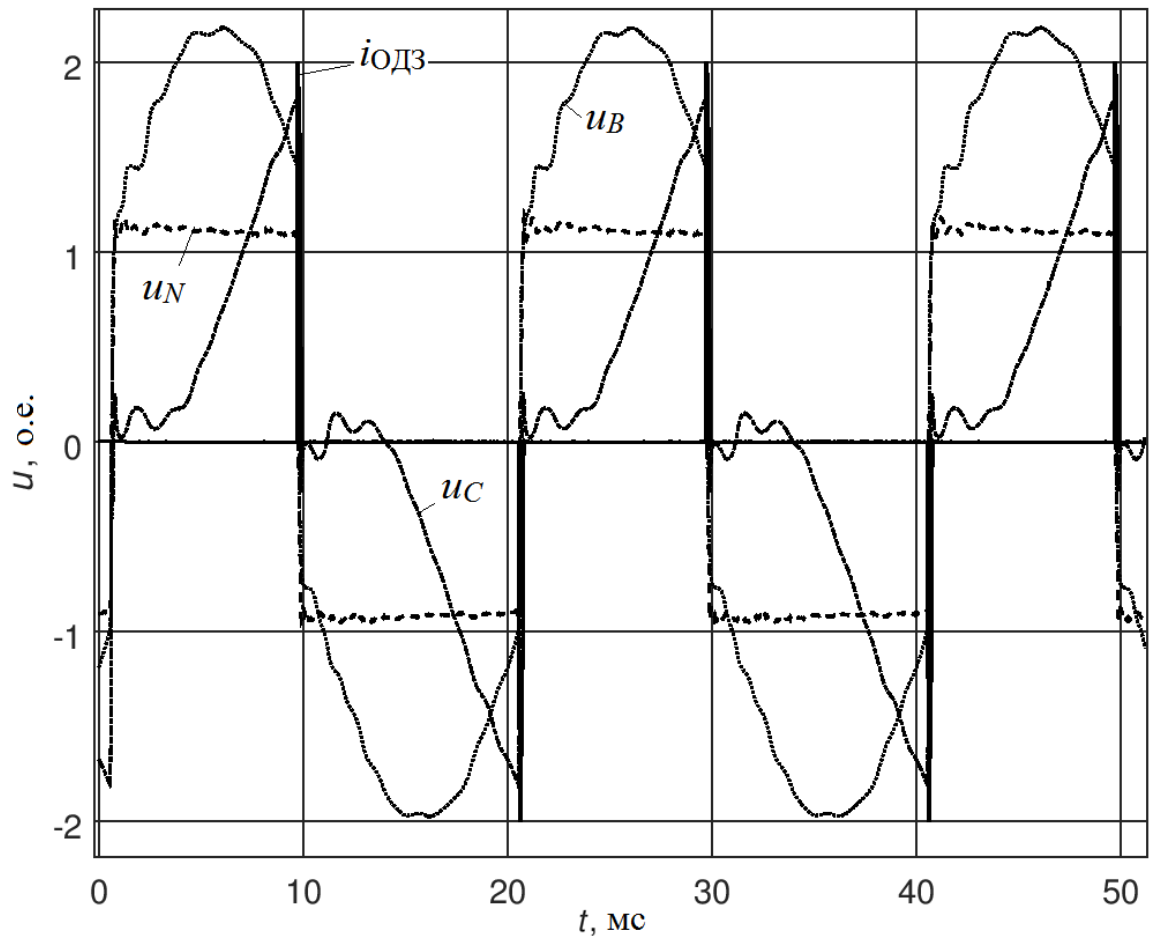


Рисунок 3.11 - Осциллограмма напряжения на нейтрали и ток дуги. Модель горения дуги по теории Петерсена

Также необходимо отметить формы импульсов тока дуги ( $i_{одз}$ ), приведенные на рисунке 3.12. Известно, что обрыв тока замыкания может происходить и на первых полупериодах свободных колебаний разрядной частоты [70]. Однако, в большинстве случаев сочетание емкостно-индуктивных параметров сетей таково, что самогашение дуги чаще происходит в нуле колебаний тока на перезарядной частоте. Этот механизм обрыва тока дуги путем подбора параметров зарядных и перезарядных контуров настроен на физической модели сети. Импульс имеет два пика, обусловленных наличием двух основных свободных частот: 1-й перезарядный контур образован ёмкостью неповрежденных фаз сети (фазной, междуфазной) и индуктивностью трансформатора; 2-й (разрядный) контур – сопротивление канал дуги, ёмкость на землю повреждённой фазы и её индуктивность.

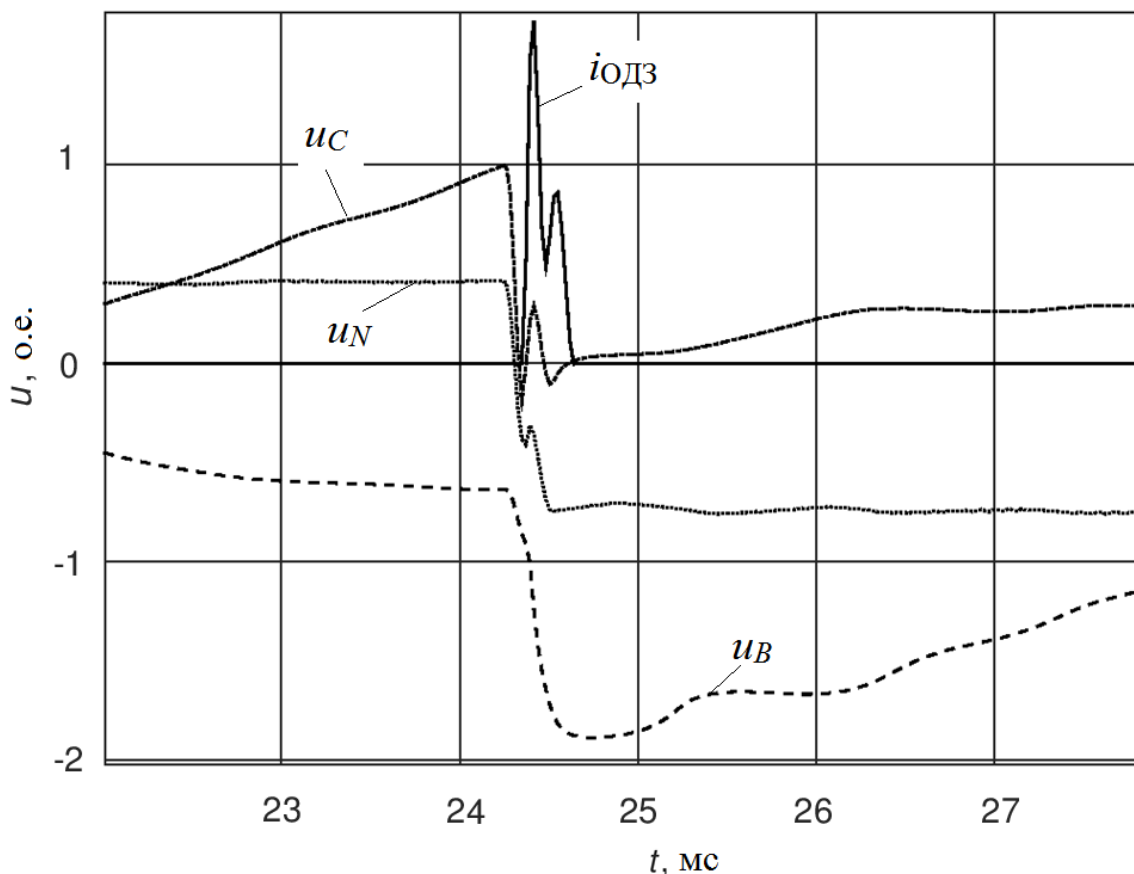


Рисунок 3.12 - Осциллограмма напряжения на нейтрали и тока дуги (характерны 2 пика).

Модель горения дуги по теории Петерсена

Таким образом, в реальных сетях при дуговых замыканиях на землю из-за наличия дополнительных контуров в ЭС, кривые напряжений и токов отличаются от теоретических кривых, представленных в учебной литературе (например, в [67, 72, 73]). В установку введена простейшая модель поврежденной линии, моделируемая катушкой индуктивности (дросселем), что позволяет более достоверно моделировать разрядный процесс.

На рисунке 3.13 приведены осциллограммы дугового замыкания по теории Петерса и Слепяна. Видно отсутствие характерного пика восстанавливающегося напряжения  $u_C$  (выделено овалом), а напряжение на нейтрали  $u_N$  увеличивается плавно.

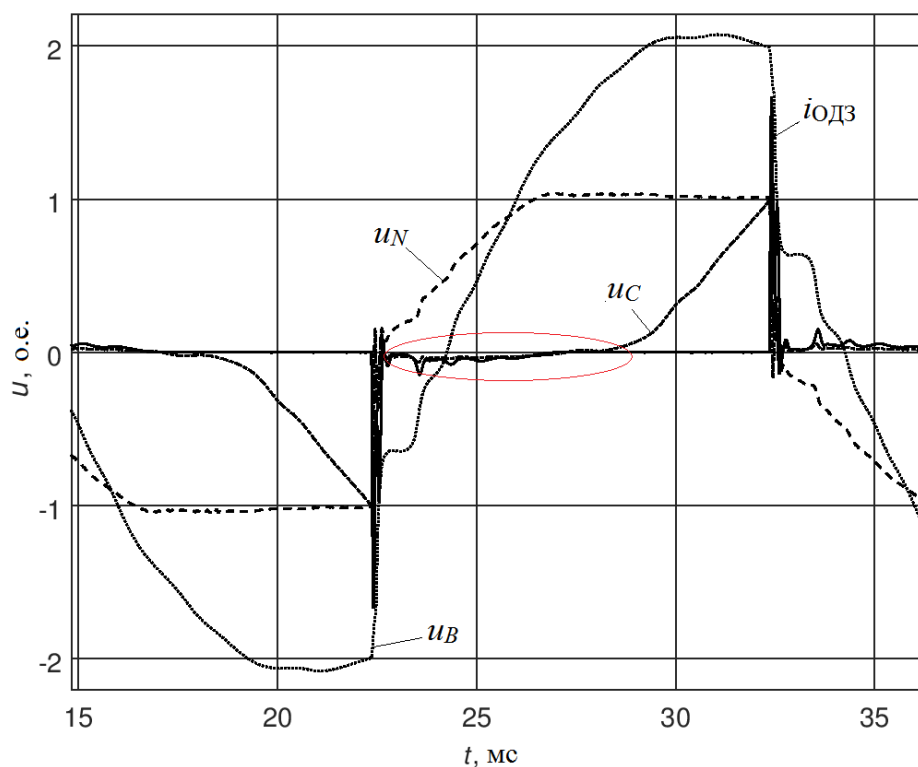


Рисунок 3.13 - Осциллограмма дугового замыкания по теории Петерса и Слепяна.

Моделирование перемежающейся дуги, которая гаснет при прохождении тока (*i*) промышленной частоты через нуль, осуществляется подключением «медленного» симистора (см. п. 3.4). Сравнивая рисунки 3.13 и 3.3, можно заметить сходство. Переходный процесс на рисунке 3.3 получен с использованием программы PSPICE, симулирующей физическую модель лабораторной установки [74].

Добротность разрядного контура сильно влияет на характер процесса при ОДЗ. Стоит отметить, что переходные процессы при ОДЗ в реальных ЭС полностью моделируемы на лабораторном стенде как для теорий Петерса и Слепяна, так и Петерсена.

При выполнении работ студентами сравниваются различные способы заземления нейтрали [75-77] и выявляется их влияние на кратность дуговых перенапряжений, на их количество за фиксированный интервал времени.

Режим заземления нейтрали через ДГР, настроенный на недо- или перекомпенсацию (рисунок 3.14) позволяет в режиме замыкания наблюдать колебания напряжения в сети, а также процессы биений колебаний при восстановлении напряжения на поврежденной фазе в режиме резонансной настройки ДГК (рисунок 3.15).

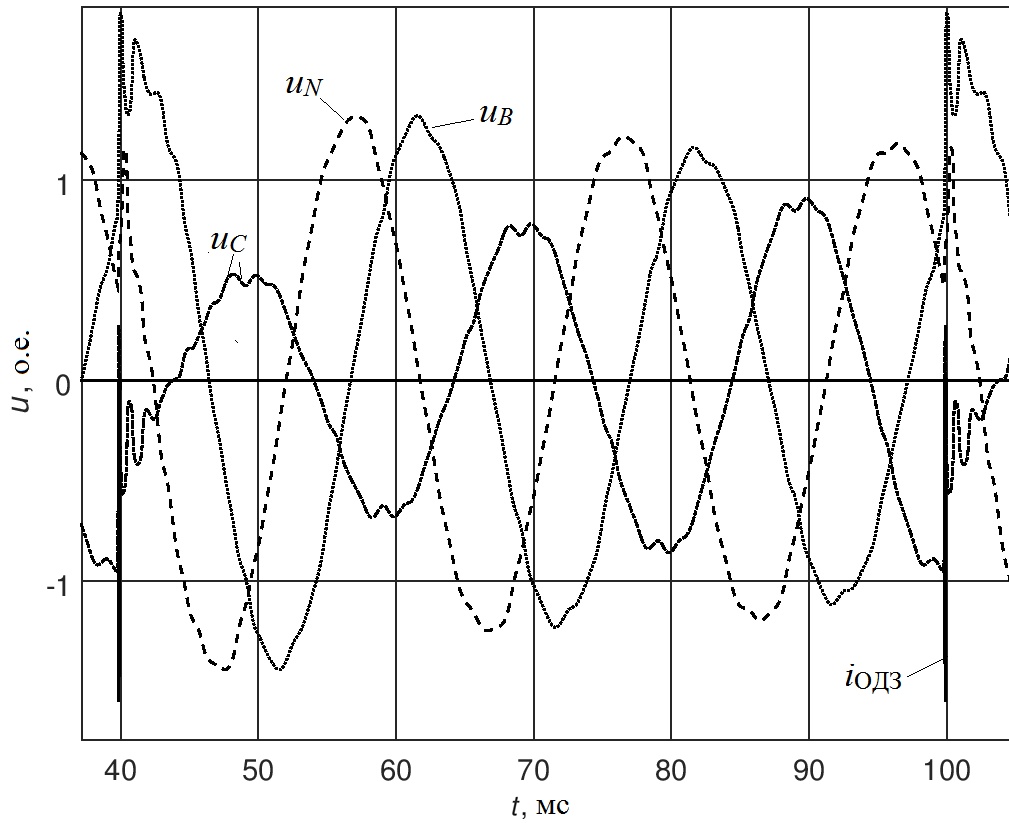


Рисунок 3.14 - Осциллограммы напряжений и тока при ОДЗ, сеть заземлена через ДГР  
 $K_L=1.1$

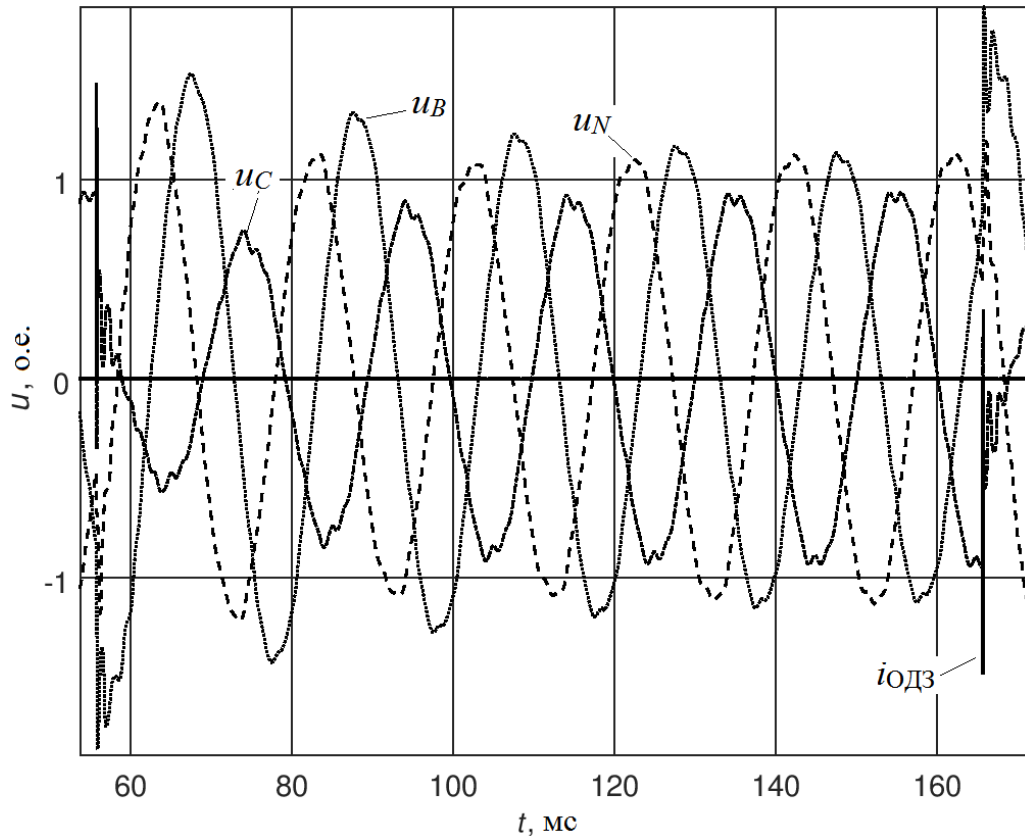


Рисунок 3.15 - Осциллограммы напряжений и тока при ОДЗ, сеть заземлена через ДГР  
 $K_L=1$

В режиме резистивно заземленной нейтрали исследуется влияние резистора на величину тока замыкания, проводится сравнение перенапряжений при различных моделях горения заземляющей дуги. На этом же этапе выполняется сравнение классического высокоомного резистивного постоянного заземления с импульсно-резистивным.

В режиме импульсно-резистивного заземления нейтрали механизм гашения заземляющей дуги полагается соответствующим теории Петерсена, т.е. самогашение дуги происходит при первом прохождении тока замыкания через нулевое значение.

На рисунке 3.16 представлены осциллограммы напряжений и тока в модели сети, работающей с ИРЗ [78].

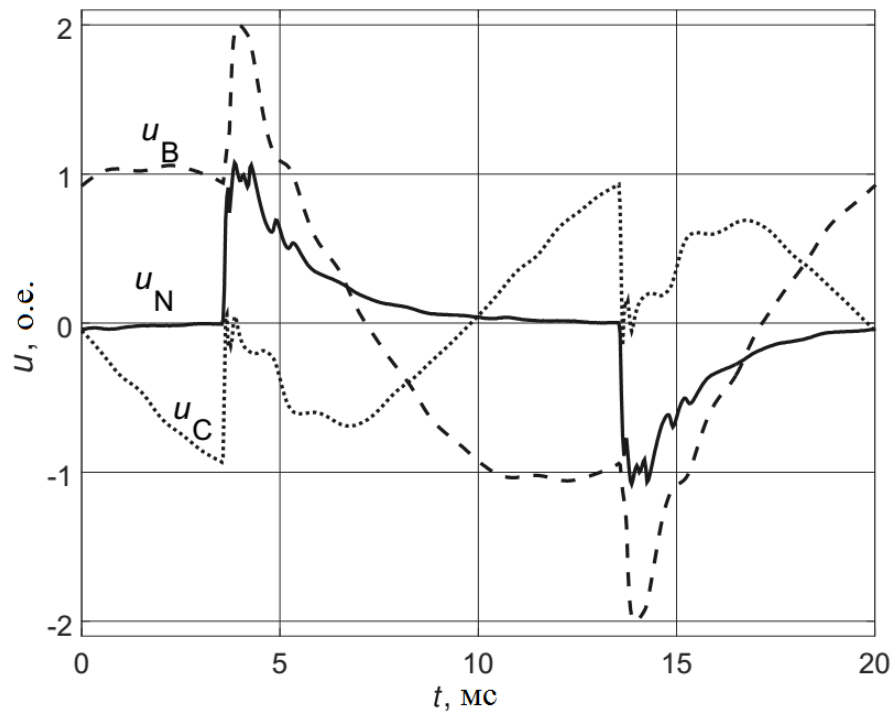


Рисунок 3.16 – Осциллограммы напряжений при дуговом замыкании на землю и работе ИРЗ. Теория горения дуги по Петерсену

В режиме ОДЗ переходные процессы с постоянно включённым нейтрале-заземляющим резистором и ИРЗ визуально слабо друг от друга отличимы. При переходе в режим установившегося замыкания (УОЗЗ) можно заметить, что при ИРЗ (рисунок 3.17) наблюдается снижение тока замыкания в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с сетью с постоянным резистивным заземлением (рисунок 3.18). На рисунках 3.17, 3.18 приведены увеличенные фрагменты осциллограммы тока замыкания в режиме «металлического» замыкания.

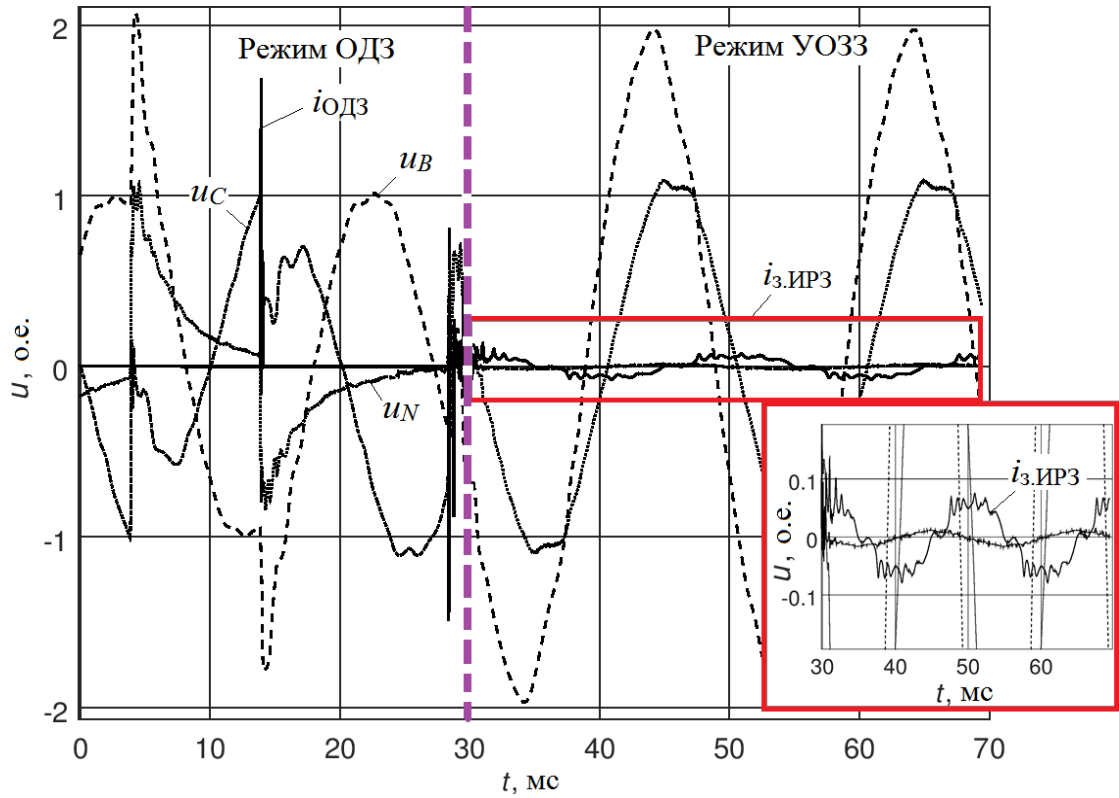


Рисунок 3.17 - Осциллограммы напряжений и токов при работе ИРЗ в режиме дугового замыкания по теории Петерсена (слева) и в режиме УОЗЗ (справа)

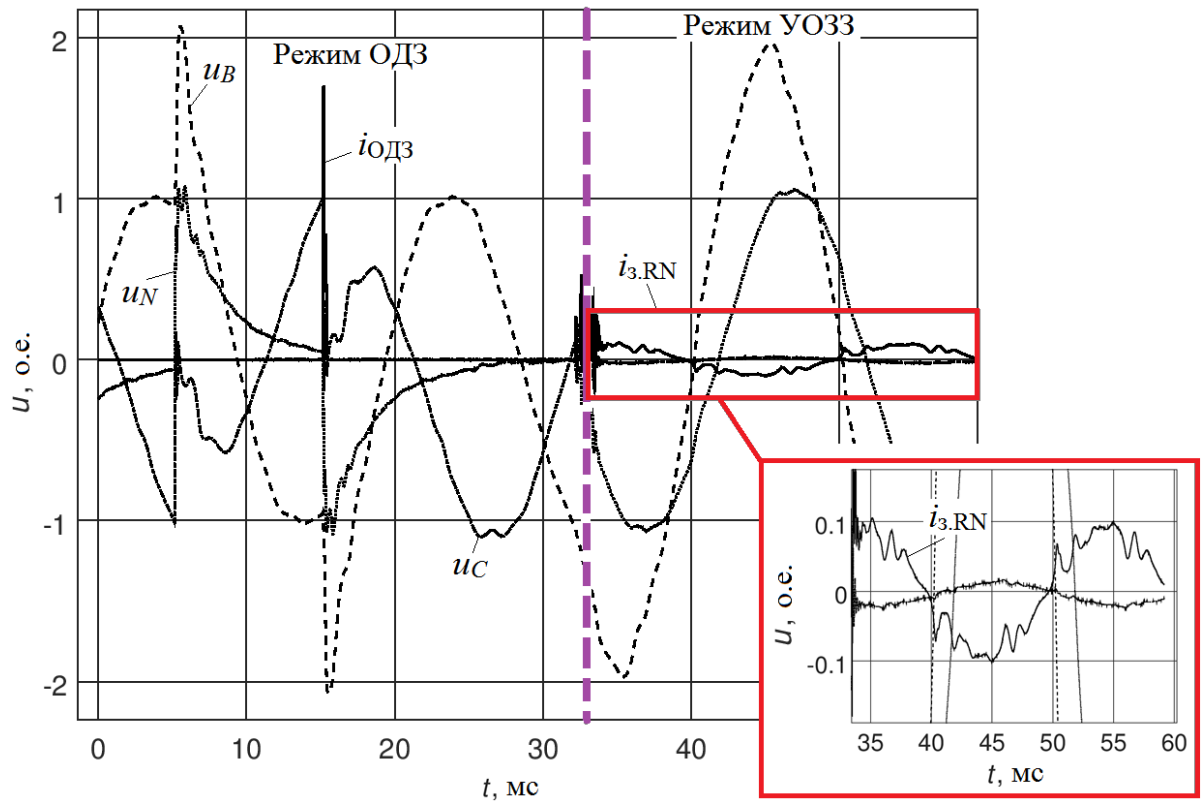


Рисунок 3.18 - Осциллограммы напряжений и токов при постоянном резистивном заземлении в режиме дугового замыкания по теории Петерсена (слева) и в режиме УОЗЗ (справа)

Еще одним принципиальным отличием между ИРЗ и постоянно включённым резистивным заземлением является небольшой промежуток времени задержки включения ИРЗ (п. 5.6.2). На рисунке 3.19,а изображен начальный скачек напряжения на резистивно заземленной нейтрали ЭС при ОДЗ. При ИРЗ (рисунок 3.19,б) в момент времени до  $t_1$  нейтраль изолирована, в момент  $t_1$  происходит подключение резистора к нейтрали через симистор. Далее переходные процессы в сети будут развиваться так же, как и для сети с постоянной резистивно заземленной нейтралью до отключения резистора ключом при прохождении тока в нейтрали через ноль. Осциллограммы, приведенные на рисунке 3.19, показывают крайне малое изменение напряжений при ИРЗ, что связано с быстрым включением в работу симистора, подключающего нейтрале-заземляющий резистор между нейтралью ЭС и землей.

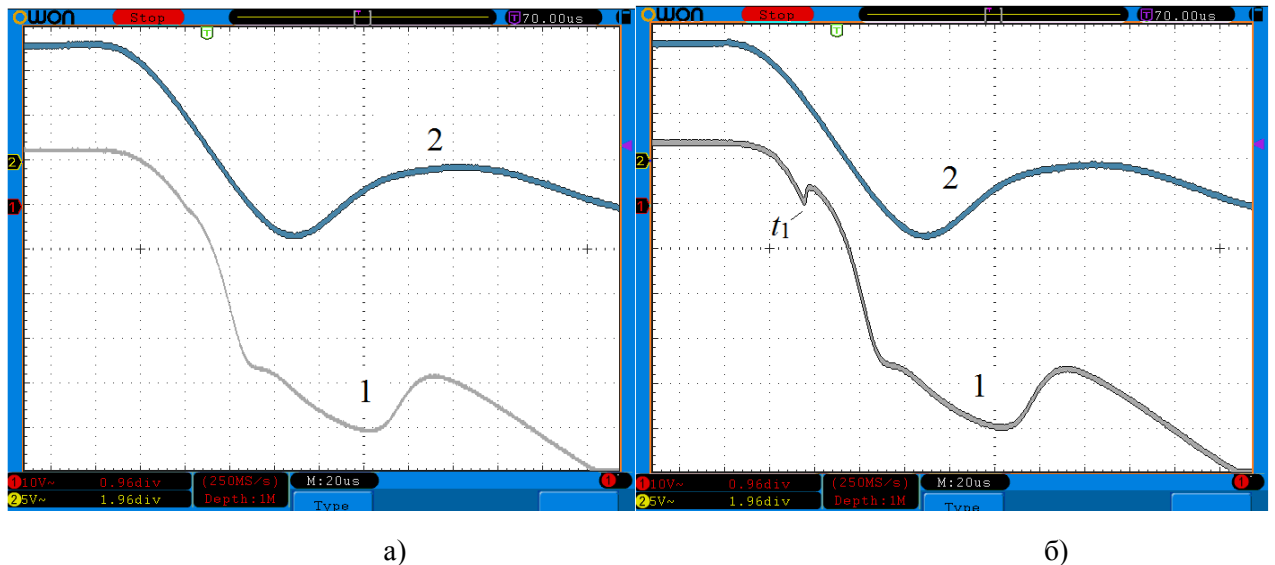


Рисунок 3.19 - Осциллограммы начального скачка напряжения на нейтрали (1) и напряжения на поврежденной фазе (2); а) - при постоянном резистивном заземлении; б) - при ИРЗ.

### Выводы по третьей главе

1. Для изготовленной физической модели ЭС с неэффективно заземленной нейтралью разработана модель заземляющей дуги, основными коммутирующими элементами которой выступают динистор и симистор. Такой подход позволяет реализовать классические механизмы горения дуги по Петерсену и Петерсу и Слепяну. Дискретно изменяемое напряжение пробоя подключаемого набора



динисторов позволяет имитировать изменение электрической прочности фазной изоляции.

2. Модель горения дуги по Петерсу и Слепяну построена на эффекте «медленного» обратного восстановления  $p$ - $n$  переходов симистора без введения дополнительных электронных компонентов и схем управления.

3. В физической модели ЭС воссоздан механизм ОДЗ с использованием модели горения дуги по Петерсену, в котором повторные зажигания происходят регулярно в зависимости от напряжения пробоя фазной изоляции. Полученные зависимости согласуются с теоретическими, а также с процессами моделируемыми на компьютере с помощью численной модели.

4. В реальных ЭС при дуговых замыканиях на землю из-за наличия дополнительных контуров в сети кривые напряжений и токов отличаются от теоретических полученных для простейшей одночастотной схемы замещения. Однако, в большинстве случаев сочетание емкостно-индуктивных параметров сетей таково, что самогашение дуги чаще происходит в нуле колебаний тока на перезарядной частоте. Этот механизм обрыва тока дуги путем подбора параметров зарядных и перезарядных контуров настроен на физической модели сети.

5. Создана физическая лабораторная модель ЭС с неэффективно заземленной нейтралью, используемая в учебных целях при проведении лабораторных работ по курсу «Перенапряжения и координация изоляции». Она наглядно демонстрирует различие переходных процессов при разных способах заземления нейтрали.

6. Крайне слабое отличие напряжения на нейтрали ЭС при работе ИРЗ по сравнению с режимом постоянно подключенного нейтрале-заземляющего резистора обусловлено быстрым вводом резистора в работу. Поэтому эффективность ИРЗ с точки зрения ограничения дуговых перенапряжений несколько не уступает постоянно подключенному нейтрале-заземляющему резистору.

7. Полученные на разработанном лабораторном стенде осциллограммы токов замыкания и фазных напряжений, соответствующих обеим классическим теориям горения заземляющих дуг, имеют вид близкий к осциллограммам в реальных ЭС.

## ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

### 4.1 Технические требования

Для практической реализации нового способа заземления нейтрали ЭС 6-35 кВ [56] необходимо изготовить прототип и проверить его работоспособность экспериментально. Изготовление предполагает проектирование, выбор деталей, монтаж и изготовление рабочих узлов устройства. Каждый компонент или узел, входящий в устройство, необходимо предварительно протестировать как по отдельности, так и в совокупности с другими элементами (узлами). Компьютерное моделирование, а также лабораторные исследования узлов устройства позволяют без лишних экономических и трудовых затрат оценить эффективность принимаемого конструкторского решения и облегчить подбор компонентов.

Устройство ИРЗ, как любое электрооборудование, должно соответствовать ряду требований и критериев. К ним относятся: номинальное рабочее напряжение и ток устройства, а также допустимые пределы их превышения, температурный диапазон работы, быстродействие (время включения), экологичность и электробезопасность.

Для определения технических требований к устройству и оценки дополнительных требований-ограничений в период его эксплуатации необходимы: моделирование электрофизических процессов, воздействующих на устройство, экспериментальная проверка расчётных параметров, тепловые испытания, а также его опытная эксплуатация.

### 4.2 Симисторы и их защитные варисторы

#### 4.2.1 Выбор симисторов

Как было отмечено во 2-й главе, наиболее важным компонентом устройства является полупроводниковый симисторный ключ, защищенный варисторами (см. п. 2.1.4). Остановимся подробнее на выборе симисторов.

В устройстве ИРЗ применены симисторы 12-го класса (на напряжение  $U_{DRM}=1,2$  кВ), которые с некоторым запасом по напряжению собраны в

последовательную цепь в соответствии с рабочим напряжением электрической сети. Таким образом, максимальное напряжение, которое может быть приложено к составному ключу, равно  $U_{max}=nU_{DRM}$ , где  $n$  – количество симисторов. Ток в открытом состоянии приблизительно равен емкостному току замыкания на землю ( $I_{RMS}\cong I_C$ ). Следует отметить, что существуют более мощные симметричные тиристоры (диодно-тиристорные модули), рассчитанные на напряжение 6 кВ, однако, такие симисторы имеют заметно большую стоимость и требуют большего тока управления (запуска).

Для каждого симистора был опытным путём определён ток запуска  $I_{gt}$ . Согласно паспортным данным при амплитуде импульса запуска  $I_{зап}=I_{gt}$  его длительность должна быть не менее 40 мкс. При уменьшении длительности до 10 мкс, амплитуда тока запуска должна быть увеличена в среднем на 10-15%. В ходе опыта был выявлен большой разброс запускающего тока - от 160 мА до 340 мА, однако он находится в пределе, заявленном производителем.

Помимо симисторов также возможно применение высоковольтных силовых тиристоров и транзисторов, а также управляемого вакуумного разрядника (см. п 4.8) [79]. По сравнению с транзисторами и тиристорами, симисторы способны самостоятельно (без сигнала управления) закрываться при прохождении тока через «ноль» на обеих полярностях. Последнее свойство радикально облегчает задачу изготовления устройства управления.

Однако, из-за особенностей полупроводниковой структуры управление симистором должно производиться импульсами с заданной полярностью. Смена его состояний вызывается изменением полярности напряжения на силовых электродах МТ1 (УК) и МТ2 (УА). В зависимости от полярности управляющего тока определены четыре варианта управления симистором (таблица. 4.1).

Рабочими квадрантами являются I, II и III. Большинство производителей симисторов считают запрещенным квадрант IV, т.к. в этом квадранте симистор может выйти из строя. Симистор остается в открытом состоянии до окончания одного полупериода коммутируемого напряжения. При переходе тока через нуль симистор закрывается – он оказывается в другом квадранте и для его открытия требуется следующий управляющий импульс.

Лучше всего симистор работает в I и III квадрантах, в которых параметры симистора относительно одинаковы и он наиболее чувствителен к сигналу для его отпирания. В разработанном прототипе ИРЗ согласование полярностей импульсов управления с напряжением на выводах МТ1-МТ2 осуществляется автоматически; инвертировать полярность импульсов управления возможно путем изменения направления включения обмоток запускающего трансформатора (ЗТ).

Таблица 4.1 - Спецификация квадрантов (Строго следуй ГОСТ в оформлении)

Квадрант II		Квадрант I	
$I_{T2-T1}$	$I_{gt}$	$I_{T2-T1}$	$I_{gt}$
+	-	+	+
Квадрант III		Квадрант IV	
$I_{T2-T1}$	$I_{gt}$	$I_{T2-T1}$	$I_{gt}$
-	-	-	+

Для защиты симисторов в ИРЗ от перенапряжений предусмотрено шунтирование каждого из них защитным варистором; равномерное распределение напряжения по симисторам на малых напряжениях в закрытом состоянии обеспечивают RC - цепи.

#### 4.2.1 Выбор защитных варисторов

Выбор защитных варисторов производится по условию равенства падения напряжения на собранных в цепь варисторах для обеспечения их одинаковой электрической нагрузки. По условию равенства вольт-амперных характеристик (ВАХ) падение напряжения на защитных варисторах должно быть одинаковым с погрешностью не более 3-5%.

Схема лабораторной установки для испытания варисторов приведена на рисунке 4.1. Напряжение промышленной частоты было повышено до 10 кВ при помощи трансформатора напряжения НОЛП-10 и приложено к цепочке из 12 последовательно подключенных варисторов. На каждом варисторе было измерено падение напряжения.

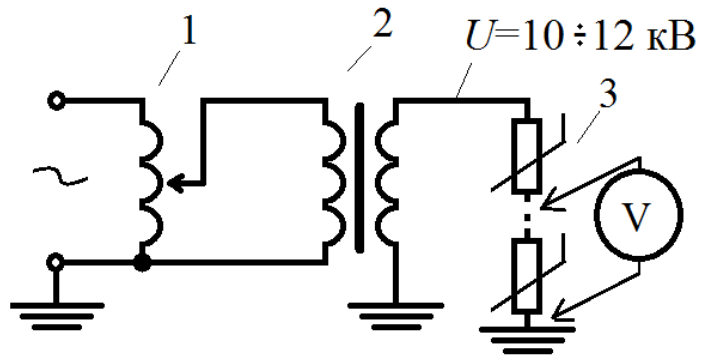


Рисунок 4.1 - Схема установки: 1 – ЛАТР, 2 – трансформатор НОЛП-10, 3 – исследуемые варисторы

В результате опыта было установлено, что около 30% варисторов имеют характеристики вне требуемой области токов для заданного напряжения. Из большой партии проведен отбор варисторов с подходящими характеристиками. Фотография лабораторной установки изображена на рисунке 4.2.

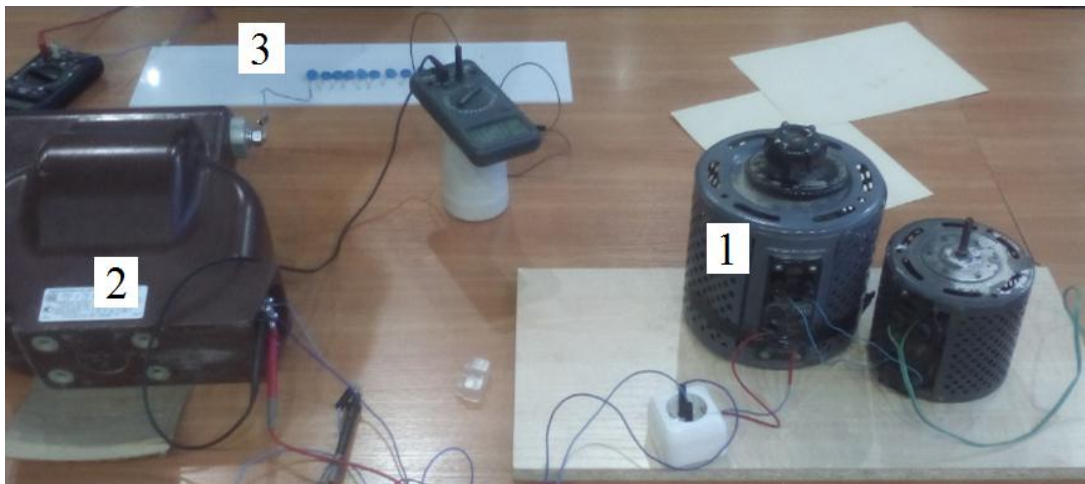


Рисунок 4.2 - Испытания варисторов высоким напряжением. 1 – ЛАТР, 2 – трансформатор НОЛП-10, 3 – исследуемые варисторы

Выбранные защитные варисторы были использованы в симисторном ключе ИРЗ. Они подключены к выводам симистора параллельно выводам (МТ1-МТ2). Для компьютерного моделирования защитного варистора была снята его типичная ВАХ. На рисунке 4.3 изображены варисторы, установленные в устройство ИРЗ.

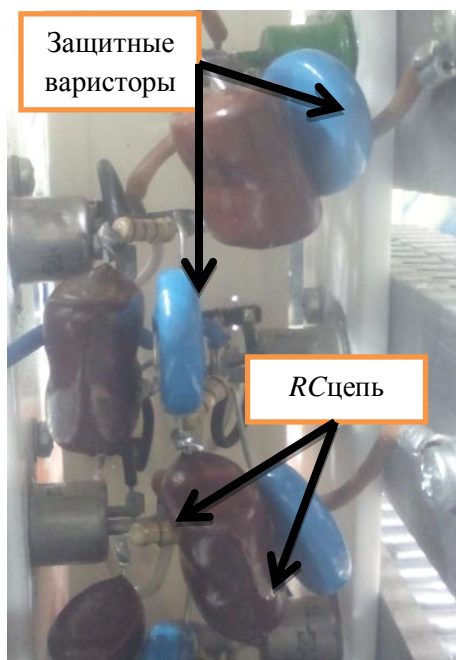


Рисунок 4.3 - Защитные варисторы вместе с  $RC$  цепью

Помимо защитных варисторов важной частью высоковольтного ключа является запускающий трансформатор (ЗТ).

### 4.3 Запускающий трансформатор

#### 4.3.1 Разработка запускающего трансформатора

ЗТ, изображенный на рисунке 4.4, необходим для подачи импульсов отпирания симисторов и для гальванической развязки высоковольтного симисторного ключа и низковольтных цепей управления. Гальваническая развязка возможна благодаря использованию специальной высоковольтной вторичной обмотки ЗТ.

Каркас для катушки вторичной обмотки ЗТ изготовлен на 3D принтере (см. приложение П.1.1). ЗТ выполняет функцию разветвителя сигнала управления на каждый из 12 симисторов. К катушке предъявляются особые требования по изоляции вторичных обмоток управления симисторов от магнитопровода ЗТ и относительно друг друга. Для повышения надежности каркас катушки пропитан специальным изолирующим составом нового типа («жидкая изоленда» - SCOTCH - 1601). Это бесцветное изолирующее покрытие применяется для защиты электрических контактов коммутационных и распределительных устройств,

переключателей и других электротехнических деталей. Аэрозоль изготовлен на основе алкидного полимера который сцепляется с различными материалами, такими как металл, стекло, пластик и др. [80]. При нанесении на поверхность он «твердеет», заполняет полости (тем самым выравнивая электрическое поле) и образует диэлектрическую пленку. Испытания катушки (покрытой изолирующим составом) высоким напряжением показали, что она выдерживает приложенное к медным обмоткам напряжение – 16 кВ. Без покрытия трансформатора «жидкой изоляцией» электрическая прочность каркаса трансформатора была ниже ориентировочно на ~40 %.



Рисунок 4.4 - ЗТ устройства ИРЗ

Рёбра каркаса обмотки предназначены для обеспечения требуемой электрической прочности, т.к. вторичные обмотки управления будут находиться под потенциалом нейтрали (относительно магнитопровода), т.е. под напряжением до ~10 кВ.

Магнитопровод ЗТ изготовлен из магнитомягкого марганец-никелевого феррита. Применение феррита обусловлено более простой технологией изготовления ЗТ и импульсным характером сигнала управления. Ферриты этого типа (марганец-никелевые) при тех же свойствах что и никель-цинковые обладают более высокой рабочей температурой, меньшим углом потерь вплоть до частоты 0,3 МГц и повышенной индукцией насыщения [81].

При работе трансформатора в импульсном режиме существует опасность насыщения магнитопровода. В этом случае в нем резко возрастают активные потери,

за счет которых температура изоляции обмоток может существенно превысить допустимые значения.

Для оценки степени насыщения магнитопровода при его работе необходимо снять кривую намагничивания трансформатора. Она закладывается в компьютерную модель ЗТ в программе PSPICE для моделирования всего ЗТ (см. приложение П.1.2). В качестве математической модели сердечника ЗТ используется апробированная модель Джилса-Атертона [82].

#### 4.3.2 Тестирование и компьютерная модель запускающего трансформатора

Работоспособность разрабатываемого устройства может быть апробирована на компьютерной модели, реализованной средствами программной среды [83].

В связи с тем, что было выдвинуто предположение о насыщении магнитопровода ЗТ при воздействии на трансформатор импульсов напряжения, приходящих с ДЗЦ, проведена проверка его работы. Для этого была собрана специальная установка, имитирующая начальную форму напряжения на нейтрали сети в момент замыкания фазы ЭС на землю.

Электрическая схема установки изображена на рисунке 4.5,а, фотография установки приведена на рисунке 4.6. Зарядный конденсатор  $C_1$ , разряжаясь на первичную обмотку повышающего трансформатора  $T_1$ , формирует на вторичной стороне импульс с требуемыми параметрами (амплитудой и частотой). Меняя параметры разрядной схемы можно сформировать близкий к требуемому импульс напряжения, что позволяет определить область рабочих напряжений и частот для оценки возможности применения дифференцирующе-запускающей цепи (ДЗЦ) с расчётными параметрами, запускающего трансформатора и симисторов (рисунок 4.5, б). Напряжение генерируемого импульса достигает 6 кВ при частоте колебаний 1-2 кГц. На рисунке 4.5,в показана осциллограмма импульса напряжения на первичной обмотке трансформатора ( $u_1$ ) и на управляющем электроде ( $u_{y3}$ ) одного из симисторов в составном ключе.



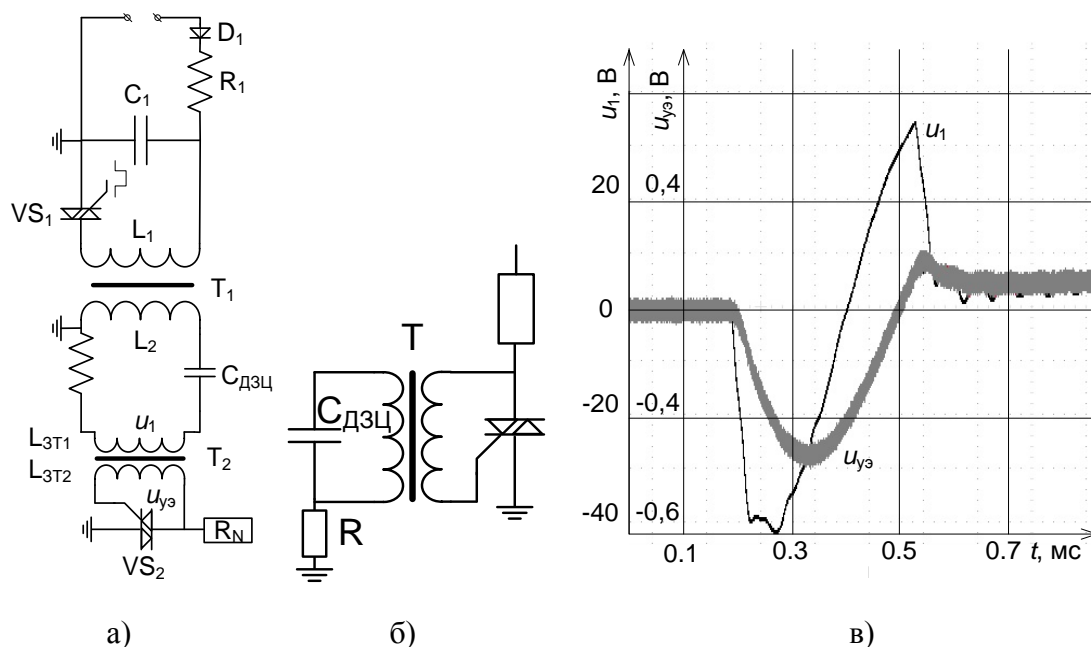


Рисунок 4.5 - Упрощённая схема установки с устройством ИРЗ (а), схема тестирования симисторной цепи (б), импульс напряжения на первичной  $u_1$  и вторичной  $u_{yз}$  (управляющей) обмотке запускающего трансформатора  $T_2$  (в)

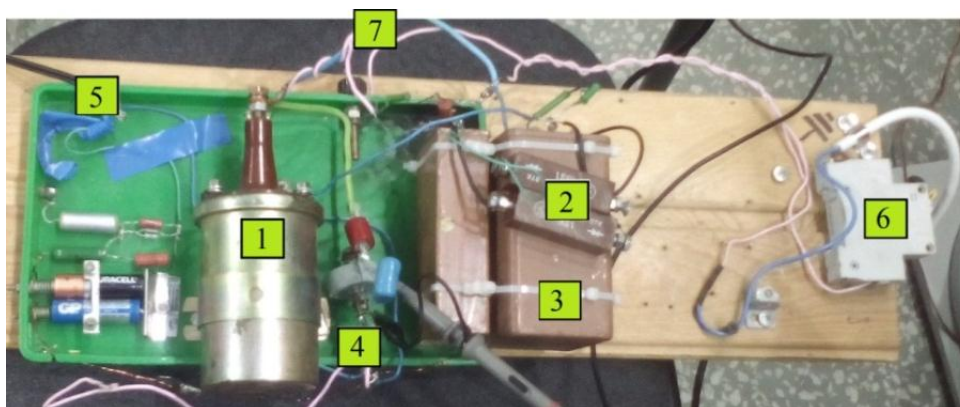
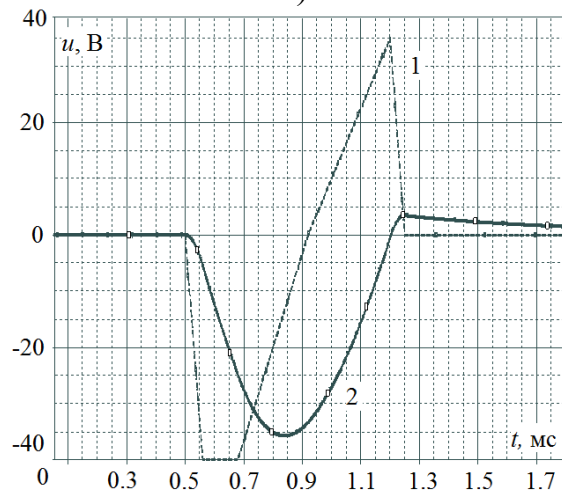
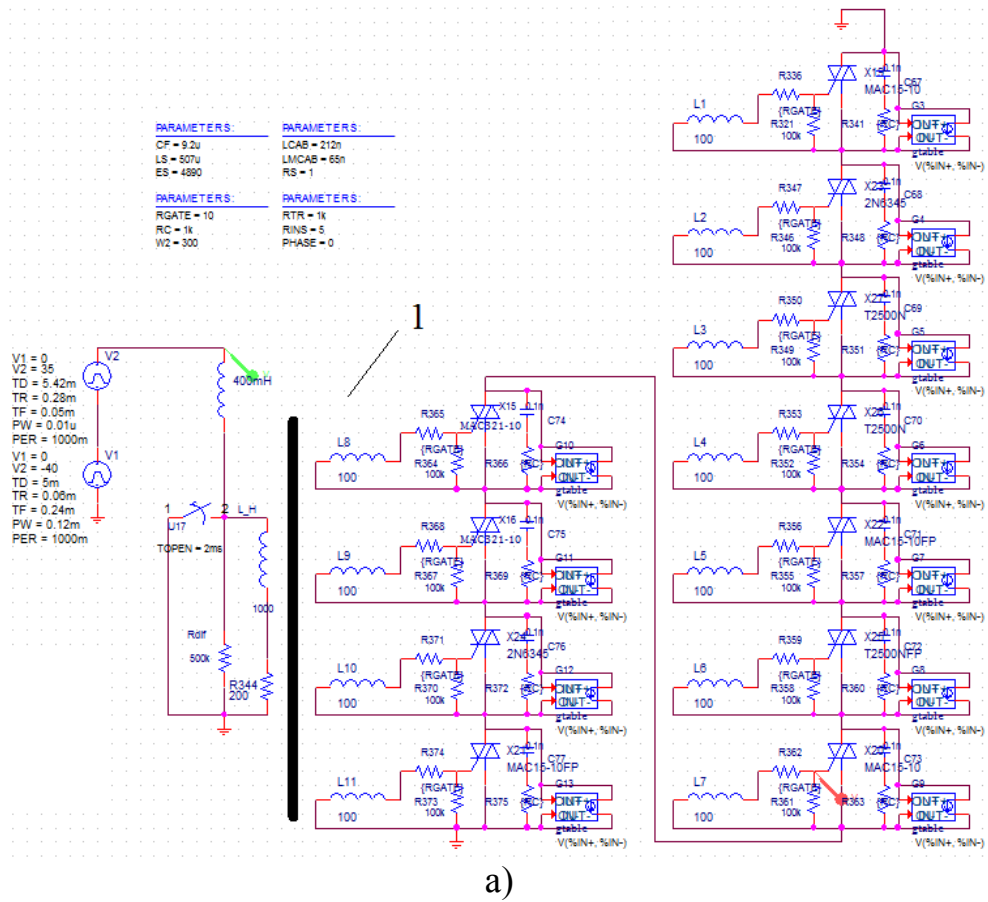


Рисунок 4.6 - Запускающая схема: 1-катушка зажигания формирующая высоковольтный импульс, 2 - удвоитель напряжения, 3 – батарея конденсаторов, 4 – делитель напряжения, 5 – кнопка запуска импульса, 6 – автомат, 7 – высоковольтный провод на дифференцирующую запускающую цепь

Компьютерное моделирование опыта показало правильность рассчитанных параметров магнитопровода запускающего трансформатора. Компьютерная модель ключа ИРЗ и запускающего трансформатора приведены на рисунке 4.7,а. Итог моделирования – расчётные осциллограммы напряжения на запускающем трансформаторе и управляющем электроде симистора (рисунок 4.7, б). Амплитуда и форма импульса напряжения на управляющем электроде симистора с небольшой

погрешностью совпадает с экспериментальной кривой. Результаты компьютерного моделирования полупроводникового ключа ИРЗ, магнитопровода и всего ЗТ, в целом, хорошо согласуются с экспериментальными данными.



б)

Рисунок 4.7 - Компьютерная модель симисторного ключа и ЗТ (1 – запускающий трансформатор) (а); Осциллограмма компьютерного моделирования опыта (1- импульс на первичной обмотке запускающего трансформатора, 2 – импульс на управляющем электроде симистора) (б)

Высоковольтные испытания управляющей цепи симисторного ключа совместно с ДЗЦ и запускающим трансформатором позволяют определить чувствительность и работоспособность импульсно-резистивного заземляющего устройства. Во избежание невключения одного из симисторов с последующим выходом из строя защитного варистора, что описано в п. 2.1.4, могут применяться следующие приемы:

- доработка схемы запуска, исключающая подачу малых по амплитуде сигналов управления;
- выбор симисторов с малым током отпирания и их подбор по чувствительности (что практически крайне сложно);
- применение схемы формирования и усиления запускающего импульса, т.е. отдельного устройства управления (УУ).

#### **4.4 Испытания симисторной цепи устройства импульсного резистивного заземления**

Испытания симисторного ключа высоким напряжением были произведены на высоковольтной установке – генераторе импульсных токов кафедры ТЭВН с максимальным зарядным напряжением 30 кВ. Схема установки и объект испытаний представлены на рисунке 4.8. Осциллографирование импульсов тока (напряжения на шунте 10, показанного на рисунке 4.8) производилось при помощи двухканального осциллографа OWON SDS-6062. При подаче запускающих импульсов через ЗТ (на рисунке не изображен) на управляющие электроды всех симисторов происходит запуск составного ключа (9), который разряжает заряженный до 6 кВ высоковольтный конденсатор  $C_p$  через разрядный резистор (5). Каждый симистор защищен варистором (7).

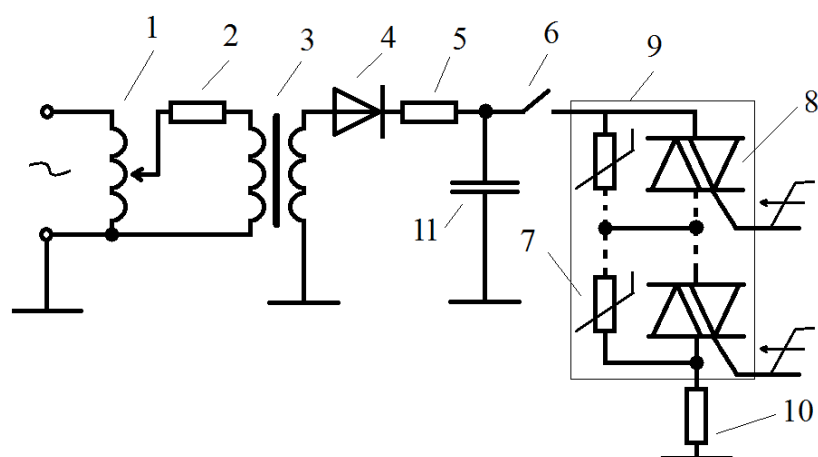


Рисунок 4.8 - Схема опыта на ГИТ: 1-ЛАТР, 2- защитный резистор, 3-трансформатор, 4- выпрямительный диод, 5 – зарядный резистор, 6- ключ, 7 – защитный варистор, 8 – симистор, 9 – составной ключ (SV), 10 – токовый шунт, 11 – батарея разрядных конденсаторов ( $C_p$ )

По результатам опыта была получена осциллограмма напряжения на шунте в момент включения симисторного ключа (рисунок 4.9). Ступенчатый характер осциллограммы обусловлен неодновременным открытием симисторов в ключе. Открытие каждого симистора шунтирует соответствующий защитный варистор и сопровождается резким увеличением разрядного тока в цепи. Неравномерные временные интервалы между «ступенями» вызваны запаздыванием включения одного из симисторов из-за их разной чувствительности к сигналу управления.

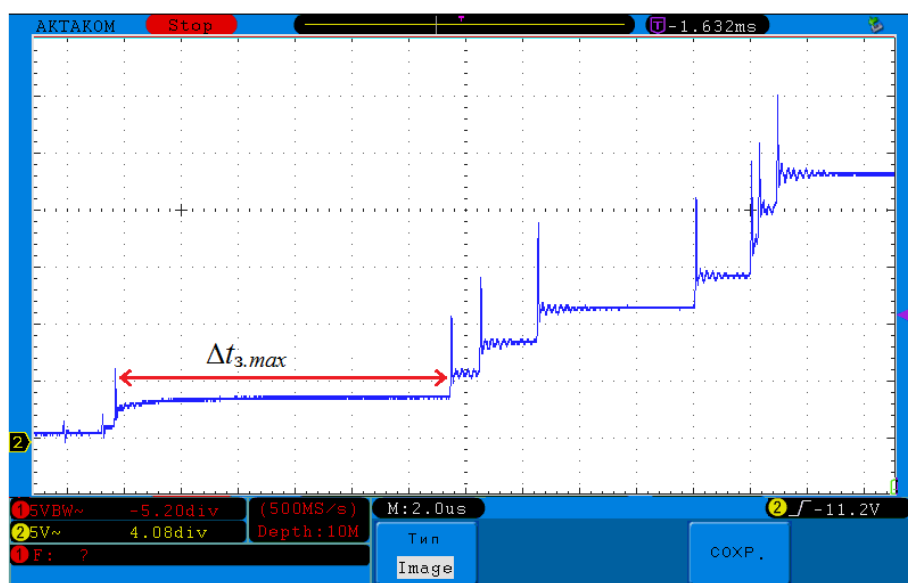


Рисунок 4.9 - Высоковольтный опыт коммутации прототипа составного ключа; скачки и кратковременные пики напряжения на осциллограмме напряжения на токовом шунте - моменты открытия отдельных симисторов

Выявлено, что максимальное время задержки включения симистора  $\Delta t_{з.маx}$  составило 12 мкс. На защитный варистор симистора с наибольшим временем включения ( $\Delta t_{з.маx}$ ) придется все напряжение приложенное к ключу. В течение этого времени (пока его не зашунтирует открывшийся симистор) он может быть перегружен.

Одним из вариантов решения этой проблемы может быть намеренная установка в цепочку «медленного» симистора (или искусственное замедление включения посредством занижения сигнала управления) и его оснащение энергоемким варистором. В таком случае последним откроется заведомо известный симистор, а на его защитный варистор увеличенной мощности придется 100% - ое напряжение ключа.

Для выявления наиболее «медленных» симисторов необходимо знать чувствительность каждого симистора в цепочке.

#### 4.5 Разброс времен включения симисторов

Время подключения нейтрале-заземляющего резистора к контуру заземления (станции/подстанции) складывается из времени подъема напряжения на нейтрали сети до уровня, при котором на ДЗЦ будет сформирован достаточный по амплитуде импульс запуска симисторов, а также времени последовательного включения цепочки симисторов  $t_{вкл.маx}$ .

Для включения любого симистора должно выполняться условие протекания через симистор тока превышающего ток включения ( $I_L$ ). Если ток, протекающий от условного анода к катоду меньше  $I_L$  после прекращения воздействия импульса управления, то симистор не отпирается. Включение каждого симистора в последовательной цепи всегда происходит с временными разбросами, вызванными отличием токов управления  $I_{gt}$  (см. п. 4.2.1).

Для оценки работоспособности защитных варисторов были проведены эксперименты, выявившие потенциальную опасность выхода их из строя из-за разброса времен включений. Для определения длительности времени задержки включения каждого из симисторов по опытным данным была воссоздана схема опыта на ПЭВМ в программе схемотехнического моделирования [67] (см. рисунок П.1.10, приложение П.1.3). В результате получены модели каждого из 14

симисторов, которые необходимы для адекватного моделирования работы всего ИРЗ.

Как было отмечено в (п. 2.1.4) при больших задержках между включениями соседних симисторов большая энергия, выделяемая на защитных варисторах из-за невключения одного из них, а также больших времен срабатывания симисторов (при малой крутизне импульса управления), может привести к выходу их из строя. Поэтому целесообразно для запускающего ключа взять симисторы с минимальным разбросом по времени включения. Анализ экспериментальных данных, а также компьютерное моделирование, выявили 11 симисторов с минимальным разбросом времен включения. Данные симисторы были установлены в прототип ключа.

Испытания симисторов, и поиск их времени запуска сопряжены с большими трудозатратами. Разброс времен включения симисторов можно уменьшить увеличив крутизну и амплитуду запускающего импульса, т.е. необходимо сделать его независимым от амплитуды и крутизны импульса поступающего с ДЗЦ. Поэтому наиболее рациональным, как отмечалось в (п. 4.3.2), будет применение отдельного управляющего устройства.

#### **4.6 Устройство управления импульсного резистивного заземления нейтрали**

Как было отмечено в п.п. 4.3.1, 4.4, 4.5, из-за естественного разброса напряжений включения симисторов существует вероятность незапуска одного из них. При этом на защитный варистор данного симистора через нейтралезаземляющий резистор будет прикладываться все напряжение между нейтралью и землёй. При длительном разогреве защитного варистора повышенным током при частых пробоях фазной изоляции произойдет его разрушение, после чего повредится симистор.

Не смотря на то, что длительное горение заземляющей дуги с большими начальными напряжениями на нейтрали ЭС  $U_{N0}$  маловероятно, для повышения надежности работы ИРЗ принято решение осуществлять запуск симисторов от единого устройства управления, изображенного на рисунке 4.10, исключающего невключение единичного симистора.

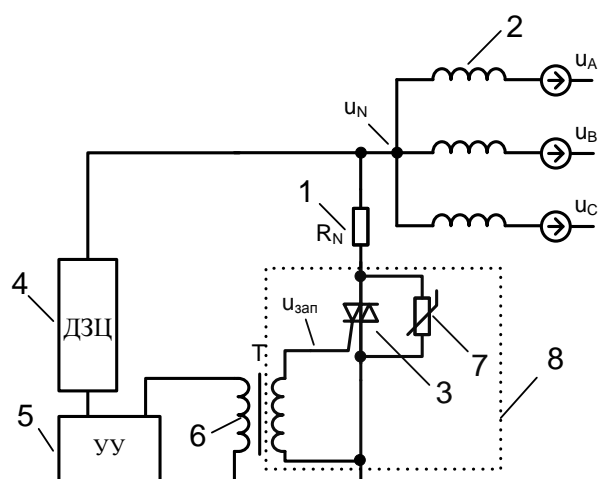


Рисунок 4.10 – Симисторное устройство для высокоомного ИРЗ нейтрали (1- нейтрале-заземляющий резистор; 2- трехфазный трансформатор (3-35 кВ); 3- симистор; 4- дифференцирующая запуская цепь; 5 – устройство управления; 6 – запуская трансформатор; 7 – нелинейный ограничитель перенапряжений; 8 – симисторный блок

В задачи УУ входит генерация импульса управления заданной длительности для отпирания симисторного ключа при достижении производной напряжения на нейтрали ЭС порогового значения. Процесс изготовления УУ описан в приложении П.1.4.

В конечном итоге устройство управления получило вид, представленный на рисунке 4.11. В силу применения УУ возникла зависимость ИРЗ от внешнего питания (сети переменного тока) или аккумуляторной батареи. Незначительное по мощности внешнее питание необходимо для работы систем управления симисторным ключом и его охлаждения (при значительном разогреве симисторов).

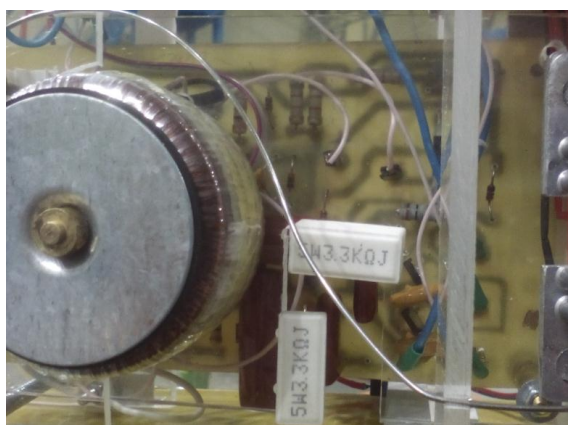


Рисунок 4.11 - Устройства управления, установленное в ИРЗ

При работе с УУ ЗТ требует минимальной доработки, а именно изготовления специальной высоковольтной первичной обмотки (на напряжение до 1кВ). Она состоит из двух одинаковых первичных обмоток-катушек, размещенных на общем стержне магнитопровода. Для исключения пробоя слои обмотки пропитаны цапонлаком.

Неизменный управляющий сигнал поступает на первичную обмотку ЗТ, состоящую из обмоток условно положительной и отрицательной полярности, далее с вторичных обмоток на управляющие электроды симисторов (т.е. на переходы УЭ-условный катод). УУ позволяет исключить нежелательные эффекты:

- невключение какого-либо симистора в цепи;
- минимизирует (благодаря большой крутизне импульса управления) разброс времен включения симисторов.

#### 4.7 Охлаждение симисторов

При длительном дуговом замыкании на землю через заземляющий резистор и симисторный ключ происходит разряд ёмкостей фаз на землю с частотой до 100 раз за секунду (через полпериода промышленной частоты). При малых напряжениях пробоя частота может возрасти дополнительно. Длительная работа ИРЗ при больших значениях тока ведет к чрезмерному разогреву симисторов. Поэтому необходимо обеспечить каждый симистор радиатором-охладителем. Ток через симисторный ключ можно принять примерно равным эффективному значению тока экспоненциальной формы. Согласно [15] в сети 10 кВ максимально допустимый ток замыкания на землю  $I_{max.эфф1}=20A$ , а при наличии железобетонных опор  $I_{max.эфф2}=10A$ . Предположим наиболее тяжелый режим по току и  $K_R=1$ . Это определяет значение сопротивления нейтрале-заземляющего резистора  $R_N$  (289 Ом для ЭС 10кВ).

Уравнение для импульса тока при  $K_R=1$  имеет вид:

$$i(t)=U_{N0}e^{-\omega t}/R_N. \quad (4.1)$$

Для расчёта мгновенной мощности, выделяемой в симисторе, домножим ток, найденный по формуле (4.1) на напряжение симистора в открытом состоянии, которое можно принять равным неизменным  $U_{TM}=1.8$  В. Полагая пробой изоляции каждый полупериод промышленной частоты, мощность определится как:



$$P_{max} = 100U_{TM}U_{N0}/R_N \int_0^{\pi/\omega} e^{-\omega t} dt. \quad (4.2)$$

На основе расчётной мощности по формуле (4.2)  $P_{max}=15$  Вт оценена требуемая площадь радиатора охлаждения  $S_0$  согласно [84]. Она вычисляется по формуле (4.3):

$$S_0 = \frac{P_{max}}{\{\alpha[T_2 - P_{max}(R_1 + R_2) - T_1]\}} \quad (4.3)$$

где  $R_1$  - тепловое сопротивление переход-корпус,  $R_2$  - тепловое сопротивление корпус-радиатор,  $T_1$  - максимальная температура среды,  $T_2$  - максимальная температура перехода,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи.

По справочным данным для применяемого симистора:  $R_1=0.9$  C<sup>0</sup>/Вт,  $R_2=0.2$ C<sup>0</sup>/Вт,  $T_2=125$  C<sup>0</sup>, температура окружающей среды принята равной  $T_1=25$ C<sup>0</sup>,  $\alpha=10\dots100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) в зависимости от способа охлаждения. При  $\alpha=10$  площадь радиатора должна быть не меньше  $S_0=0.018$  м<sup>2</sup>. В качестве радиатора используется алюминиевый игольчатый радиатор. Установленные в устройство радиаторы показаны на рисунке 4.12.

Для большей эффективности охлаждения защитных варисторов и симисторов обеспечена принудительная циркуляция воздуха - механическое термореле включает вентилятор при нагреве радиаторов до 50°C. Система охлаждения обеспечивает длительную работу цепочки симисторов в режиме ОДЗ.



Рисунок 4.12. Радиаторы для охлаждения симисторов в устройстве ИРЗ

Вместо цепочки симисторов, выполняющей роль высоковольтного ключа, в работе также рассмотрена возможность использования управляемого вакуумного разрядника.

#### **4.8 Возможность использования управляемого вакуумного разрядника в качестве коммутатора в устройстве импульсного резистивного заземления нейтрали**

##### **4.8.1 Мотивы применения вакуумных разрядников**

Применение симметричных тиристоров в качестве коммутационного аппарата сопряжено с той проблемой, что требуется большое количество элементов в устройстве. Это значит, что усложняется схема запуска симисторов, а большое количество полупроводниковых приборов принципиально увеличивает вероятность выхода устройства из строя. Значительное количество симисторов требуется в связи с небольшим рабочим напряжением симистора (как правило, не более 6 кВ). В связи с отмеченным становится привлекательным применение управляемых вакуумных коммутационных аппаратов – разрядников вакуумных управляемых (РВУ) [85-87].

##### **4.8.2 Основные характеристики управляемого вакуумного разрядника**

Разрядник управляемый вакуумный (РВУ), эскиз которого показан на рисунке 4.13, представляет собой герметизированный прибор, который состоит из керамического цилиндра и двух металлических фланцев с электродными системами. Он работает следующим образом. К фланцам разрядника подключается коммутируемая цепь. Фланец, на котором расположен ввод поджигающего электрода, является условным катодом прибора, противоположный фланец – условным анодом. Импульсное напряжение управления положительной (но не обязательно) полярности подается на ввод поджигающего электрода относительно условного катода. Параметры разрядника приведены в таблице 4.2.

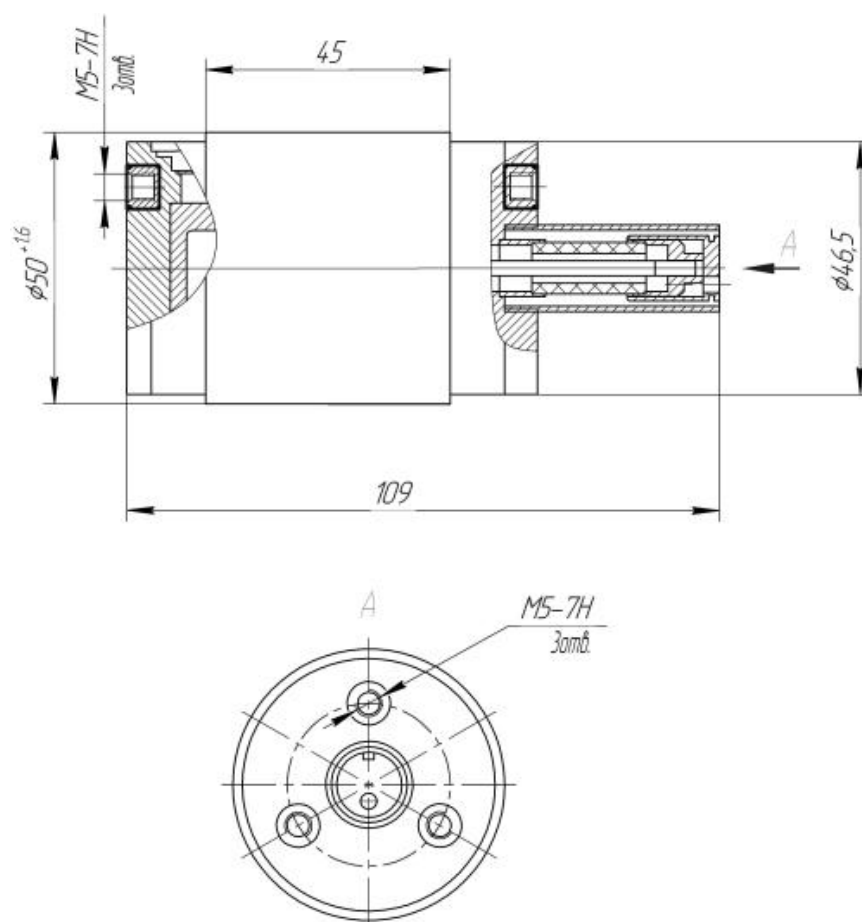


Рисунок 4.13 – Устройство разрядника РВУ-73

Таблица 4.2 - Основные технические данные и характеристики РВУ-73

Рабочее напряжение, кВ	0,5-16
Рабочие токи, кА	0,2-50
Время восстановления электрической прочности, мкс	10
Максимальное количество электричества в импульсе, Кл	4
Ресурс (число включений)	$5 \cdot 10^5$
Ток поджига, не менее, А	100
Длительность тока поджига, не менее мкс	0.1
Напряжение поджига, кВ	5
Диапазон рабочих температур, °С	-40 до +100
Габаритные размеры:	-
- диаметр, мм	50
- высота, мм	104
Масса, кг	0.7

К настоящему времени в РФ разработаны и успешно применяются в сильноточных цепях несколько типов мощных управляемых вакуумных разрядников, которые рассчитаны на максимальные импульсные токи микро- и

миллисекундной длительности до 500 кА и импульсные напряжения до 50 кВ [87-90].

РВУ обладают рядом преимуществ, отличающих их от других типов оборудования: автономность работы, высокая эксплуатационная надежность, высокая коммутационная износостойкость, простота обслуживания, низкие эксплуатационные затраты, высокое быстродействие.

Однако при большом количестве плюсов РВУ имеет серьезные недостатки, не устранив которые его применение в качестве коммутатора в ИРЗ делается невозможным.

#### 4.8.3 О применимости вакуумного управляемого разрядника в устройстве импульсного резистивного заземления нейтрали

Недостатки РВУ применительно к ИРЗ были выявлены в ходе экспериментов описанных в [89].

Тестирование разрядника РВУ-73 осуществлялось в высоковольтном зале на генераторе импульсов тока (ГИТ). В цепь разряда включалось добавочное сопротивление 33 Ом (9). Характер разрядного процесса - аperiodический. Схема установки изображена на рисунке 4.14. Фотография РВУ-73 и запальной схемы приведена на рисунке 4.15.

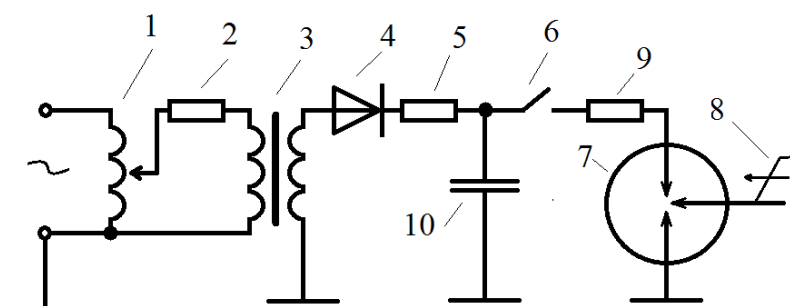
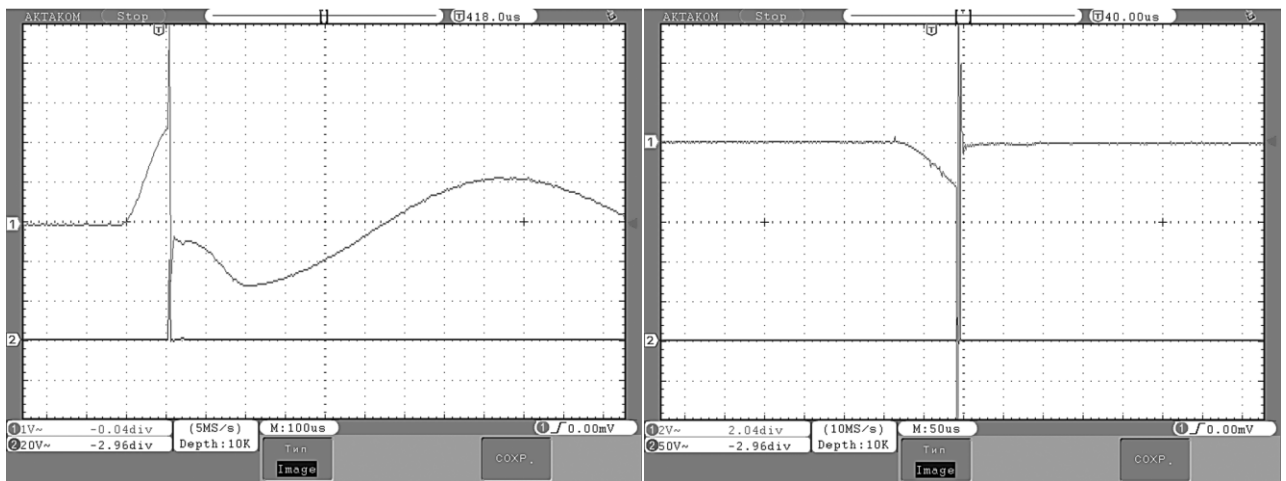


Рисунок 4.14 - Схема опыта на ГИТ: 1-ЛАТР, 2- защитный резистор, 3-трансформатор, 4 - выпрямительный диод, 5 – зарядный резистор, 6 - ключ, 7 – РВУ – 73, 8 – импульс управления, 9 – добавочное сопротивление, 10 – батарея конденсаторов



Рисунок 4.15. Фотография запальной схемы и РВУ-73

После проведения серии испытаний оказалось, что разрядник РВУ-73 работает нестабильно, то есть не сбрасывает заряд с накопительного конденсатора ГИТ при существующем разряде в промежутке поджигающий электрод (ПЭ) - условный катод (УК). В результате разрядник сработал лишь в 30% случаев. Многократно уменьшив разрядное сопротивление, разрядник стал срабатывать стабильно. Таким образом, для устойчивой работы разрядника необходим значительный разрядный ток (более 80 А). При этом энергия запускающего импульса должна превышать 84 мДж. Типичные осциллограммы напряжения на УЭ изображены на рисунке 4.16, а,б.



а)

б)

Рисунок 4.16 - Осциллограммы поджигающих импульсов: а) – отсутствие основного разряда; б) – пробой разрядника (масштаб по оси ординат на рис. а) – 5 кВ/дел, на рис. б) – 10 кВ/дел)

Другим из серьёзных недостатков РВУ является высокое напряжение поджига, достигающее 8-10 кВ. Этот недостаток обусловлен одним из свойств РВУ-73, которое удалось выявить при проведении очередной серии испытаний. Он заключается в том, что если провести ряд испытаний с большим разрядным сопротивлением, при котором не происходит основной пробой, то происходит «натренировка» разрядника, т.е. электрическая прочность вакуумного промежутка разрядника (ПЭ-УК) начинает увеличиваться.

Это связано с тем, что при таких разрядах, количество микроскопических неровностей, которые являются благоприятной средой для возникновения явления взрывной эмиссии, становится с каждым разрядом все меньше и меньше. Т.е. при прохождении иницирующего разряда на одной из неровностей катода возникает взрывная эмиссия, но процесс не может перейти в дуговую стадию, а неровность, тем временем, уже уничтожена микро взрывом. Аналогичный процесс может идти и с уклоном на уменьшение электрической прочности вакуумного промежутка разрядника, если коммутируемые токи будут наоборот гипербольшими.

Таким образом, для применения разрядника в качестве коммутатора, необходимо, чтобы он соответствовал следующим требованиям:

1. Небольшое напряжение поджига, которое находится в интервале 1-2 кВ.
2. Энергия поджигающего разряда должна приблизительно составлять  $E_3 \cong 4$  мДж.
3. Стоимость разрядника должна соответствовать стоимости серийно-выпускаемого аппарата и быть конкурентной высоковольтным симисторам (тиристорам).
4. Разрядные токи должны начинаться от единиц Ампер.

#### **4.9 Лабораторные испытания импульсного резистивного заземления нейтрали**

##### **4.9.1 Испытания устройства импульсного резистивного заземления высоким напряжением**

В результате большой конструкторской деятельности и длительных лабораторных испытаний (в том числе высоковольтных) был получен рабочий

образец ключа ИРЗ пригодный для установки на станцию/подстанцию. Его фотография изображена на рисунке 4.17.



Рисунок 4.17 - Рабочий образец устройства ИРЗ в собранном виде

Испытания переменным одноминутным напряжением (14 кВ) выполнены по схеме, представленной на рисунке 4.18, а. Схема экспериментальной установки и момент испытаний изображены на рисунке 4.18, б.

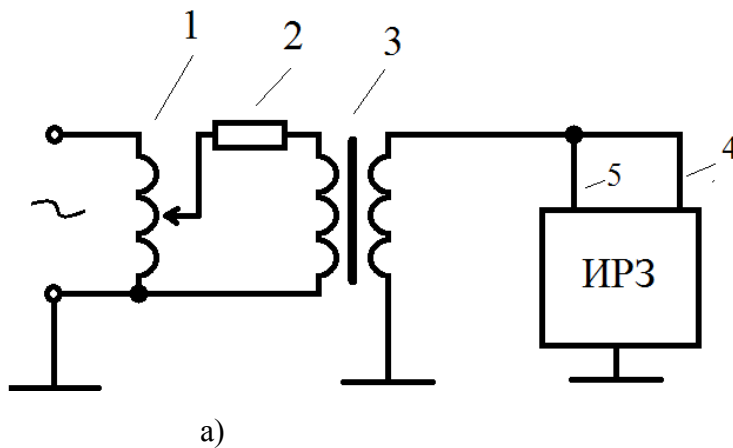


Рисунок 4.18. Схема экспериментальной установки а): 1-ЛАТР, 2 - защитный резистор, 3 – повышающий трансформатор, 4 – вывод ДЗЦ, 5 – вывод симисторного ключа; Фотография установки б)

По результатам испытаний разогрева симисторной и защитной варисторной цепи не выявлено; диэлектрические элементы каркаса ИРЗ, выполненные из фторопласта, оргстекла и стеклотекстолита, имеют достаточную электрическую прочность.

#### 4.9.2 Испытания электрической (токовой) нагрузкой

Испытания симисторного ключа на нагрузочную способность по току проводились на установке, схема и фотография которой изображена на рисунке 4.19. Через цепь из 6 симисторов пропусклся переменный ток промышленной частоты. Запускающий импульс подавался с генератора импульсов (3), резистор (1) ограничивал ток в симисторном ключе.

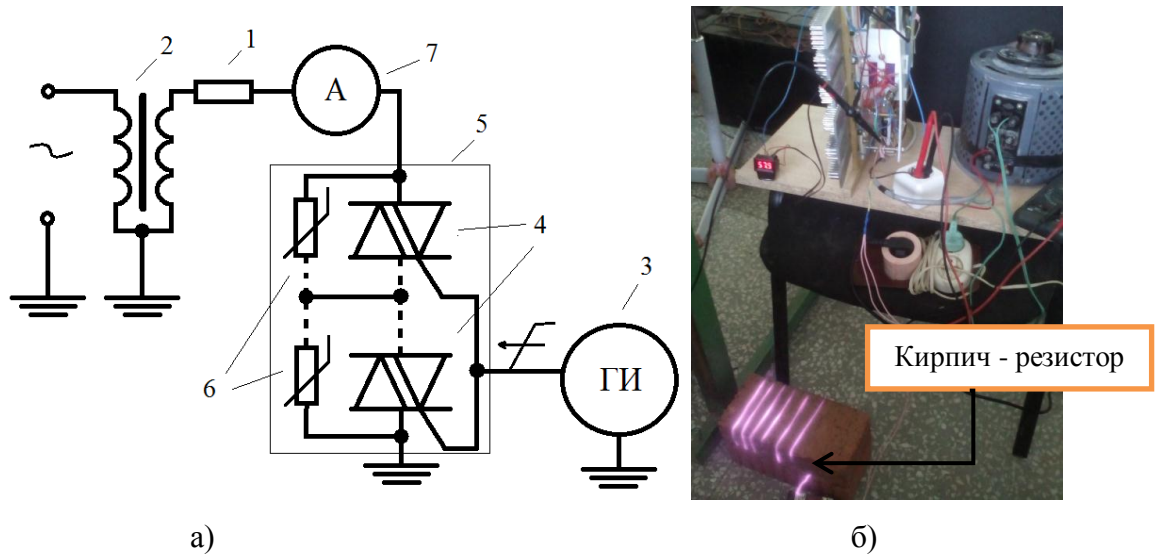


Рисунок 4.19 - Схема лабораторной установки: (1 – токоограничивающий резистор, 2 – автотрансформатор, 3 – генератор управляющих импульсов, 4 – исследуемые симисторы, 5 – ключ, 6 – защитные варисторы (6 шт.), 7 – амперметр) (а); фотография установки (б)

По результатам опыта при длительном протекании тока (30 мин) с амплитудой  $I_{эфф}=18\text{А}$  максимальная температура симисторов (без применения принудительного охлаждения) составила около  $60^\circ\text{С}$ , что находится в пределах допустимого значения рабочей температуры. Осциллограммы тока управления и напряжения на составном симисторном ключе в процессе испытаний показаны на рисунке 4.20.



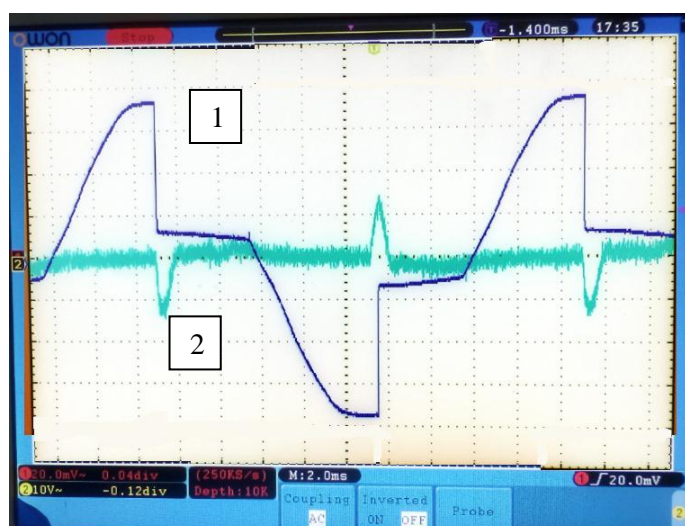


Рисунок 4.20 - Осциллограммы работы симисторного ключа; 1 – напряжение на ключе, 2 – ток управления одного из симисторов

#### 4.9.3 Определение чувствительности импульсного резистивного заземления нейтрали

Для определения чувствительности устройства разработана высоковольтная установка, подающая импульсы синусоидальной формы и регулируемой амплитуды на устройство ИПЗ. Электрическая схема такой лабораторной установки приведена на рисунке 4.21. Заряженная до 10-12 кВ от повышающего трансформатора батарея конденсаторов  $C_6$  разряжается после включения вакуумного выключателя через дроссель на батарею  $C_p$ . Напряжение на этой батарее в переходном колебательном процессе запускает посредством ДЗЦ симисторный ключ, вводящий в работу нагрузочный резистор  $R_H$ .

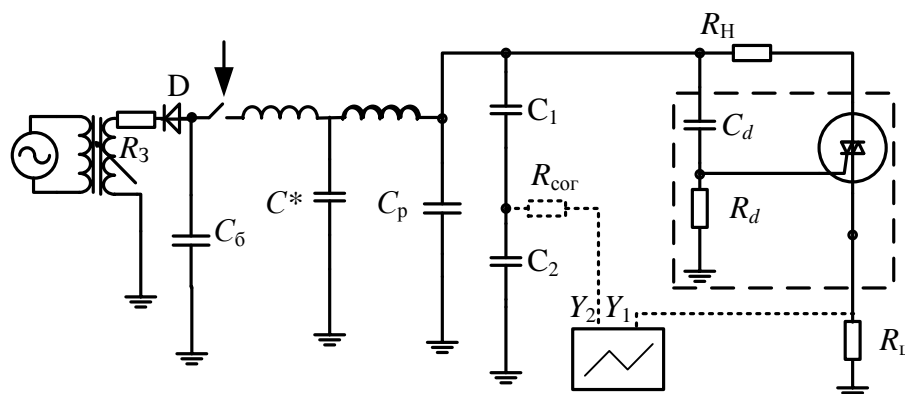


Рисунок 4.21 - Схема испытательной лабораторной установки; ИПЗ выделено пунктиром,  $D$  – диод,  $R_3$  - защитный резистор

Колебательный характер импульсов позволяет приблизительно воспроизвести форму фронта напряжения на нейтрали реальной ЭС при замыканиях на землю. В ходе испытаний получены осциллограммы напряжения на ключе ИРЗ и протекающего в нем тока. Максимальное импульсное напряжение, приложенное к ИРЗ, составило 9 кВ; при этом максимальный ток в ключе достигал 20А (рисунок 4.22).

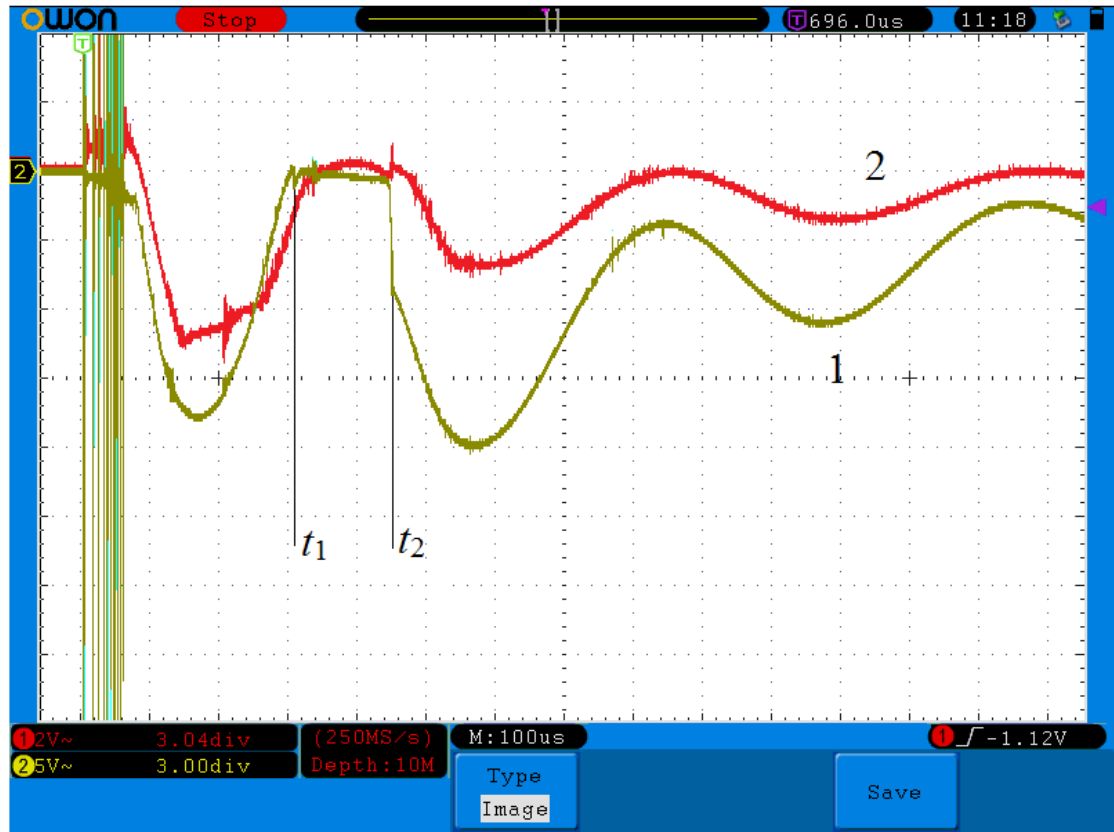


Рисунок 4.22 - Испытания ИРЗ высоким напряжением;

1 – напряжение на токовом шунте (1 Ом), 2 – напряжение на делителе (коэффициент деления емкостного делителя напряжения  $C_1-C_2 k_d=1785$ )

На осциллограмме хорошо заметно, как ключ закрывается при прохождении тока через нуль в момент времени  $t_1$ . В момент времени  $t_2$  происходит повторное нарастание напряжения на ДЗЦ, и ключ вновь открывается.

На рисунке 4.23 изображен увеличенный фрагмент момента времени  $t_2$  осциллограммы, представленной на рисунке 4.22. Хорошо видны скачки тока в шунте, вызванные одновременными включениями симисторов. Это свидетельствует так же, как было отмечено в п.4.6, о разной чувствительности к запуску симисторов

и отличиях в условиях запуска. Полное время включения составного ключа составило - 28 мкс, наибольшая длительность токовой «ступеньки» - времени задержки включения симистора - 6 мкс. Для определения порога чувствительности устройства амплитуда импульса напряжения была постепенно снижена. На рисунке 4.24 изображен импульс напряжения с минимальной амплитудой, при которой возможно срабатывание ИРЗ с разработанным устройством управления и ДЗЦ.

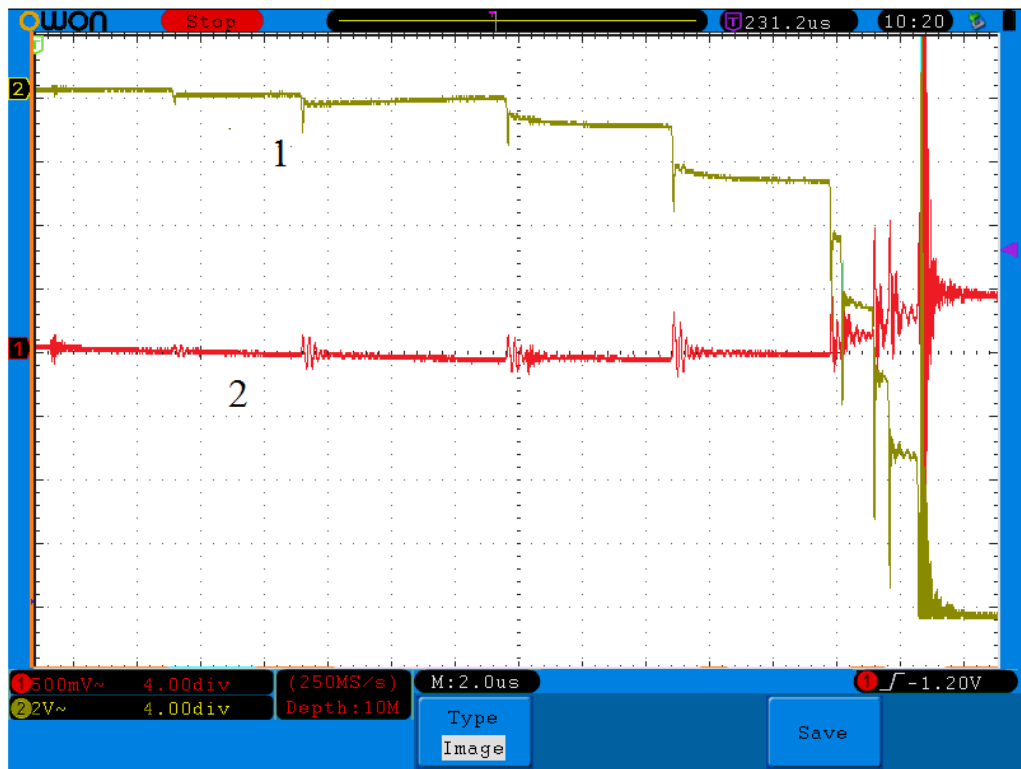


Рисунок 4.23 - Процесс открывания ключа ИРЗ; 1 – напряжение на токовом шунте, 2 – напряжение на делителе (см. рисунок 4.21)

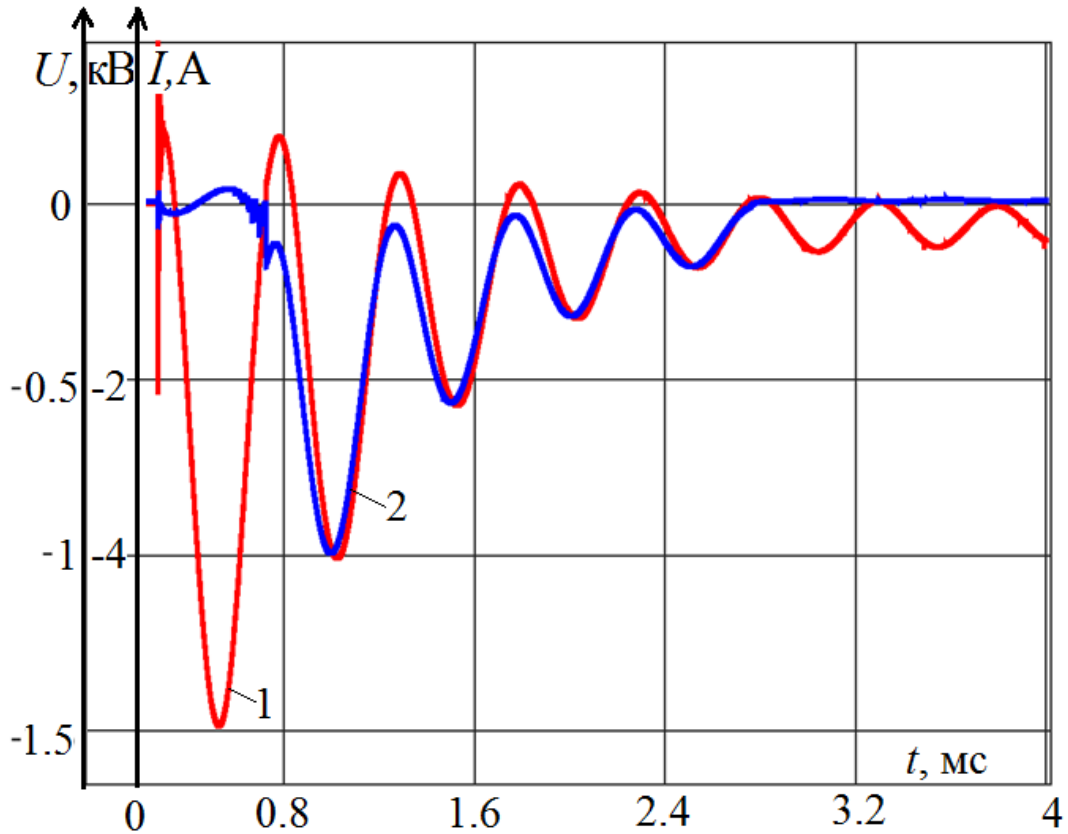


Рисунок 4.24 - Напряжение на выходе делителя напряжения (1), напряжение на токовом шунте ИРЗ (2);  $U_{max}=1.47$ кВ

Минимальное напряжение срабатывания на ключе составило 1.44 кВ ( $0.17 U_{\phi.m}$  для сети 10 кВ) при частоте колебаний  $\sim 2$  кГц. Амплитудное значение тока в нагрузочном резисторе  $R_H$  достигало 4 А.

На осциллограммах напряжения и тока хорошо заметно отсутствие первого полупериода колебаний тока в момент роста импульса напряжения на ИРЗ, что свидетельствует о незапуске ключа. Спустя полпериода колебаний происходит открытие ключа, появляется ток; причем сигнал управления имеет противоположный знак (срабатывание при падении напряжения импульса), что объясняется неодинаковой чувствительностью симисторов на импульсы управления разных полярностей. Помехи, имеющие место на рис. 4.22, обусловлены работающей при испытаниях схемой управления вакуумным выключателем.

Таким образом, высоковольтные испытания показали правильность проведенных расчётов при разработке/проектировании устройства и его конструктивного исполнения, а также способность им сохранять работоспособность

в диапазоне расчётных напряжений, токов и температур, приближенных к условиям реальной эксплуатации.

Благодаря решению применить в ИРЗ УУ невозможна ситуация когда один или несколько симисторов не включатся; практически в 2 раза уменьшается максимальное время задержки включения симисторов (по сравнению с результатами, полученными в опытах, приведенных в п. 4.4).

### **Выводы по четвертой главе**

1. Показано, что в качестве ключа в устройстве ИРЗ вполне могут применяться распространенные отечественные симисторы на напряжение 1.2-1.6 кВ и ток 25 А. Применение симисторов с заметно большим номинальным напряжением сопряжено с требованием увеличения мощности запускающего импульса, а также с разительным удорожанием устройства ИРЗ.

2. Обоснован выбор защитных варисторов симисторного ключа. Проведены их лабораторные входные испытания и монтаж в опытный образец ИРЗ.

3. Спроектирован и сконструирован запускающий трансформатор системы управления ИРЗ, обеспечивающий гальваническую развязку низковольтных и высоковольтных цепей управления. Проведены его лабораторные испытания, разработана компьютерная модель ЗТ.

4. Установлено, что применение новых диэлектрических аэрозольных покрытий с высокой адгезией позволяет эффективно (до ~40%) увеличить электрическую прочность изоляционных конструкций. Применительно к разработанной конструкции запускающего трансформатора указанное покрытие позволяет использовать в качестве материала каркаса запускающего трансформатора более дешевые и доступные полимеры, используемые в 3D печати.

5. Доказано, что большой разброс времен включения симисторов может привести к тепловой перегрузке и выходу из строя защитных варисторов, что повлечет повреждение устройства ИРЗ. Для исключения этого нужно отбирать чувствительные к включению симисторы, также обладающие одинаковыми временами включения. Одновременно необходима доработка системы запуска, которая бы включала функцию амплитудной селекции импульсов запуска ключей.

Однако данный подход связан с большими трудозатратами. Более простым и универсальным решением является использование специального устройства управления.

6. Доказано, что применение устройства управления включением ключей позволяет исключить незапуск одного или нескольких симисторов и добиться более одновременного отпирания симисторов независимо от крутизны производной напряжения в нейтрали ЭС. Такое УУ обеспечивает возможность изменения его чувствительности в широком диапазоне.

7. Разработанная компьютерная модель ИРЗ позволила проверить и оптимизировать устройство ИРЗ.

8. Лабораторными испытаниями доказана способность ИРЗ выдерживать с запасом номинальное напряжение сети 10кВ и ток 18А. Температурный диапазон работы симисторного ключа находится в диапазоне от 5 до 30С<sup>0</sup>. Время открытия симисторного ключа ИРЗ составляет ~28 мкс. В итоге изготовлен опытный образец устройства ИРЗ пригодного для эксплуатации в реальной электрической сети 6-10 кВ.

## ГЛАВА 5 ГЛУБОКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

### 5.1 Основы глубокого ограничения дуговых перенапряжений

Большая производная напряжения в нейтрали ЭС может быть использована не только для управления симисторным ключом, подключающим нейтралезаземляющий резистор  $R_N$  к нейтрали ЭС и контуру заземления, но и другим оборудованием, которое может быть включено при неустойчивых ОЗЗ [91, 92]. На кафедре ТЭВН разработано устройство, позволяющее ограничить дуговые перенапряжения до минимально возможных значений. Предлагается совместное использование ОПН, подключаемого к фазе ЭС, и последовательно включённого с ним полупроводникового ключа. Такое устройство глубокого ограничения (УГО) дуговых перенапряжений позволяет достичь уровня ограничения  $\sim 1.8U_{ф.м.}$

Принцип работы устройства заключается в подключении ОПН к фазам ЭС в момент возникновения однофазного дугового неустойчивого замыкания. Защитные аппараты (ОПН) выбираются таким образом, чтобы их ВАХ в области больших токов ( $\sim 100\text{А}$ ) лежала ниже первого пика дуговых перенапряжений. Базовая принципиальная электрическая схема УГО приведена на рисунке 5.1.

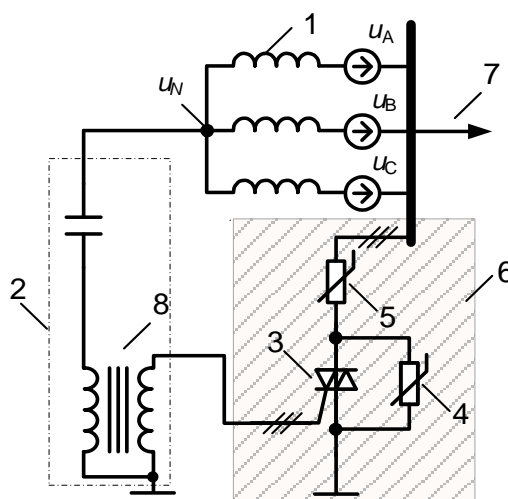


Рисунок 5.1 - УГО (в заштрихованном прямоугольнике); 1- обмотка трансформатора, 2 – ДЗЦ, 3 – симисторные ключи, 4 – защитные варисторы, 5 – фазные ОПН, 6 – УГО, 7 – к сети, 8 – запускающий трансформатор

Устройство глубокого ограничения дуговых перенапряжений принципиально можно использовать с любым способом неэффективного заземления нейтрали, включая полную изоляцию нейтрали [93].

## 5.2 Автономная работа устройства глубокого ограничения

### 5.2.1 Запуск устройства глубокого ограничения от собственного устройства управления

Работа УГО отличается от работы устройства ИРЗ. Это отличие заключается в том, что к источнику перенапряжений – фазному проводу подключается не линейный резистор, а резко нелинейный варистор (например, ОПН [94-96]). Для открытия симистора необходимо, чтобы на управляющем электроде был достаточный сигнал управления и ток, протекающий через симистор, превышал минимальный ток включения [97] (блокировочный ток – latching current) симистора ( $I_L$ ), т.е.

$$i_{\text{ОПН}} > I_L \quad (5.1)$$

При раннем открытии симистора по производной  $du_N/dt$ , т.е. по приходу сигнала управления на УЭ, напряжение на условном аноде может быть недостаточным для выполнения условия (5.1) и симистор не откроется. Поэтому импульс управления должен иметь достаточную длительность, либо нагрузка должна иметь такую ВАХ, при которой обеспечивается требуемый ток. Такое условие реализуется включением линейного сопротивления параллельно нелинейному. Хотя такое решение возможно, оно технически и конструктивно сложное и в устройстве не используется.

Наибольший ток в открытом симисторе будет протекать при максимуме фазного напряжения. Время его достижения определяется частотой свободных перезарядных процессов  $\beta_1$ , наступающих после пробоя фазной изоляции и длящихся до момента гашения дуги. Таким образом, длительность импульсов запуска ( $t_n$ ), отсчитываемая приблизительно от момента пробоя фазной изоляции, должна находиться из условия  $t_n \geq \pi/\beta_1$ .

В связи с тем, что частота свободных колебаний  $\beta_1$ , в общем случае, зависит от параметров сети, длительность запускающих импульсов должна подстраиваться для конкретной ЭС. Расчёт частоты  $\beta_1$  выполняется на основе данных о мощности питающего трансформатора и ёмкостном токе замыкания на землю или фазной ёмкости ЭС (см. п.2). Однако такой расчёт может не понадобиться, если исходить из некоторой минимальной частоты собственных колебаний (см. п. 2.1.2).



Приближенное значение  $t_{и}$  определяется по наименьшей мощности понизительного трансформатора в центре питания (индуктивностью источника) и наибольшей ёмкости ЭС. Например, для ЭС 10 кВ можно принять наибольшую индуктивность источника  $L_s=1.9$  мГн (см (2.32) в п. 2.2.2), а максимальную ёмкость сети для тока ОЗЗ 20А -  $C_{\phi}=3.7$  мкФ, тогда согласно (3.1)  $\beta_1=6.2$  рад/мсек и  $t_{и}=0.5$  мс.

При автономной работе УГО избыточный заряд с нейтрали ЭС принципиально не сбрасывается до нуля, поскольку фазные ОПН закрываются после выполнения условия  $u_{\phi} < U_{п.ОПН}$ , где  $U_{п.ОПН}$  – напряжение (ЭДС) подпора (т.е. остающееся напряжение на ОПН при малом токе). Поэтому интенсивность переходного процесса при вторичных пробоях изоляции принципиально больше, чем при первичном пробое, когда напряжение пробоя  $U_{пр} \cong U_{\phi.m}$

### 5.2.2 Энергия, поглощаемая фазными нелинейными ограничителями перенапряжений

Работа УГО в автономном режиме сопряжена с рядом проблем. Из-за остающегося заряда на нейтрали ЭС перенапряжения оказываются завышенными, что ведет к повышенному энерговыделению в фазных ОПН.

Аналитически энергию, поглощенную фазными ОПН в ЭС с изолированной нейтралью, можно оценить из следующих соображений. Электростатическая энергия определяется емкостью сети и максимумом перенапряжений. По окончании работы фазных ОПН, т.е. после снижения перенапряжений, эта энергия снижается. Разность энергий можно отнести к энергии, поглощенной ограничителем. В действительности незначительная часть потерь энергии приходится и на остальные элементы ЭС.

Энергия, поглощенная фазным ОПН при единичном зажигании-самогашении заземляющей дуги, вычисляется по формуле:

$$E_{\text{ОПН.ин}} \cong \frac{C_{\phi} + 2C_{\text{мф}}}{2} (U_{\text{max}}^2 - U_{\text{ост}}^2), \quad (5.2)$$

где  $U_{\text{ост}}$  – остающееся напряжение на фазном ОПН,  $U_{\text{max}}$  – максимальное неограниченное перенапряжение.

Оценим  $U_{\text{max}}$  при автономной работе УГО и горении заземляющей дуги по гипотезе Петерсена. Исходя из того, что после первичного гашения дуги

ограниченные перенапряжения на фазах  $U_{\phi,1}=1,8$  о.е., смещение напряжения на нейтрали не превысит  $U_N=2/3U_{\phi,1}=1,2$  о.е. [9]. При последующем зажигании дуги кратности неограниченных перенапряжений составили бы:  $U_{max}=1,5U_{\phi,m}+(U_{\phi,m}+U_N)(1-k)(1-d)=3,08U_{\phi,m}$ , где  $d=0.1$  – коэффициент, характеризующий затухание свободных колебаний, а  $k=0.2$  – коэффициент электростатической связи между фазами [64].

Найдем выделившуюся в фазном ОПН энергию на примере ЭС 10 кВ. Ёмкость ЭС с изолированной нейтралью примем равной максимально допустимой, исходя из предельного ЕТЗЗ (20 А) -  $C_{\phi}=3.7$  мкФ (с резистивным заземлением - 2,6 мкФ); междуфазную ёмкость полагаем равной  $C_{мф}=0.25C_{\phi}$ . Подставив данные в (5.2), получим энергию, поглощенную ОПН. Она составит  $E_{ОПН.ИН}=1149$  Дж.

Оценим время *минимальной* работы УГО. Выберем фазный ОПН 5-го класса пропускной способности с  $U_{ном}=6$  кВ. Его удельную энергию возьмем равной  $E_{уд.ОПН}=7.1$  кДж/кВ [98, 99]. Время работы при условии зажигания дуги через каждый полупериод промышленной частоты ( $\Delta t=0.01$ ) составит:  $t_{раб}=E_{уд.ОПН}U_{ном}\Delta t/E_{ОПН.ИН}=0.36$  сек. Это оценка предельной энергии, поскольку вероятность такого режима работы крайне низка.

При переходе дугового замыкания в установившееся («металлическое»), фазный ОПН отключается от сети. Это исключает его дальнейший разогрев.

### **5.3 Совместная работа устройств глубокого ограничения и импульсного резистивного заземления нейтрали**

Устройство глубокого ограничения дуговых перенапряжений целесообразно использовать совместно с устройством импульсного резистивного заземления нейтрали. УГО в таком случае не требует собственной дифференцирующей цепи, т.к. сигнал управления может быть подан с УУ ИРЗ (рисунок 5.2). При работе ИРЗ напряжение на нейтрали быстро снижается, и не допускается длительный подъем (по модулю) фазных напряжений, благодаря чему фазные ОПН энергетически разгружаются и их работа допустима в течение большего времени. Перенапряжения на всём протяжении дугового замыкания будут находиться на одном уровне, и смещение напряжения на нейтрали ЭС не возникнет, т.е. выполняется условие к

моменту последующего пробоя  $U_N \neq 0$ . Максимальные кратности перенапряжений при ИРЗ применительно к выше принятым коэффициентам  $d$  и  $k$  составят:

$$U_{max} = 1,5 U_{\phi.m} + (U_{\phi.m} + 0)(1-k)(1-d) = 2,22 U_{\phi.m}, \text{ (18,1кВ для сети 10 кВ).}$$

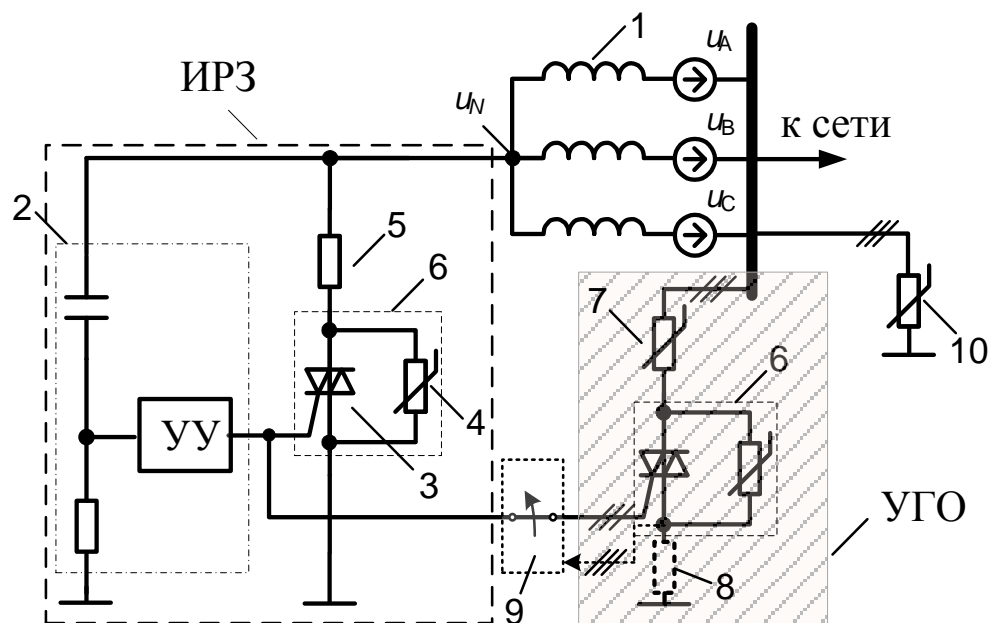


Рисунок 5.2 - ИРЗ (в пунктирном квадрате); 1- нейтраль трансформатора, 2 – ДЗЦ, 3 – симисторная цепь, 4 – защитная варисторная цепь, 5 – нейтрале-заземляющей резистор, 6 – полупроводниковый ключ; УГО (в заштрихованном прямоугольнике); 7 – фазный ОПН, 8 – токовый шунт 9 – релейный элемент, 10 – основной защитный ОПН

Найдем время работы УГО совместно с ИРЗ для ЭС 10 кВ. Энергия, которую должен поглотить фазный ОПН, вычисляется согласно (5.2) и составляет:  $E_{\text{ОПН.RN}} = 312$  Дж. Время работы УГО при условии зажигания дуги через каждый полупериод промышленной частоты ( $\Delta t = 0,01$ ):  $t_{\text{раб}} = E_{\text{уд.ОПН}} U_{\text{ном}} \Delta t / E_{\text{ОПН.RN}} = 1,35$  сек. Таким образом, длительность непрерывной работы фазных ОПН увеличивается в 3,7 раза.

Применение устройства глубокого ограничения возможно в любых распределительных сетях среднего напряжения 6-35 кВ (с различными способами заземления нейтрали включая регулируемые ДГР [100]). Например в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью допускается эксплуатировать сеть с ОЗЗ до устранения повреждения. Поэтому контролируемое увеличение длительности работы фазных ОПН в таких сетях актуально.

## 5.5 Компьютерное моделирование работы устройства

Средой работы УГО являются сети 6-35 кВ, их структура сложна и изменчива. Для оценки возможности применения УГО необходимо иметь данные о мощности источника питания, а также типах (КЛ и ВЛ) и длинах основных линий.

В целях уточнения параметров устройства ГО (УГО) разработана компьютерная модель радиальной сети 10 кВ, которая представлена на рисунке 5.3. Схмотехническое моделирование проводилось в среде программы PSPICE. В ней воссоздана схема замещения разветвлённой ЭС с дуговым замыканием на одной из линий. К сети подключены модели устройств ИРЗ и ГО.

Для моделирования фазных ОПН, выбранных по требуемому остающемуся напряжению –  $1.8U_{\phi.m}=14.6$  кВ, необходимо знать его ВАХ на участке малых токов. ВАХ большинства современных ОПН в данной области похожи. В компьютерной модели ВАХ ОПН задаётся в табличном (кусочно-линейном) виде в соответствии с кривой, приведенной на рисунке 5.4.

### Управляемые ОПН

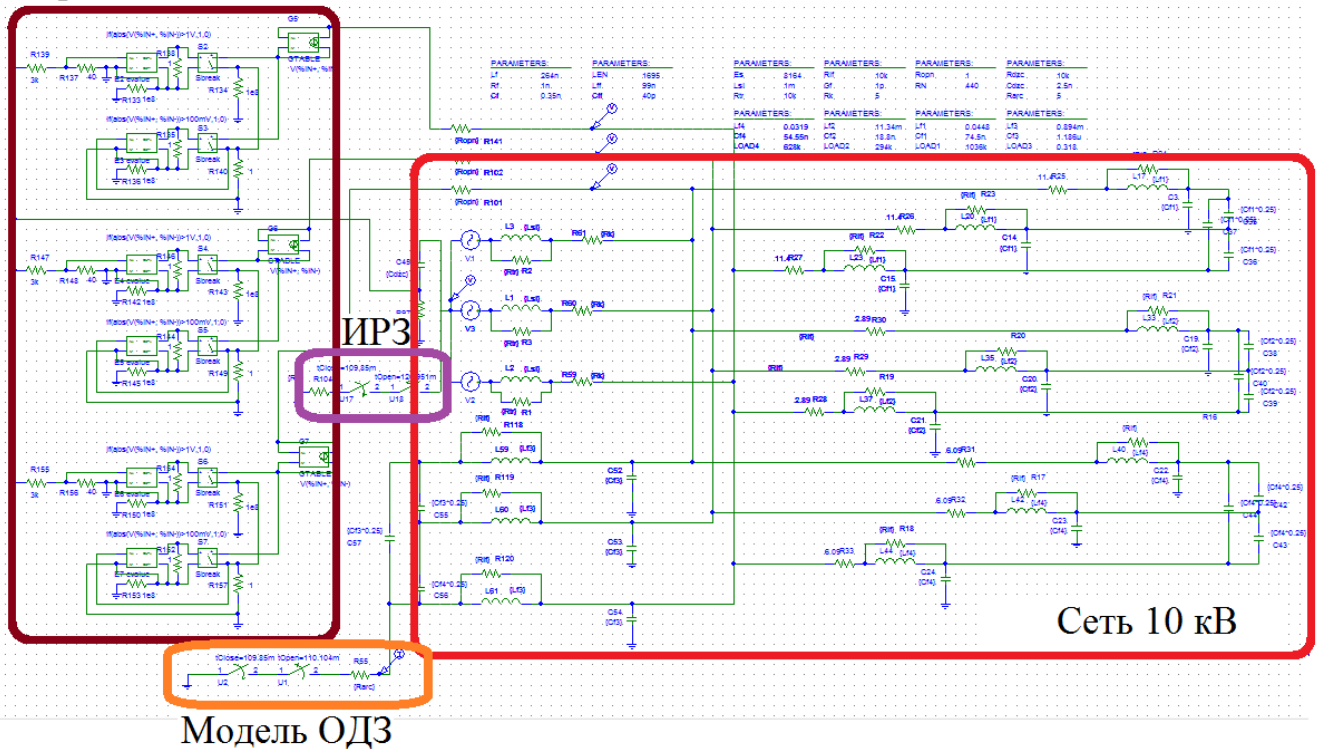


Рисунок 5.3 - Компьютерная модель сети с глубоким ограничением дуговых перенапряжений, созданная в среде схмотехнического моделирования PSPICE

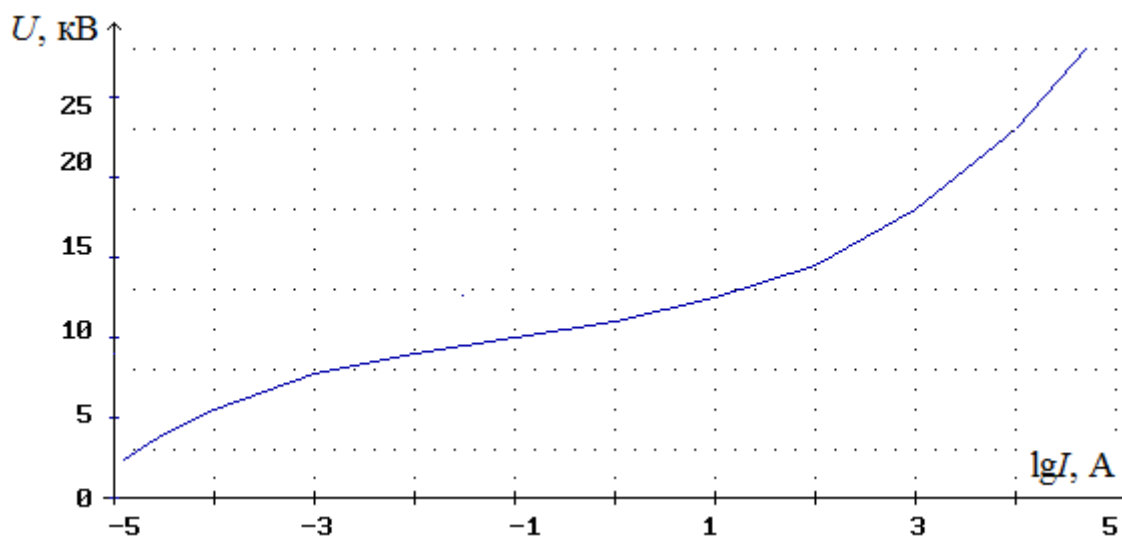


Рисунок 5.4 - ВАХ фазного ОПН, используемого в модели УГО

### 5.5.1 Компьютерное моделирование работы устройства глубокого ограничения в сети с изолированной нейтралью

На рисунке 5.5 приведены неограниченные перенапряжения на неповреждённых фазах, нейтрали и повреждённой фазе при ОДЗ в ЭС. Характер их изменения типичен для ЭС с изолированной нейтралью. Кратности неограниченных перенапряжений достигают уровня  $\sim 3U_{\phi.m}$ . Согласно [100, 101] уровни электрической прочности изоляции электрооборудования 6-35 кВ находятся в диапазоне  $2.5 \dots 2.9U_{\phi.m}$  – для электродвигателей и генераторов и  $4 \dots 9U_{\phi.m}$  – для остального оборудования. Поэтому глубокое ограничение перенапряжений, прежде всего, актуально для ЭС с вращающимися электрическими машинами или сильно состарившимся оборудованием.

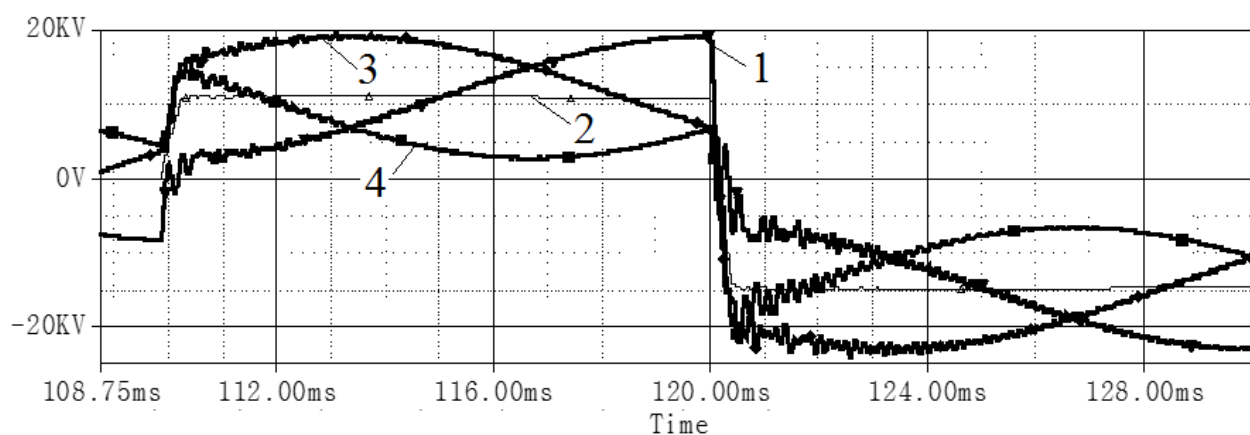


Рисунок 5.5 - Неограниченные перенапряжения в ЭС с изолированной нейтралью

Применение УГО в сети с изолированной нейтралью по результатам компьютерного моделирования (рисунок 5.6) позволяет уменьшить перенапряжения до уровня  $1.8U_{ф.м}$ . Тем самым продлевается срок службы оборудования.

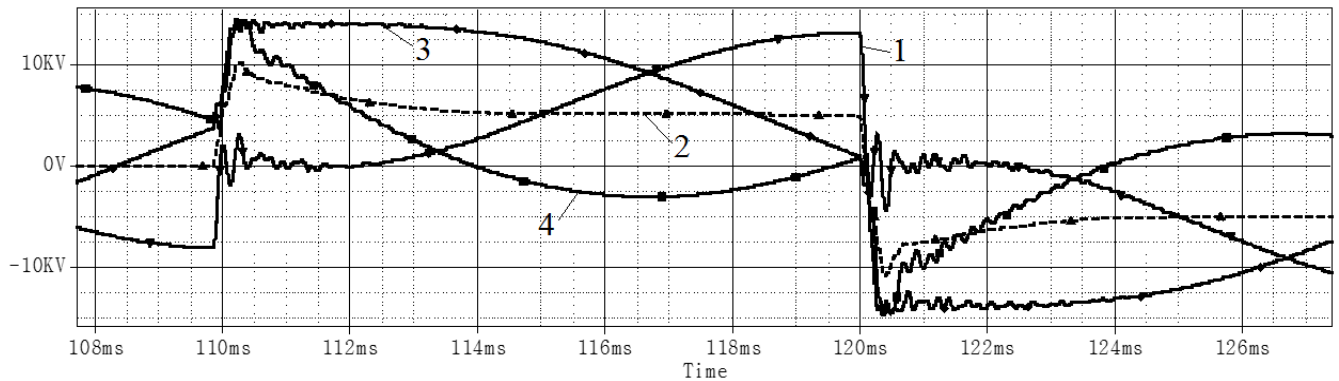


Рисунок 5.6 – Расчётные кривые напряжения на повреждённой фазе (1), нейтрали (2) и неповреждённых фазах (3,4) при ОДЗ в ЭС с устройством глубокого ограничения (УГО работает автономно)

Во время работы устройства глубокого ограничения фазные ОПН поглощает значительную энергию. По результатам моделирования при вторичном пробое фазной изоляции, когда уже имеет место смещение напряжения на нейтрали ЭС, энергия, поглощенная фазным ОПН, составляет  $E_{\text{ОПН.ин}}=2000-850=1150$  Дж, что хорошо совпадает с аналитически полученным значением (1149 Дж - см. п. 5.2). Кривые протекающего в нём тока, а также энергии, поглощенной ОПН, полученные в результате моделирования, приведены на рисунках 5.7. и 5.8.

Из-за смещения напряжения на нейтрали ЭС напряжение на «опережающей», по отношению к поврежденной фазе, длительно увеличивается с ростом составляющей промышленной частоты до уровня  $1.8U_{ф.м}$ , при этом через фазный ОПН протекает ток, и поглощается большая энергия. Заземление нейтрали через резистор [5] заметно снижает энергетическую нагрузку на фазные ОПН.

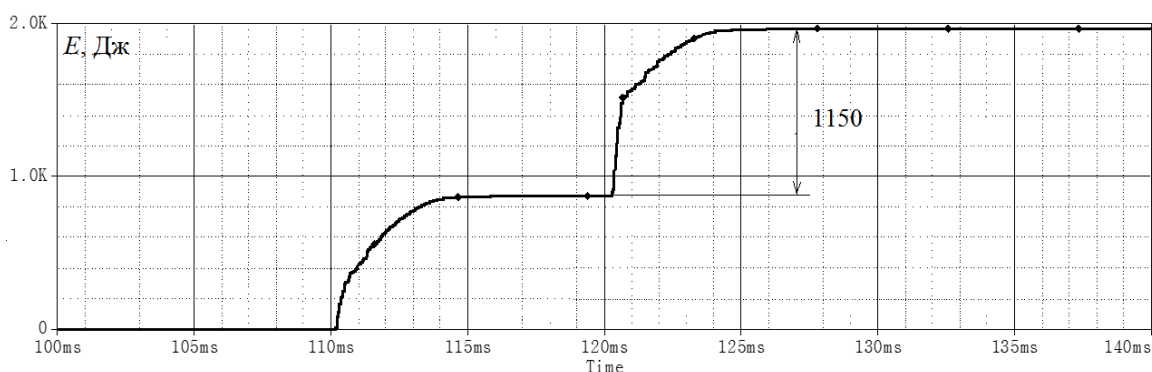


Рисунок 5.7 – Кривая наибольшей энергии поглощаемой фазным ОПН, получена при компьютерном моделировании

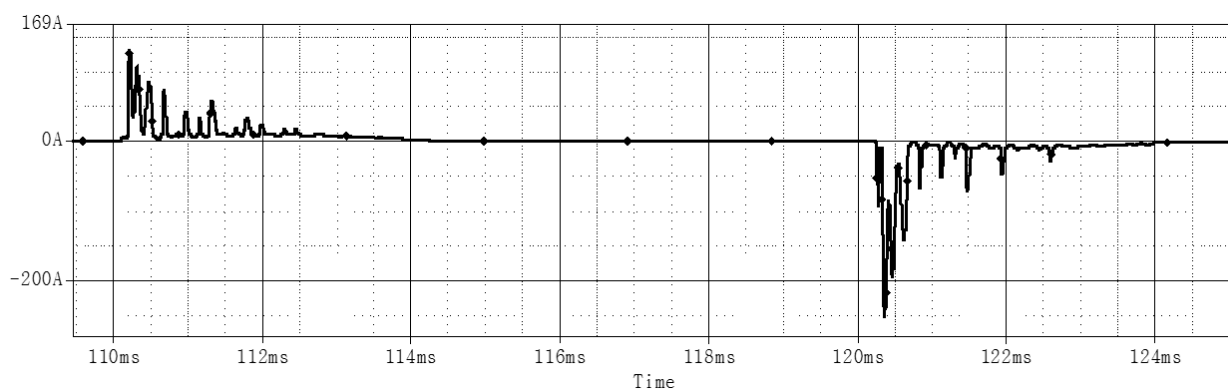


Рисунок 5.8 - Кривая тока в фазном ОПН, полученная при компьютерном моделировании

### 5.5.2 Компьютерное моделирование работы устройства глубокого ограничения в сети с импульсным резистивным заземлением

Совместное применение ИРЗ и УГО позволяет снизить дуговые перенапряжения и энергетически разгрузить фазные ОПН УГО. Как было отмечено, устройство ИРЗ устраняет смещение нейтрали, ограничивая дуговые перенапряжения до уровня  $\sim 2.2U_{ф.м}$  (рисунок 5.9).

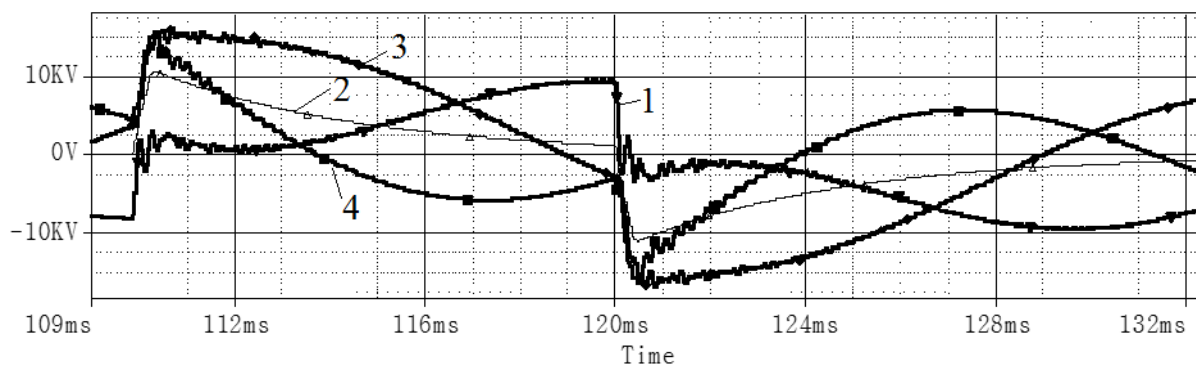


Рисунок 5.9 – Расчётные кривые напряжения на повреждённой фазе (1), нейтрали (2) и неповреждённых фазах (3,4) при ОДЗ в ЭС с ИРЗ ( $U_{max}=16кВ$ ),  $K_R=1$

Фазные ОПН ограничивают лишь первый максимум перенапряжений в момент самогашения дуги (рисунок 5.10), ИРЗ предотвращает подъем напряжения после самогашения и позволяет значительно сократить выделение энергии в фазных ОПН.

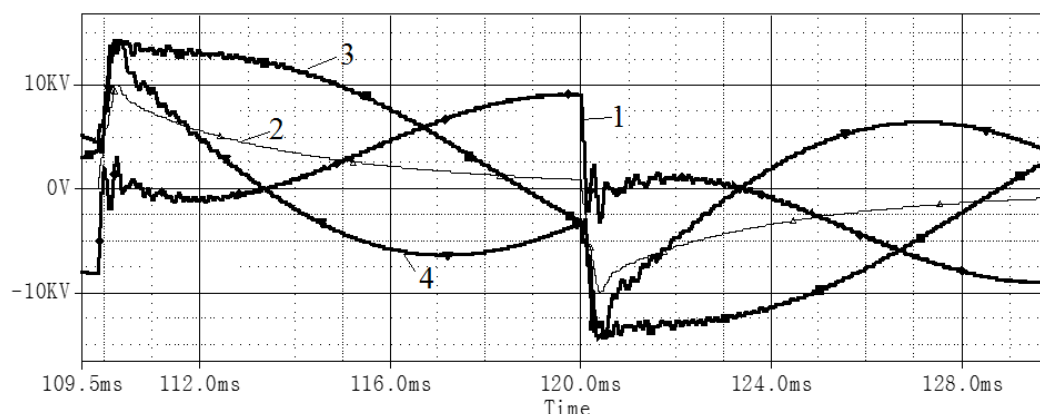


Рисунок 5.10 – Расчётные кривые напряжения на повреждённой фазе (1), нейтрали (2) и неповреждённых фазах (3,4) при ОДЗ в ЭС с УГО и ИРЗ. Уровень перенапряжений  $1.8U_{\phi.m}(U_{max}=14.3 \text{ кВ})$

По результатам компьютерного моделирования при повторном зажигании дуги фазные ОПН поглощают энергию около 386 Дж (время  $t > 121 \text{ мс}$  на рисунке 5.11), что близко к аналитически полученному значению (312 Дж). Расхождение обусловлено тем, что в аналитических расчётах предполагается  $U_N=0$ , но в действительности при моделировании остается незначительное остаточное напряжение, что приводит к большему значению выделяемой энергии. По сравнению с автономной работой УГО совместное применение обоих устройств по данным моделирования позволяет уменьшить количество выделяемой на ОПН энергии приблизительно в 3 раза.

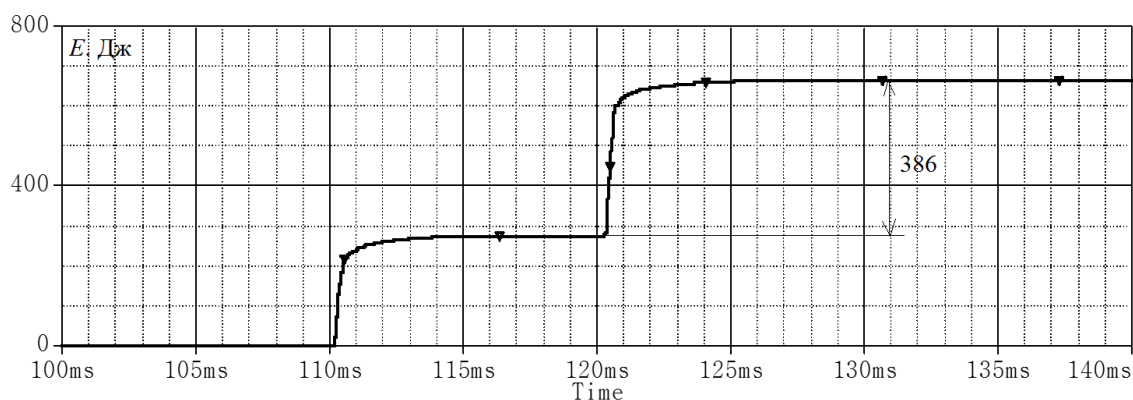


Рисунок 5.11. Энергия, поглощённая ОПН при ОДЗ ( $E=386 \text{ Дж}$ ). Заземление через ИРЗ



## 5.6 Предотвращение перегрева защитных варисторов устройства глубокого ограничения

### 5.6.1 Энергия, выделяемая в защитных варисторах

Важным элементом УГО является цепочка защитных варисторов. От её работы зависит надёжность устройства. Согласно [102], принципиально возможны схемы ЭС, в которых допустимо неприменение ОПН на шинах ЦП/понижительной подстанции, подобные схемы должны быть исключены. При установке УГО на шинах должны быть установлены основные (шинные/штатные) ОПН (рисунок 5.12), ограничивающие возможные грозовые и коммутационные перенапряжения до уровня  $\sim 3.1 \dots 3.3 U_{ф.м.}$

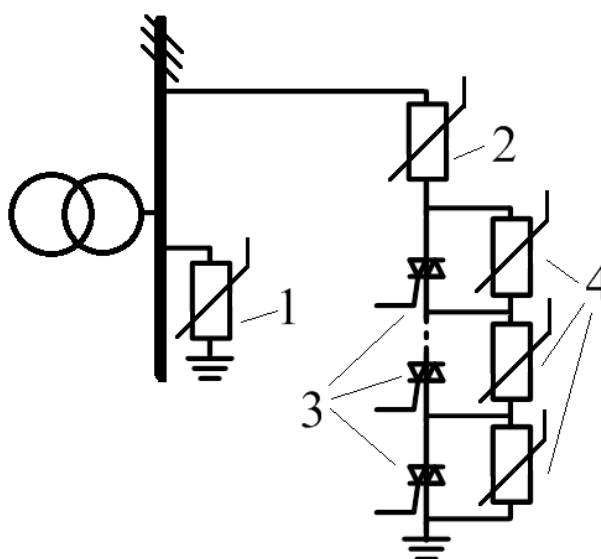


Рисунок 5.12 – Схема установки устройства УГО; 1 - штатный ОПН, 2 – фазный ОПН УГО, 3 – составной симисторный ключ, 4 – защитная варисторная цепочка

Цепочка защитных варисторов (4), показанная на рис.5.12, неспособна выдерживать серьезные энергетические нагрузки, её назначение - лишь кратковременная защита конкретного симистора во всей последовательной цепи от перенапряжений при их одновременном отпирании. В отличие от симисторного ключа ИРЗ, ключ УГО потенциально срабатывает при больших перенапряжениях, а, значит, и энергетические нагрузки на защитные варисторы больше при тех же временах задержки одновременности включения  $\Delta t_{зд.маx}$ . Величина выделенной в варисторах энергии зависит от уровня напряжения на неповрежденной фазе в момент времени, когда происходит включение ключа УГО.

### 5.6.2 Временная диаграмма включения ключа устройства глубокого ограничения

Интервал времени от замыкания фазы на землю до полного открытия симисторного ключа складывается из нескольких времен, которые поясняются на рисунке 5.13. Время срабатывания  $t_{du/dt}$ , при котором напряжение на ДЗЦ достигает порога срабатывания  $u_{сраб}$ , и запускается устройство управления, непостоянно, поскольку форма производной и ее амплитуда (см. п. 2.2.2) зависят от конфигурации самой ЭС, типа фидеров, удалённости места замыкания. Время от начала формирования запускающего сигнала УУ [57] до его максимума на управляющих электродах симисторов в ключе  $t_{уэ}$  постоянно и практически не зависит от внешних факторов. Время включения составного симисторного ключа  $t_{зд.сим}$  состоит из совокупности времен включения отдельных симисторов. Однако, при поступлении на УЭ импульсов разной полярности времена включения меняются, это связано с особенностями работы симисторов в разных квадрантах ВАХ (см. п. 4). Как было отмечено в пункте 4.3, запуск симистора может произойти только при наличии на управляющем электроде сигнала открытия и протекании через него тока, превышающего ток включения ( $I_{вар.ГО} > I_L$ ).

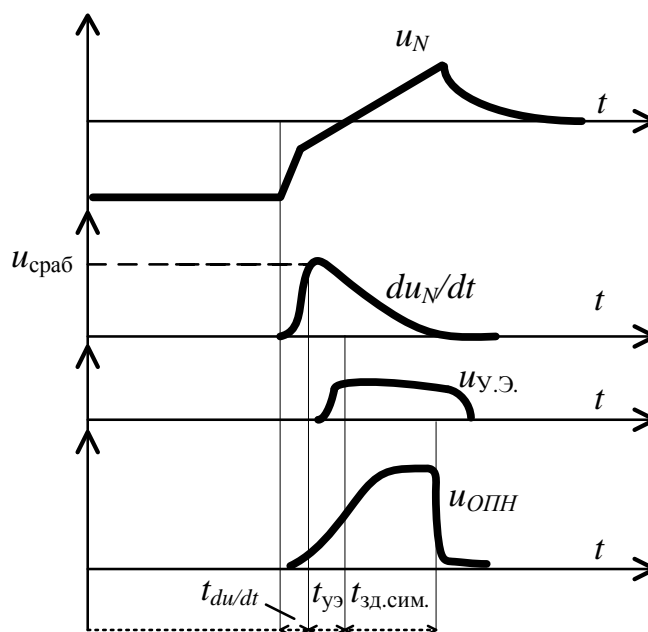


Рисунок 5.13. Диаграмма времен от ОДЗ до полного открытия симисторного ключа

Времена задержек включения симисторов определяются экспериментально перед монтажом УГО.

### **5.6.3 Энергия, выделяемая в защитных варисторах устройства глубокого ограничения при устойчивом однофазном замыкании на землю**

Защитные варисторы выбираются таким образом, чтобы их энергоёмкость соответствовала выделяемой в них энергии, а также уровню перенапряжений, воздействующих на защитный варистор в нормальном режиме.

В нормальном режиме фазный ОПН и защитные варисторы закрыты, и через них не протекает ток. Но в режиме устойчивого ОЗЗ последовательная цепь из фазного ОПН и защитных варисторов должна выдерживать длительно линейное напряжение. Цепь варисторов и последовательно включённый фазный ОПН можно представить единым ОПН (или варистором), который должен быть закрыт. Таким образом, эта цепь должна выбираться приблизительно так же, как и основной (штатный) ОПН [57] для сетей с неэффективно заземленной нейтралью. Защита всего оборудования ПС, включая УГО, от всех видов перенапряжений осуществляется с помощью основного ОПН (10-й элемент на рисунке 5.2), традиционно устанавливаемого на шинах центра питания. Остающееся напряжение основного ОПН выбирается меньшим на ~5% по сравнению с остающимся напряжением последовательной цепи из фазного ОПН и защитных варисторов.

### **5.6.4 Энергия, выделяемая на защитных варисторах устройства глубокого ограничения при задержке включения последнего симистора**

Принципиально возможно включение ключа УГО в момент времени, когда перенапряжения в ЭС, ограниченные основным ОПН, составляют  $3,1-3,3U_{ф.м}$ . Этот случай соответствует наибольшему энергетическому воздействию на защитные варисторы и возможен, если сумма времен задержки включения ключа  $t_1 = t_{du/dr} + t_{y\text{Э}} + t_{зд.сим}$  приходится на максимум неограниченного фазным ОПН напряжения.

Последнее условие выполняется в ЭС с относительно малыми токами ЕТЗЗ и мощными питающими трансформаторами: пусковые/временные схемы электропитания, схемы собственных нужд и т.д. В таких ЭС время нарастания

перенапряжения до максимума сопоставимо со временем открытия ключа, т.е. высокая перезарядная частота  $\beta_1$  (на уровне 3-5кГц) провоцирует резкий рост напряжения. Временные промежутки  $t_{y3}=30$  мкс,  $t_{зд.сим}=28$ мкс, относительно постоянны, но время максимума производной  $t_{du/dt}$  варьируется в зависимости от значения производной и может достигать  $t_{du/dt}\approx 100$  мкс.

Рассчитаем энергию, выделяемую в защитном варисторе для случая, описанного выше, если последний (по времени включения) симистор в последовательной цепи задерживается на время  $\Delta t_{зд.мах}$ .

Разряд ёмкости ЭС на кратковременно сформированную цепь УГО с одним неоткрытым симистором происходит кратковременно – в течение нескольких микросекунд, поэтому в схему замещения входит эквивалентный фидер (рисунок 5.14,а). В случае кабельной сети с большим числом фидеров в узле установки УГО эквивалентное волновое сопротивление ( $Z_{с экв}$ ) становится намного меньше суммы дифференциальных сопротивлений ОПН и защитного варистора ( $Z_{с.экр} \ll R_{д.ОПН} + R_{д.вар}$ ), поэтому им можно пренебречь, и вместо кабеля устанавливается сосредоточенный элемент - фазная емкость сети, напряжение на которой до замыкания последнего симистора –  $u(t)$ . Схема замещения, показанная на рисунке 5.14, а, в таком случае преобразуется в схему, представленную на рисунке 5.14, б.

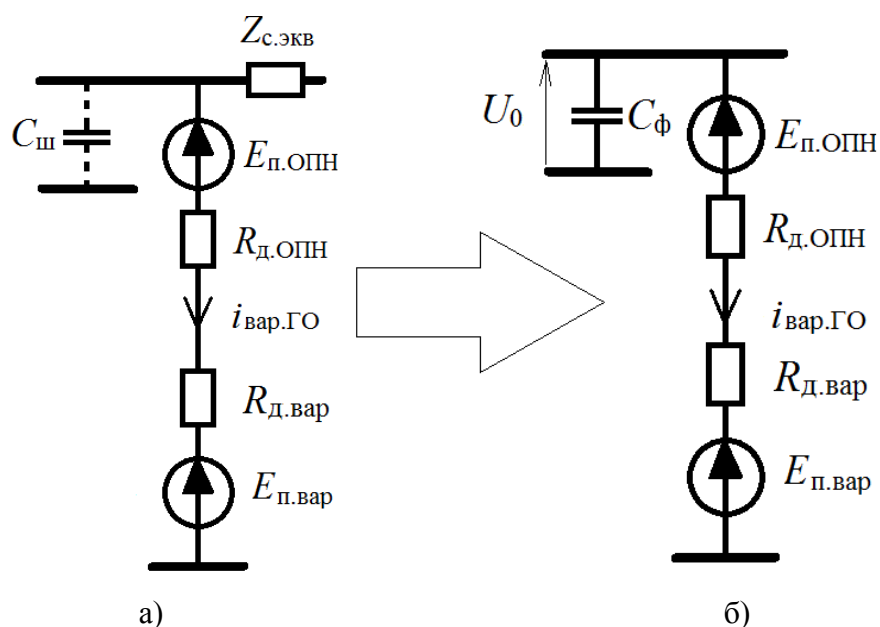


Рисунок 5.14 - Расчётная схема для определения энергопоглощения варисторами УГО

После отпирания предпоследнего симистора емкость сети (см. рисунок 5.14,б) разряжается на фазный ОПН и варистор. Заряд стекает по экспоненциальному закону с постоянной времени равной  $\tau=(R_{д.ОПН}+R_{д.вар})C_{\phi}$ .

Ток в варисторе убывает (по модулю) в соответствии с выражением (5.3),

$$i_{вар.ГО}(t) = \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \frac{U_0 - E_{п.ОПН} - E_{п.вар}}{R_{д.вар} + R_{д.ОПН}}. \quad (5.3)$$

Энергия, которая поглотится варистором, будет приблизительно равна

$$W_{вар.ГО} \cong \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t_{зд.мах}} E_{п.вар} i_{вар.ГО}(t) dt, \quad (5.4)$$

где  $t_1$  – время максимума напряжения на фазе.

Для схемы замещения, представленной на рис. рис.5.13,б, определим напряжение подпора варисторов и фазного ОПН, исходя из следующих соображений: требуемый уровень ограничения фазного ОПН -  $1.8U_{\phi.m}$ , его дифференциальное сопротивление при токе 100А (согласно рисунку 5.4) составляет  $R_{д.ОПН}=13.55$  Ом, а  $E_{п.ОПН}=15$ кВ.

В УГО используются мощные защитные варисторы. В области больших токов (при токе 100А), напряжение подпора одного варистора составляет:  $E_{п.вар}=1.23$ кВ, дифференциальное сопротивление -  $R_{д.вар} = 2$  Ом.

Не заниженную оценку энергии можно получить, полагая ток неизменным (начальным), поскольку  $\Delta t_{зд.мах} < \tau$ , и ток спустя время задержки 6 мкс  $i_{вар.ГО}=100(I_0(1-\exp(-\Delta t_{зд.мах}/\tau)))$  составляет 90% от начального тока  $I_0$ . Тогда:

$$W_{вар.ГО} \cong E_{п.вар} I_0 \Delta t_{зд.мах}.$$

По результатам расчёта  $W_{вар}(\Delta t_{зд.мах})=5$  Дж при однократном зажигании дуги. Однако, следует учитывать, что ток в реальной ЭС будет ограничиваться эквивалентным волновым сопротивлением фидеров, отходящих от ЦП (см. рисунок 5.14, а), поэтому энерговыделение уменьшится. Это снижение будет заметным, если от узла подключения УГО отходят воздушные ЛЭП. Емкость ошиновки и оборудования ЦП ( $C_{ш}$ ) формирует первый значительный бросок тока, однако, в силу малой емкости шин (несколько нФ) и, соответственно, малой постоянной времени ее разряда этой частью разрядного процесса можно пренебречь.

Используемый в УГО варистор обладает энергоёмкостью  $W_{т.вар}=420$  Дж, что позволяет ему выдерживать до 84 импульсов с максимальным напряжением на

неповрежденных фазах  $3.1 \dots 3.3 U_{\phi.m}$ . При условии непрерывных зажиганий дуги через каждый полупериод промышленной частоты и отсутствии теплоотдачи время работы варистора составит 0.84 сек. Хотя такой режим работы УГО крайне маловероятен, предложено устанавливать на симистор с наибольшей задержкой включения более энергоёмкий варистор, который допустим по габаритам. В процессе монтажа устройства целесообразно медленный симистор устанавливать у заземленного вывода, что позволяет более полно использовать изоляционные расстояния на заземленные части устройства.

### 5.7 Составной ограничитель перенапряжений нелинейный

Основное назначение штатного/шинного ОПН - ограничить перенапряжения на симисторах и защитных варисторах. Эта задача будет выполнена, если основной ОПН сделать составным: верхнее плечо будет выполнять функции фазного ОПН, а нижнее – выполнять все функции по защите УГО. Например, если принять уровень ограничения основного ОПН  $3,3 U_{\phi.m}$ , то верхнее плечо составного ОПН рассчитывается на уровень ограничения перенапряжений равный  $1,8 U_{\phi.m}$ , а нижнее плечо – на  $1,5 U_{\phi.m}$ . При этом последовательная цепь симисторов и защитных варисторов должна длительно с некоторым запасом выдерживать напряжение нижнего плеча ОПН. Такой подход позволяет несколько сократить материальные затраты на изготовление всего защитного комплекса. Вариант схемы с таким составным ОПН показан на рисунке 5.15.

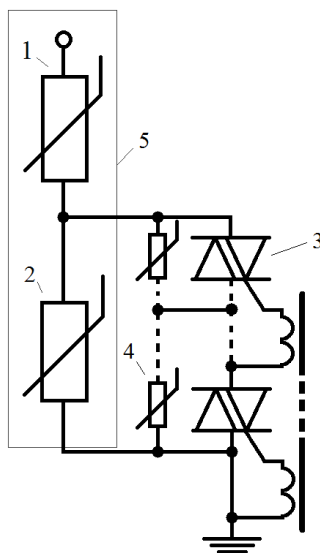


Рисунок 5.15 - Принципиальная схема УГО для одной фазы с составным ОПН (5),

1- фазный ОПН, 2 - дополнительный ОПН, 3- симистор, 4- защитный варистор

Основная нагрузка по ограничению длительных дуговых перенапряжений ложится на фазный ОПН. Для увеличения длительности его работы возможно применение мощных, энергоёмких ОПН/варисторов. На рисунке 5.16 вариант выполнения таких варисторов представлен.

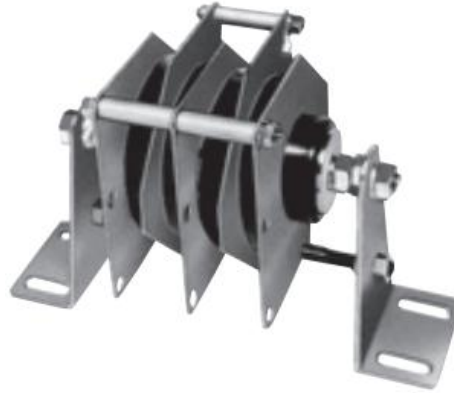


Рисунок 5.16 - Энергоёмкий варистор фирмы Panasonic

Основным преимуществом данного типа защитного аппарата, является его способность эффективно рассеивать тепловую энергию благодаря металлическим рёбрам-радиаторам, установленным между таблетками варисторов. Перспективно применение данной технологии и в высоковольтных ОПН, установка которых предполагается в закрытых помещениях, защищенных от влаги и пыли.

### 5.8 Техническая реализация устройства глубокого ограничения

Конструкция симисторного ключа, используемого для подключения фазных ОПН к контуру заземления, идентична конструкции ключа, применяемого в ИРЗ (рисунок 5.2). Отличие - симисторный ключ рассчитывается на больший импульсный ток ( $I_{TM}$ ).

При совместном применении УГО и ИРЗ управляющий сигнал, поступающий с ИРЗ, усиливается, расширяется (при необходимости) по времени и подаётся на симисторный ключ УГО. Это позволяет отказаться от собственной ДЗЦ в УГО, уменьшить его размеры и стоимость.

Применение глубокого ограничения позволяет избежать пробоя ослабленной изоляции либо изоляции, изначально имеющей относительно низкий уровень (вращающиеся электрические машины).

Конструктивно УГО представляет собой трехфазный симисторный ключ. К каждому ключу подключается фазный ОПН (см. рисунок 5.17). Фотография УГО приведена на рисунке 5.18. Весь ключ шунтируется ОПН с низким классом пропускной способности, который в совокупности с фазным, образует составной ОПН.

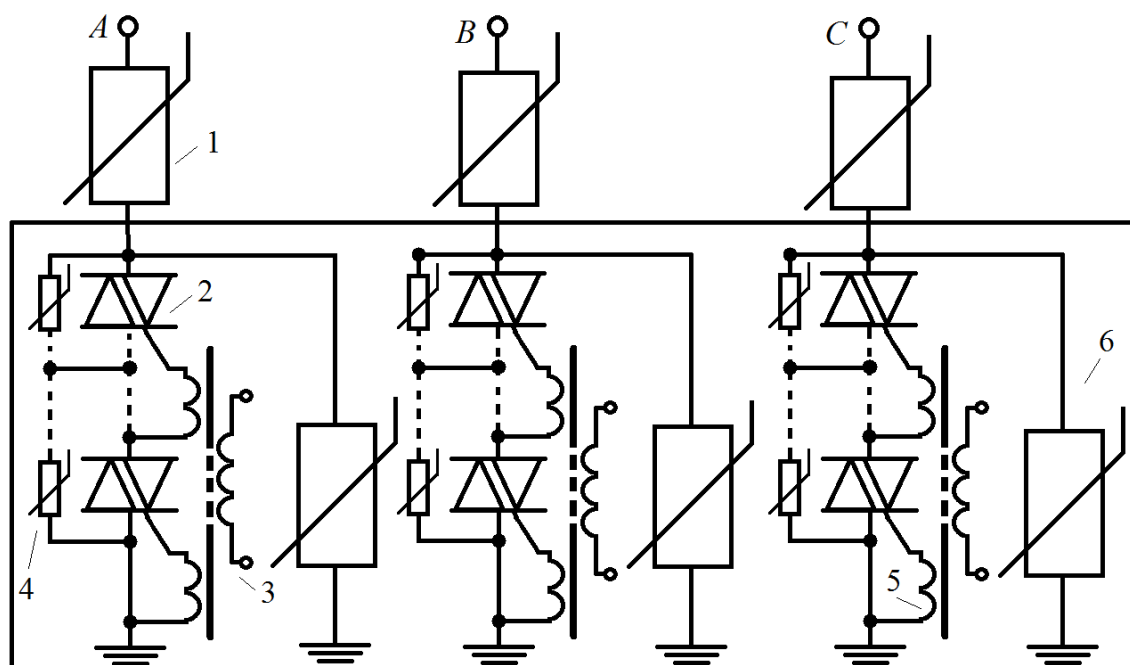


Рисунок 5.17 - Устройство глубокого ограничения, 1 – ОПН, 2 – симистор, 3 – первичная катушка управления, 4 – варистор, 5 – вторичные катушки управления, 6 – дополнительный ОПН (составной вместе с фазным)





Рисунок 5.18 - Устройство глубокого ограничения

В качестве полупроводниковых ключей используются симисторы, рассчитанные на большие (по сравнению с устройством ИРЗ) величины тока и напряжения. Применение более высоковольтных симисторов позволяет собрать ключ на напряжение 10 кВ, используя меньшее количество полупроводниковых элементов, что уменьшает габариты ключа и увеличивает надежность устройства (путем уменьшения элементов). Каждый фазный ключ оснащается микроконтроллерным блоком термо-защиты (МБТЗ), отключающим фазные ОПН при достижении ими критической температуры.

#### **5.8.1 Микроконтроллерный блок термо-защиты устройства глубокого ограничения**

Как было отмечено в п. 5.2. время работы УГО ограничено энергоёмкостью фазных ОПН. При превышении номинальной энергоёмкости, произойдет выход ОПН из строя. Для предотвращения этого, необходимо контролировать энергию, поглощаемую фазным ОПН, и своевременно его отключать. Для этой задачи применяется микроконтроллерный блок термозащиты УГО. Схема блока МБТЗ изображена на рисунке 5.19.

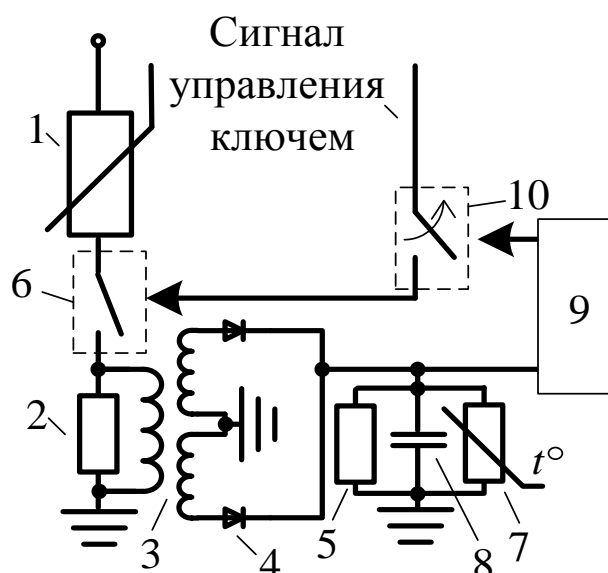


Рисунок 5.19 - Устройство МБТЗ; 1 – Фазный ОПН, 2 – токовый шунт, 3 – трансформатор, 4 – диод, 5 – разрядный резистор, 6 – симисторный ключ в составе УГО, 7 – терморезистор, 8 – конденсатор, 9 – микроконтроллер/реле, 10 – прерыватель/контакты реле

При подключении ОПН (1) к фазе через токовый шунт (2) протекает импульсный ток. Импульсы напряжения с делителя поступают на трансформатор (3), две вторичные обмотки трансформатора с диодами (4) заряжают конденсатор (8) импульсами одной полярности. Разрядный резистор (5) выбирается таким образом, чтобы постоянная времени разряда конденсатора (ионистора) приблизительно равнялась постоянной времени охлаждения фазного ОПН. Добавочный терморезистор (7) меняет своё сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды, изменяя постоянную времени разряда конденсатора в соответствии с постоянной времени охлаждения фазного ОПН.

Элементом, позволяющим отключить фазный ОПН при перегреве, является блок (9). При достижении на конденсаторе (8) напряжения уставки блок реле, управляя группой контактов прерывателем (10), разрывает цепь управления симисторного ключа, и сигнал управления не поступает на симисторы. Там же реализован некий гистерезис для исключения частой работы ключа (дребезга). При падении напряжения ниже заданного значения блок включает цепь управления. Следует отметить, что для каждого типа фазного ОПН необходимо производить выбор терморезистора (7) с требуемыми параметрами.

Альтернативе блоку реле может выступать микроконтроллер. Он программируется таким образом, что измеряя напряжение на конденсаторе и учитывая температуру окружающей среды (посредством термодатчика), позволяет рассчитать время работы фазного ОПН до его перегрева. При превышении заданной температуры фазного ОПН микроконтроллер производит автоматическое прерывание сигнала управления на время необходимое для его охлаждения. После истечения расчётного времени, необходимого для охлаждения, микроконтроллер вновь включает цепь управления и переходит в ждущий режим до появления критического напряжения на конденсаторе.

### Выводы по пятой главе

1. Предложен новый способ глубокого ограничения дуговых перенапряжений в ЭС среднего класса напряжения с неэффективным заземлением нейтрали. Особенность метода заключается в практически полном исключении *кратковременных* дуговых перенапряжений.

2. Разработан ряд компьютерных моделей, позволяющих воспроизводить: переходные процессы при ОДЗ в сетях с неэффективным заземлением нейтрали, работу УГО, в том числе, совместно с устройством ИРЗ. При компьютерном моделировании работы устройства удалось достичь уровня ограничения  $\sim 1.8U_{\phi.m}$  на примере сети 10 кВ.

3. Произведен расчёт энергии, рассеиваемой в фазных ОПН УГО. Доказано, что энергия, выделяемая в фазных ОПН, в  $\sim 3,5$  раза меньше при совместном использовании УГО и ИРЗ.

4. Произведен выбор защитных варисторов УГО, оценены энергоёмкость и время работы единичного варистора в цепочке. Показано, что при единичном воздействии перенапряжения с максимальной кратностью  $(3,1-3,3)U_{\phi.m}$ , максимальная энергия, рассеиваемая в варисторе в самом неблагоприятном режиме включения последнего симистора с большой задержкой, приблизительно в 100 раз меньше максимально допустимого значения, чем обеспечивается их надежная работа. Для защиты «медленных» симисторов рекомендуется применять варисторы повышенной энергоёмкости (мощности).

5. Изготовлен экспериментальный высоковольтный прототип 3-х фазного симисторного высоковольтного ключа, который подключается к фазным ОПН.

6. Применение устройства глубокого ограничения позволяет заметно повысить надежность электрооборудования сетей с вращающимися электрическими машинами (гидро- и турбогенераторами, крупными электрическими двигателями).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие основные рекомендации и выводы.

1. Сопоставление существующих способов заземления нейтрали показало, что официально разрешенное в России приблизительно с 2000 г. высокоомное резистивное заземление, несмотря на эффективность ограничения дуговых перенапряжений, не получило широкого распространения из-за основного недостатка – повышенного тока ОЗЗ. В работе показано, что применение нового импульсного резистивного способа заземления нейтрали позволяет минимизировать негативное влияние активной составляющей тока замыкания на землю и тем самым расширить область применения этого способа заземления.
2. Разработано не имеющее аналогов устройство импульсного резистивного заземления нейтрали, подключающее нейтрале-заземляющий резистор к контуру заземления станции/подстанции только при неустойчивых однофазных дуговых замыканиях, когда  $du_N/dt_{\text{ОДЗ}} > du_N/dt_{\text{УОЗЗ}}$ . ИРЗ сохраняет способность эффективного снижения дуговых перенапряжений и устраняет недостатки постоянного резистивного заземления.
3. Устройство импульсного резистивного заземления нейтрали заметно уменьшает энерговыделение в нейтрале-заземляющем резисторе по отношению к способу его постоянного подключения, снижая технологические потери и требование к мощности самого резистора. Уменьшение тока замыкания в установившемся режиме замыкания способствует снижению его разрушающего воздействия на изоляцию и провода, а также повышает электробезопасность ЭС.
4. Производная напряжения в нейтрали ( $du_N/dt$ ), зависящая от параметров сети (мощности источника, нагрузки, протяженности линий) и в значительной степени от удаленности замыкания от центра питания, для подавляющего большинства ЭС достаточна для уверенного запуска устройств ИРЗ.
5. Разработаны методики приближенной оценки значения производной напряжения на нейтрали ЭС при замыканиях на землю. Импульс напряжения НП на нейтрали ЭС на первом этапе замыкания рассчитывается посредством определения его затухания на подстанциях и расчёта увеличения длительности его фронта в

процессе распространения импульса напряжения к центру питания от места замыкания; далее высокочастотная составляющая производной  $du_N/dt$  рассчитывается решением несложных дифференциальных уравнений для контура второго порядка, включающего ДЗЦ. Низкочастотная составляющая производной на втором этапе замыкания рассчитывается на основе несложно определяемых частоты и амплитуды свободных перезарядных колебаний. Оценка возможности работы ИРЗ оценивается по обоим производным.

6. Разработана и изготовлена низковольтная физическая модель сети с различными способами заземления нейтрали, позволившая апробировать импульсно резистивный способ заземления. В модель сети заложены классические теории горения перемежающейся дуги по Петерсену и Петерсу и Слепяну. Эта физическая модель ЭС используется в учебном процессе при подготовке магистров по специальности «Техника высоких напряжений».

7. Разработаны компьютерные модели распределительных электрических сетей с импульсно резистивным заземлением, позволяющие исследовать переходные процессы, происходящие как в ЭС, так и самих устройствах ИРЗ. Лабораторные эксперименты подтверждают адекватность поведения всех элементов модели: полупроводниковых ключей, нелинейных элементов (варисторов, запускающего трансформатора и пр.).

8. Предложен новый способ глубокого ограничения дуговых перенапряжений в распределительных сетях среднего класса напряжения с неэффективным заземлением нейтрали. Работа устройств глубокого ограничения ДП рекомендуется одновременно с устройствами ИРЗ, устанавливаемыми в ЭС. Применение таких устройств позволяет кратковременно и контролируемо ограничивать ДП вплоть до уровня  $1.8U_{ф.м.}$ . В устройстве глубокого ограничения целесообразно применять предложенный составной ОПН.

9. В системе управления устройством глубокого ограничения должна обеспечиваться минимальная длительность отпирающего импульса ( $t_{отп}$ ), обеспечивающего надежное открытие составного симисторного ключа: значение  $t_{отп}$  должно быть соизмеримо или превышать полупериод свободных перезарядных колебаний, т.е.  $t_{отп} \geq \pi/\beta_1$ .

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

В настоящей кандидатской диссертации применяются следующие сокращения.

<b>СН</b>	-	среднее напряжение
<b>ЭС</b>	-	электрическая сеть
<b>ТН</b>	-	трансформатор напряжения
<b>ДГК</b>	-	дугогасящая катушка
<b>ДГР</b>	-	дугогасящий реактор
<b>ОДЗ</b>	-	однофазное дуговое замыкание
<b>ИРЗ</b>	-	импульсно-резистивное заземление
<b>УГО (ГО)</b>	-	устройство глубокого ограничения
<b>ОПН</b>	-	ограничитель перенапряжений нелинейный
<b>НП</b>	-	нулевая последовательность
<b>ДЗЦ</b>	-	дифференцирующая запуская цепь
<b>ПС</b>	-	подстанция
<b>ЕТЗЗ</b>	-	ёмкостный ток замыкания на землю
<b>ПУЭ</b>	-	правила устройства электроустановок
<b>ПТЭ ЭП</b>	-	правила технической эксплуатации электроустановок потребителей
<b>ТНКИ</b>	-	трансформатор напряжения контроля изоляции
<b>КЗ</b>	-	короткое замыкание
<b>ЗРУ</b>	-	закрытое распределительное устройство
<b>УОЗЗ (ОЗЗ)</b>	-	устойчивое однофазное замыкание на землю
<b>ВЛ</b>	-	воздушная линия
<b>БПИ</b>	-	бумажно пропитанная изоляция
<b>ПЭ</b>	-	полиэтиленовая (изоляция)
<b>НН</b>	-	низкое напряжение
<b>ЦП</b>	-	центр питания
<b>РП</b>	-	распределительный пункт
<b>ЛЭП</b>	-	линия электропередачи
<b>АЦП</b>	-	аналогово-цифровой преобразователь
<b>УА</b>	-	условный анод

<b>УК</b>	-	условный катод
<b>ВАХ</b>	-	вольт-амперная характеристика
<b>ЗТ</b>	-	запускающий трансформатор
<b>УУ</b>	-	устройство управления
<b>РВУ</b>	-	разрядник вакуумный управляемый
<b>ГИТ</b>	-	генератор импульсов тока
<b>ПЭ</b>	-	поджигающий электрод
<b>УЭ</b>	-	управляющий электрод
<b>ЭДС</b>	-	электродвижущая сила
<b>МБТЗ</b>	-	микроконтроллерный блок термозащиты
<b>ДП</b>	-	дуговое перенапряжение
<b>ВЧ</b>	-	высокочастотная (составляющая)
<b>НЧ</b>	-	низкочастотная (составляющая)
<b>R<sub>N</sub></b>	-	нейтрале-заземляющий резистор



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Беляков, Н. Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью [Текст] // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 18–27.
2. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю, включениях и отключениях индуктивных элементов [Текст] / М. В. Костенко, И. М. Богатенков, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. – Москва : ВИНТИ, 1991. – Т. 17. – 105 с. – (Итоги науки и техники. Электрические станции и сети).
3. Petersen, W. Die Begrenzung des Erdschlußstromes und die Unterdrückung des Erdschlußlichtbogens durch die Erdschlußspule [Text] / W. Petersen //ETZ, 40 (1919), H. 1, S. 5-7; 17-19.
4. Рыжкова, Е. Н. О критериях выбора режима резистивного заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ [Текст] / Е. Н. Рыжкова, М. А. Фомин, М. С. Жармагамбетова // Промышленная энергетика. – 2013. – № 11. – С. 23–30.
5. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6 — 35 кВ [Текст] / Сарин Л. И., Ширковец А. И., Ильиных М. В. // Энергетик, - 2009. - № 4. – С. 13-14
6. Джуварлы Ч. М. Вопросы ограничения токов коротких замыканий в электрических сетях [Текст] // Частичное заземление нейтрали в электрических системах через резистор. – Баку: ЭЛМ, 1976. – С. 7-13.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.
8. Пат. 2454769 РФ, МПК Н 02 Н 9/00, Н 02 Н 3/20. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети [Текст] / В. Е. Качесов ; № 2011120203/07 ; заяв. 19.05.2011 ; опубл. 27.06.2012 ; Бюл. № 18.

9. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф. А. Лихачев. – Москва : Энергия, 1971. – 152 с.
10. Заболотников, А. П. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ [Текст] : [монография] / А. П. Заболотников, К. П. Кадомская, А. А. Тихонов ; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1993. – 158 с.
11. Обзор режимов заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / В. А. Бурчевский, Л. В. Владимиров, В. А. Ощепков, В. А. Суриков // Омский научный вестник. – 2009. – № 1. – С. 122–126.
12. Шабад, М. А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей [Текст] / М. А. Шабад. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 296 с.
13. Козлов, В. Н. Дугогасящие реакторы в сетях среднего напряжения. Компенсация емкостных токов замыкания на землю [Электронный ресурс] / В. Н. Козлов, М. Петров // Новости электротехники. – 2012. – № 2 (74). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/74/08.php>. – Загл. с экрана.
14. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Текст] : утв. приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002, № 204. – 7-е изд. – Москва : Омега-Л, 2012. – 272 с.
15. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]. – Москва : НЦ ЭНАС, 2007. – 304 с.
16. Матвеев, Д. А. Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ: теоретические аспекты [Текст] / Д. А. Матвеев, С. И. Хренов // Электричество. – 2015. – № 1. – С. 34–39.
17. Druml, G. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Повышение точности настройки [Электронный ресурс] / G. Druml, A. Kugi, B. Paug // Новости электротехники. – 2007. – № 1 (43). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/08.php>. – Загл. с экрана.
18. Автоматически регулируемые дугогасящие реакторы серии РУОМ [Текст] / Б. И. Базылев, А. М. Брянцев, А. Г. Долгополов [и др.] // Электротехника–2010.

Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000–2010 годах : 5 симпоз. : сб. докл. – Москва, 1999. – Т. 1. – С. 120–124.

19. Качесов, В. Е. Однофазные повреждения в электрических сетях среднего и высокого классов напряжения: теория, методы исследований и меры предотвращения повреждений [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02, 05.14.12 / В. Е. Качесов ; [Место защиты: Том. политехн. ун-т]. – Томск, 2008. – 40 с.
20. Обзор режимов заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / В. А. Бурчевский, Л. В. Владимиров, В. А. Ощепков, В. А. Суриков // Омский научный вестник. – 2009. – № 1 (77). – С. 122–126.
21. Переход к резистивному заземлению нейтрали в сети 6–10 кВ ПАО «Ленэнерго» как шаг на пути к автоматизации [Текст] / И. Кузьмин, Н. Магдеев, Г. Евдокунин, А. Брилинский, О. Грунина // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № S3. – С. 18–25.
22. Опыт эксплуатации резистивного заземления нейтрали сети 10 кВ на ПС «Петродворец» и экспериментальное исследование токов однофазного замыкания на землю [Текст] / Л. А. Кучумов, А. А. Кузнецов, Г. А. Евдокунин, С. С. Титенков, А. Н. Назарычев, С. И. Милютин, Д. П. Червочков, С. П. Суходоев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 6 (45). – С. 78–84.
23. Сирота, И. М. Заземление нейтрали через активное сопротивление в некомпенсированных сетях 6–10 кВ [Текст] / И. М. Сирота, В. В. Назаров, В. В. Масляник // Техническая электродинамика. – 1980. – № 5. – С. 84–91.
24. Целебровский, Ю. В. Области применения различных систем заземления нейтрали [Электронный ресурс] / Ю. В. Целебровский // Новости электротехники. – 2004. – № 5 (29). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/29/04.php>. – Загл. с экрана.
25. Титенков, С. С. 4 режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона [Электронный ресурс] / С. С. Титенков // Новости электротехники. – 2003. – № 5 (23). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/05.php>. – Загл. с экрана.

26. Качесов, В. Е. Импульсно-резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях [Текст] / В. Е. Качесов, Р. А. Финашин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. (18 Бенардосовские чтения), Иваново, 27–29 мая 2015 г. Т. 1. Электроэнергетика. – Иваново : ИГЭУ, 2015. – С. 90–93.
27. Финашин, Р. А. Высоковольтный прототип импульсного резистивного заземления нейтрали [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 183-185.
28. Finashin, R. A. Economic effect of implementing a new method of neutral grounding in medium voltage distribution networks = Экономический эффект от внедрения нового способа заземления нейтрали в распределительных сетях среднего напряжения [Текст] / R. A. Finashin ; sci. ed. V. J. Kachesov // Актуальные проблемы современного общества = Urgent Problems of Modern Society : сб. материалов 13 междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Новосибирск, 17–18 нояб. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 259–263.
29. Финашин, Р. А. Эффективное ограничение дуговых перенапряжений в электрических сетях среднего напряжения 6-35 кВ [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 105–109.
30. Качесов, В. Е. Импульсно-резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях = Pulse-resistive Neutral Grounding in Distribution Networks [Текст] / В. Е. Качесов, Р. А. Финашин // Электричество. – 2017. – № 12. – С. 12–18.
31. Финашин, Р. А. Устройство импульсного резистивного заземления сетей 6-35 кВ [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Энергия–2018 : 13 междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 3–5 апр. 2018 г. : материалы конф. В 6 т. Т. 3. Электроэнергетика. – Иваново : ИГЭУ, 2018. – С. 154.
32. Finashin, R. A. Review of ways to improve reliability of medium voltage distribution networks [Текст] / R. A. Finashin, V. V. Bystrykh ; research adviser V. E. Kachesov

- ; language adviser E. T. Kitova // *Aspire to science* : материалы гор. науч.-практ. конф. школьников, студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 12 апр. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 55–59.
33. Kachesov, V. E. Pulse-resistive neutral grounding of three-phase power network and its physical model [Текст] / V. E. Kachesov, R. A. Finashin, L. I. Tolstobrova // *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018)*. В 8 т. : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 259–263.
  34. Качесов, В. Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением [Текст] / В. Е. Качесов // *Электричество*. – 2005. – № 6. – С. 9–19.
  35. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника [Текст] : [учебник для вузов по направлению подгот. бакалавров и магистров «Биомедицинская инженерия» и по направлению подгот. дипломир. специалистов «Биомедицинская техника»] / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 4-е изд., доп. – Москва : Высш. шк., 2006. – 799 с. : ил. – (Для высших учебных заведений. Электронная техника).
  36. Силовая электроника : примеры и расчеты [Текст] : пер. с англ. / [Ф. Чаки, И. Герман, И. Ипшич и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 382 с.
  37. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции [Текст]. – Взамен ГОСТ 1516.2-76 ; введ. 01.01.1999. – Москва, 1998. – 31 с.
  38. Качесов, В. Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях [Текст] / В. Е. Качесов, В. Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // *Электрические станции*. – 2002. – № 8. – С. 38–45.
  39. Качесов, В. Е. О расчете крутизны перенапряжений на обмотках электрических машин [Текст] / В. Е. Качесов // *Электричество*. – 2009. – № 11. – С. 16–26.
  40. Техника высоких напряжений : Изоляция и перенапряжения в электрических системах [Текст] : учебник для вузов / [В. В. Базуткин и др.] ; под общ. ред. В.

- П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
41. Дьяков, А. Ф. Методические вопросы расчета зависимости продольных параметров кабельных линий от частоты [Текст] / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Д. А. Матвеев // Вестник Московского энергетического института (Вестник МЭИ). – 2003. – № 4. – С. 17.
  42. ТИ 34-70-070-87. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ [Текст] : утв. гл. науч.-техн. упр. энергетики и электрификации СССР 06.06.87 : срок действия с 06.04.88 до 06.04.93. – Москва : Служба передового опыта ПО «Союзтехэнерго», 1988. – 56 с.
  43. Электротехнический справочник [Текст]. [В 3 т.] / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – 7-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – Т. 2. – 711 с.
  44. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] : [учебник для энергет. и электротехн. вузов и фак.]. В 3 ч. / Л. А. Бессонов. – 5-е изд., перераб. и доп. – [Москва : Высш. шк., 1967]. – 755 с.
  45. Сопов, В. И. Электроснабжение нефтегазовых комплексов и производств [Текст] : учеб. пособие / В. И. Сопов, Н. И. Щуров. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 269 с. : ил.
  46. Гринев, А. С. Определение емкостных параметров силовых трансформаторов для анализа передачи (трансформации) импульса перенапряжения = Determining the capacity parameters of power transformers to analyze the transmission (transformation) of the overvoltage impulse [Текст] / А. С. Гринев, А. А. Беляков // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2013. – № 5-6 (15-16). – С. 68–76.
  47. Голдобин, Д. А. Мониторинг перенапряжений в распределительных кабельных сетях [Текст] / Д. А. Голдобин, В. Е. Качесов, В. Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 1998. – № 2 (5). – С. 109–116.
  48. Marti, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations [Text] / J. R. Marti // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. PAS-101, iss. 1. – P. 147–157.

49. Gustavsen, B. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting [Text] / B. Gustavsen, A. Semlyen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, iss. 3. – P. 1052–1061.
50. Semlyen, A. Analysis of disturbance propagation in power systems based on a homogeneous dynamic model [Text] / A. Semlyen // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1974. – Vol. PAS-93, iss. 2. – P. 676–684
51. Shutovich, A. Y. Development of frequency dependent model for overhead transmission line [Text] / A. Y. Shutovich, language adviser E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Kachesov // Aspire to science : тез. гор. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 106–107.
52. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 2014-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 18 с.
53. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции [Текст]. – Введ. 1999-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1999. – 54 с.
54. Дмитриев, И. Н. Повышение эффективности режимов нейтрали в распределительных сетях от 6 до 35 кВ при подавлении кондуктивной электромагнитной помехи по току замыкания фазы на землю [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / И. Н. Дмитриев ; [место защиты : Новосиб. гос. акад. вод. трансп.]. – Новосибирск, 2009. – 152 с.
55. Исследование процессов при металлических и дуговых ОЗЗ в условиях резистивно-заземленной и изолированной нейтрали в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский» [Текст] / М. В. Ильиных, А. И. Ширковец, А. А. Кузьмин, И. Е. Волокитин // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн.). – 2011. – № S4. – С. 344–360.
56. Пат. 2640033 РФ, МПК Н 02 Н 9/00. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети [Текст] / В. Е. Качесов, Р. А. Финашин ; № 2015155475 ; заяв. 23.12.2015 ; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 36.
57. Пат. 194369 РФ, МПК Н 02 Н 3/20. УСТРОЙСТВО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ [Текст] / В. Е.

- Качесов, Р. А. Финашин ; № 2019118852 ; заяв. 17.06.2019 ; опубл. 09.12.2019, Бюл. № 34;
58. Финашин, Р. А. Низковольтная лабораторная модель сети 6–35 кВ [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Энергия–2018 : 13 междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 3–5 апр. 2018 г. : материалы конф. В 6 т. Т. 3. Электроэнергетика. – Иваново : ИГЭУ, 2018. – С. 155.
59. Финашин, Р. А. Физическая модель импульсно-резистивного заземления нейтрали для распределительной сети [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области : сб. науч. тр. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 158–160.
60. Финашин, Р. А. Модель заземления нейтрали для распределительных сетей [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Материалы 54 международной научной студенческой конференции (МНСК-2016). Энергетика = Proceedings of the 54 international students scientific conference (ISSC-2016). Energetics, Новосибирск, 16–20 апр. 2016 г. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2016. – С. 53.
61. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluß [Text] / W. Petersen // ETZ. – 1917. – Bd. 38. – S. 553–555 ; 564–566.
62. Peters, J. F. Voltage induced by arcing grounds [Text] / J. F. Peters, J. Slepian // AIEE Transactions on power apparatus and systems. – 1923. – Vol. 42. – P. 478–497.
63. Техника высоких напряжений [Текст] : учебник для электротехн. и электроэнергет. специальностей вузов / Д. В. Разевиг, Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов [и др.] ; под общ. ред. Д. В. Разевига – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1976. – 488 с.
64. Беляков, Н. Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью [Текст] / Н. Н. Беляков // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31–36.
65. Беляков, Н. Н. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях [Текст] / Н. Н. Беляков // Электрические станции. – 1953. – № 6. – С. 40–43.



66. Petersen, W. Erdschlussströme in Hochspannungsnetzen [Text] / W. Petersen // Elektrotechnik Z. – 1916. – Bd. 37. – S. 493–512.
67. Разевиг, В. Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. В 4 ч. Вып. 1. Общие сведения. Графический ввод схем [Текст] / В. Д. Разевиг. – Москва : Радио и связь. – 1992. – 70 с.
68. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках [Текст] / М. И. Абрамович, В. М. Бабайлов, В. Е. Либер [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
69. Редди, С. Рама. Основы силовой электроники [Текст] / С. Рама Редди ; пер. с англ. В. В. Масалова ; под ред. Д. П. Приходько. – Москва : Техносфера, 2006. – 288 с. – (Мир электроники).
70. Шуин, В. А. Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ [Текст] / В. А. Шуин // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
71. Винокурова, Т. Ю. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ [Текст] / Т. Ю. Винокурова, Е. С. Шагурина, В. А. Шуин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). – 2013. – Вып. 6. – С. 35–41.
72. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ [Текст] / Ф. А. Гиндуллин, В. Г. Гольдштейн, А. А. Дульзон, Ф. Х. Халилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
73. Вайнштейн, Р. А. Режимы нейтрали в электрических системах [Текст] : учеб. пособие / Р. А. Вайнштейн, С. И. Головкин, Н. В. Коломиец. – Томск : Изд-во ТПИ, 1981. – 79 с.
74. Вайнштейн, Р. А. Физическое моделирование электрических процессов, вызываемых перемежающимися дугowymi замыканиями [Текст] / Р. А. Вайнштейн, С. И. Головкин // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1978. – № 10. – С. 116–120.
75. Сирота, И. М. Заземление нейтрали через активное сопротивление в некомпенсированных сетях 6–35 кВ [Текст] / И. М. Сирота, В. В. Назаров, В. В. Масляник // Техническая электродинамика. – 1980. – № 5. – С. 84–91.

76. Ягудаев, Б. М. Высокоомное заземление нейтрали подземных электрических сетей напряжением 10 кВ [Текст] : сб. науч. тр. / Б. М. Ягудаев, Ю. А. Дикий ; под ред. Ю. А. Дикого. – Донецк : ВНИИВЭ. – 1985. – С. 19–26.
77. Рыжкова, Е. Н. Развитие теории переходных процессов при замыканиях на землю, разработка методов и средств повышения надежности работы электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Е. Н. Рыжкова ; науч. рук. Б. Б. Утегулов ; [место защиты : Моск. энергет. ин-т]. – Павлодар, 2008. – 226 с.
78. Качесов В. Е. Импульсно-резистивный способ заземления нейтрали трехфазной электрической сети и физическая модель, его реализующая [Текст]/В. Е. Качесов, Р. А. Финашин // Электроэнергия. Передача и распределение. - №1(58), - 2020, - С.90-95.
79. A high-capacity triggered vacuum switch with single axial magnetic field electrode [Text] / He Junjia, Zou Jiyan, Qin Shihong, Wang Hai // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35, iss. 1. – P. 352–355.
80. Панкова, В. С. Методика приготовления образцов из «жидкой изолянты» SCOTCH 1601 для исследования ее электрических характеристик [Текст] / В. С. Панкова, И. А. Фомина // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 4. – С. 167–169.
81. Машиностроительные материалы [Текст] : краткий справочник / В. М. Раскатов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1980. – 511 с.
82. Jiles, D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton [Text] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61, iss. 1–2. – P. 48–60.
83. Володин, В. Я. Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи Spice симулятора LTspice/SwCADIII [Текст] / В. Я. Володин // Компоненты и технологии. – 2008. – № 4. – С. 175–182.
84. Бородин, С. М. Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных средств [Текст] : метод. указания к лаб. работам по дисциплине «Проектирование РЭС» для студентов, обучающихся по

- специальности 21020165 направления 200800 «Проектирование и технология электронных средств» / С. М. Бородин. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 52 с.
85. Патент на полезную модель 117738 РФ, H02H9/00. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети [Текст] / В. Е. Качесов, А. Е. Петухов. – № 2011152845/07 ; заявлено 23.12.2011 ; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18.
86. Баранов, М. И. Применение новых вакуумных коммутаторов в силовых цепях мощных высоковольтных электрофизических установок и схемах аварийной защиты силового электрооборудования [Текст] / М. И. Баранов // Электротехника и электромеханика. – 2009. – № 3. – С. 5–10.
87. Сильноточный быстродействующий короткозамыкатель [Текст] / Д. Ф. Алферов, А. И. Будовский, В. П. Иванов [и др.] // Электротехника. – 2003. – № 11. – С. 56–59.
88. Применение управляемых вакуумных разрядников в высоковольтном быстродействующем защитном устройстве [Текст] / Д. Ф. Алферов, Н. В. Матвеев, В. А. Сидоров, Д. А. Хабаров // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 94–101.
89. Новое поколение сильноточных вакуумных управляемых разрядников [Текст] / Д. Ф. Алферов, В. П. Иванов, В. А. Сидоров, В. В. Федоров // Прикладная физика – 2001. – № 4. – С. 41–48.
90. Качесов, В. Е. Исследование разрядных характеристик управляемых вакуумных разрядников [Текст] / В. Е. Качесов, А. Е. Петухов, Р. А. Финашин // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы 2 Рос. молодеж. науч. шк.-конф., Томск, 29–31 окт. 2014 г. – С. 259–261.
91. Шуин, В. А. Централизованное направленное устройство сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов [Текст] / В. А. Шуин, А. В. Гусенков, А. И. Дроздов // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 53–57.
92. Шуин, В. А. Режимы заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, основанные на использовании переходных процессов, в электрических сетях 6–10 кВ [Текст] / В. А. Шуин, А. В. Гусенков // Вестник Ивановского

- государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). – 2001. – Вып. 1. – С. 45–51.
93. Лыков, Ю. Ф. Изолированная нейтраль для надежного электроснабжения нефтепромыслов [Текст] / Ю. Ф. Лыков, К. С. Андреева // Ашировские чтения. – 2016. – Т. 2, № 4-4 (8). – С. 368–371.
94. Кадомская, К. П. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ [Текст] / К. П. Кадомская, А. В. Виштибеев // Электрические станции. – 2003. – № 1. – С. 70–73.
95. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ [Текст] / исп.: Ю. И. Лысков, Н. П. Антонова, О. Ю. Демина [и др.] ; ОАО Ин-т Энергосетьпроект. – Москва : Энергосетьпроект, 1999. – 75 с.
96. Тимофеев, С. А. Основы выбора нелинейных ограничителей перенапряжения [Текст] : метод. указания / С. А. Тимофеев. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. – 50 с.
97. Евсеев, Ю. А. Симисторы и их применение в бытовой электроаппаратуре [Текст] / Ю. А. Евсеев, С. С. Крылов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 120 с.
98. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ [Текст] : метод. и справ. пособие / М. А. Аронов, О. А. Аношин, О. И. Кондратов и др. – Москва : Знак, 2001. – 240 с.
99. Екимук, С. С. Обеспечение надежности эксплуатации кабельных распределительных сетей 6–10 кВ, оснащенных современным электрооборудованием [Электронный ресурс] / С. С. Екимук, К. П. Кадомская // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Режим доступа: <http://static.pnpbolid.com/pdf/V-Conference-2008--12.pdf>. – Загл. с экрана.
100. Матвеев, Д. А. Дугогасящие реакторы серии РУОМ. Преимущества очевидны, недостатки преувеличены [Текст] / Д. А. Матвеев // Новости электротехники. – 2012. – № 5. – С. 48–50.
101. Сивков, А. А. Основы электроснабжения [Текст] : учеб. пособие / А. А. Сивков, Д. Ю. Герасимов, А. С. Сайгаш – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 180 с.

102. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ [Текст] / исп.: Ю. И. Лысков, Н. П. Антонова, О. Ю. Демина [и др.] ; ОАО Ин-т Энергосетьпроект, ОАО ВНИИЭ, НТК «ЭЛ-ПРОЕКТ» при участии ОАО «Институт Теплоэнергопроект». – Москва : Энергосетьпроект, 2001. – 75 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И НАСТРОЙКА  
УСТРОЙСТВА ИМПУЛЬСНОГО РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ  
ПРИЛОЖЕНИЕ А.1 Изготовление вторичной высоковольтной обмотки  
запускающего трансформатора**

Катушка ЗТ состоит из 12 изолированных друг от друга обмоток, намотанных на специальном каркасе.

Каркасы вторичных катушек запускающих трансформаторов спроектированы в программе AutoCAD (рисунок А.1), а затем изготовлены на 3D принтере. Их внешний вид приведен на рисунке А.2. Возможности 3D печати позволили сделать их компактными и функциональными. Материал катушек – полилактид (термопластиченый, алифатический полиэфир). Он является хорошим диэлектриком и обладает необходимой механической прочностью.

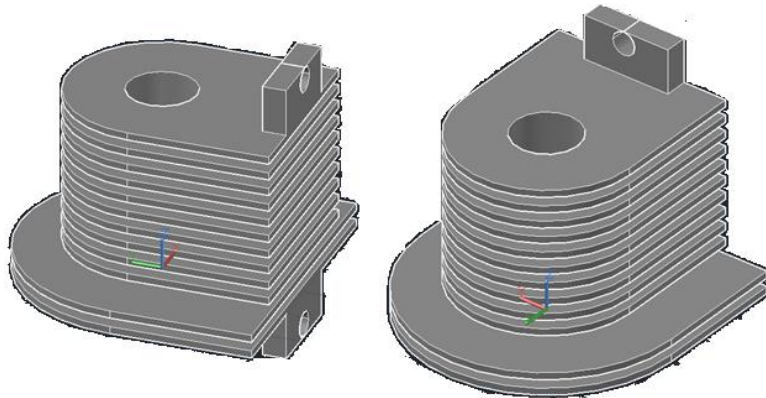


Рисунок А.1 - Компьютерная 3-D модель каркаса вторичной обмотки трансформатора



Рисунок А.2 - Каркасы вторичных обмоток управляющих трансформаторов

## ПРИЛОЖЕНИЕ А.2 Определение кривой намагничивания трансформатора

Опыт по снятию кривой намагничивания магнитопровода ЗТ производился с использованием заводской первичной обмотки трансформатора, содержащей 1200 витков, и вторичной обмотки, содержащей 100 витков. На рисунке А.3, приведена схема лабораторной установки для снятия кривой намагничивания, фотография лабораторной установки изображена на рисунке А.4.

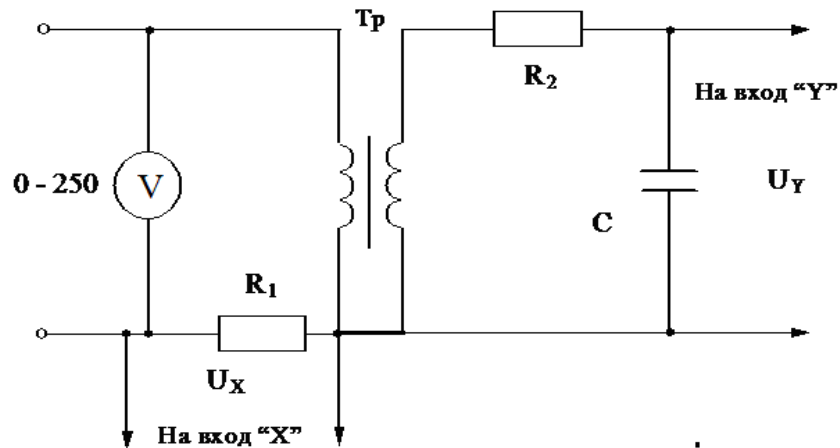


Рисунок А.3 - Схема лабораторной установки ( $R_1$  – токовый шунт,  $R_1, C$  – интегрирующая цепь)

В качестве источника напряжения использовался ЛАТР (лабораторный автотрансформатор), подключённый к бытовой сети.

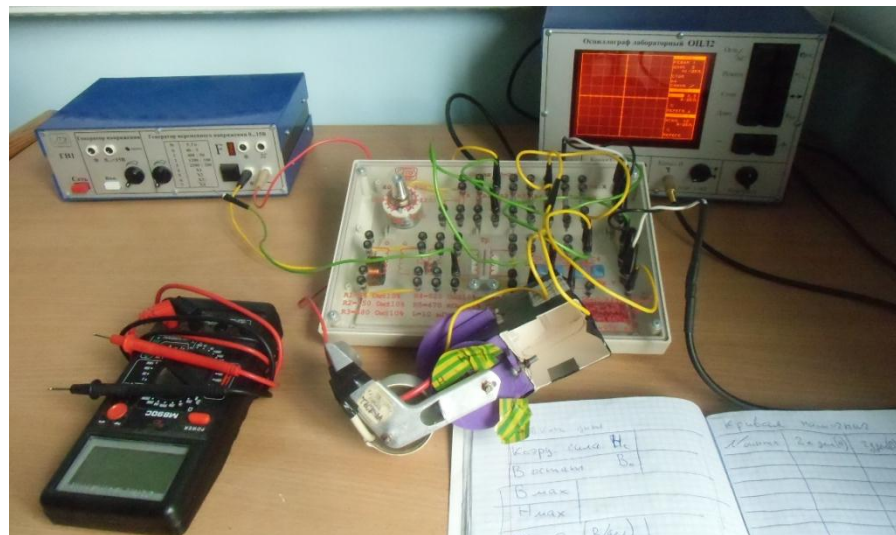


Рисунок А.4 - Фотография лабораторной установки

Кривая намагничивания, полученная в опыте, показана на рисунке А.5. На основе результатов измерений найдены напряжённость и магнитная индукция в магнитопроводе. Напряжённость магнитного поля  $H$  (А/м) рассчитывается по формуле (А.1):

$$H = \frac{n_1 \alpha_x X}{l R_1}, \quad (\text{А.1})$$

где  $l$  – длина средней магнитной линии магнитопровода,  $\alpha_x$  – чувствительность по оси «Х»  $R_1$  – сопротивление делителя,  $n_1$  – количество витков первичной обмотки,  $X$  – количество делений осциллографа по горизонтали.

Магнитная индукция (Тл) рассчитывается по формуле (А.2):

$$B = \frac{c \alpha_y R_2 Y}{n_2 S}, \quad (\text{А.2})$$

где  $n_2$  – количество витков вторичной обмотки,  $\alpha_y$  – чувствительность по оси «Y»,  $Y$  – количество делений осциллографа по вертикали,  $S$  – сечение магнитопровода.

Определена зависимость  $B(H)$  и для удобства сравнения с результатами, получаемыми в PSPICE, параметры переведены в Гауссы и Эрстеды (рисунок А.5). Результаты представлены в табличном виде в таблице А.1.

Таблица А.1 - Зависимость  $B(H)$

№	$X$	$Y$	$H$ (Эрстеды)	$B$ (Гаусс)
1	1	1,7	2,74	889
2	1,5	2,5	8,23	1310
3	2	3	10,9	1570
4	2,5	3,2	13,7	1670
5	3	3,4	16,4	1770
6	3,5	3,5	19,2	1830
7	4	3,55	21,9	1850



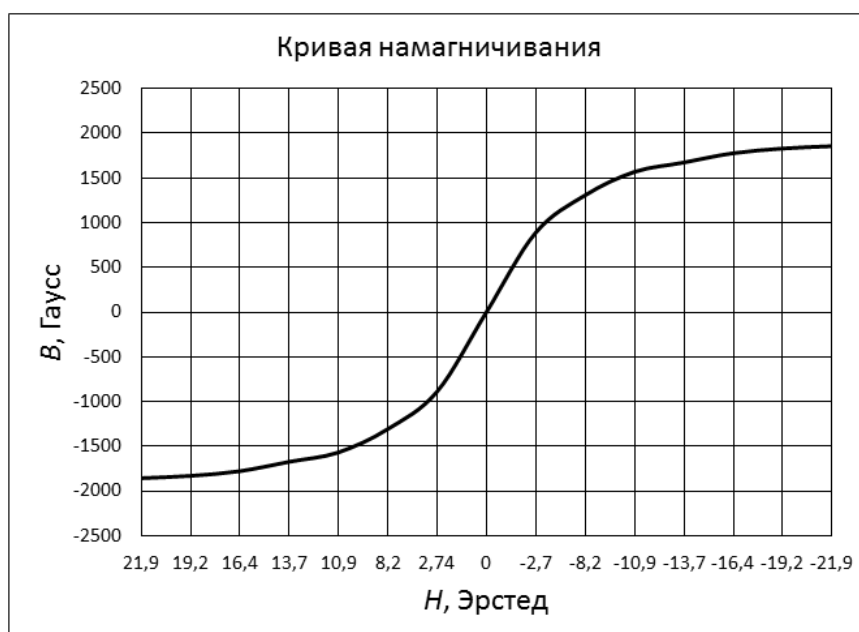


Рисунок А.5 - Экспериментальная кривая намагничивания магнитопровода ЗТ

Для создания компьютерной модели установки импульсно-резистивного заземления разработана модель импульсного запускающего трансформатора, которая приведена на рисунке А.6.

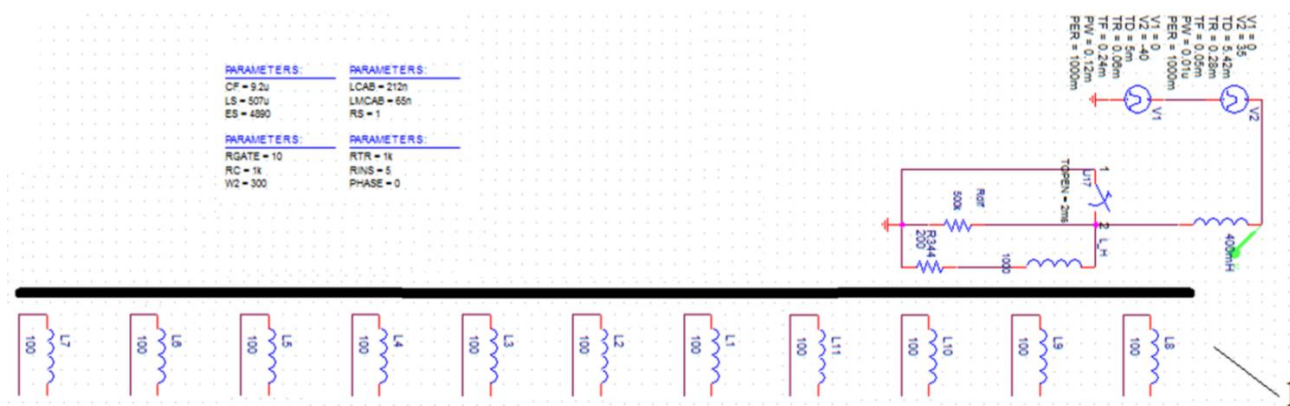


Рисунок А.6 - Компьютерная модель запускающего трансформатора с 12 обмотками

Модель сердечника в используемом схемотехническом программном комплексе построена на уравнениях Джилса–Атертона [81]. Она характеризуется параметрами:

*AREA* – площадь поперечного сечения магнитопровода;

*PATH* – средняя длина магнитопровода;

*MS* – намагниченность насыщения;

$A$  – параметр формы безгистерезисной кривой намагниченности;

$C$  – постоянная упругого смещения доменных границ;

$K$  – постоянная подвижности доменов.

Посредством редактора моделей, геометрических параметров магнитопровода и последующего численного эксперимента получены выше указанные параметры модели сердечника.

### ПРИЛОЖЕНИЕ А.3 Разброс времен включения симисторов

Для определения времени задержки включения каждого из симисторов была собрана опытная установка. В качестве измерительного оборудования использовался 6-ти канальный осциллограф Yokogawa DL-750. Схема лабораторной установки, изображенная на рисунке А.7, включала в себя генератор импульсов напряжения (ГИ) Г6-34, транзисторный усилитель, блок батарей, удвоитель напряжения, набор из 14 симисторов.

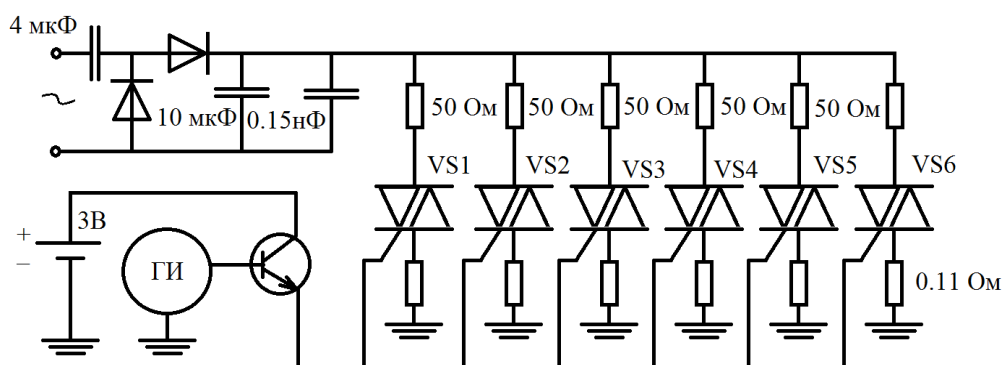


Рисунок А.7 - Схема лабораторной установки

На рисунке А.8 приведены осциллограммы напряжения на токовых шунтах симисторов. Составной ключ из группы параллельно включённых 6 симисторов, производил разряд конденсаторной батареи, заряженной до напряжения 300 В. При одновременной подаче запускающего импульса на симисторы их открытие происходит не одновременно, а с неким временным разбросом. Для запускающего ключа выбраны симисторы с минимальным разбросом по времени включения. Это симисторы с номерами: 1,3,4,6,7,8,9,10,11,13.

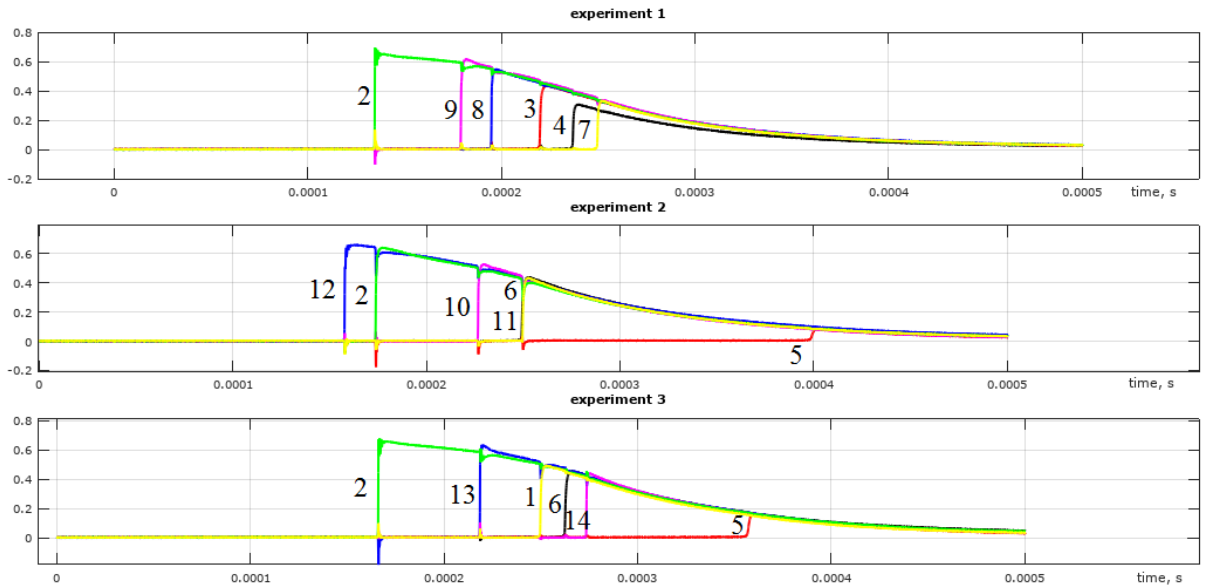


Рисунок А.8 – Осциллограммы токов симисторов. Серия из 3-х опытов, осциллограммы тока, анод-катод, симисторы пронумерованы

Результаты опыта воспроизведены в компьютерной модели, которая показана на рисунке А.9. Компьютерные осциллограммы токов симисторов аналогичные экспериментальным представлены на рисунке А.10.

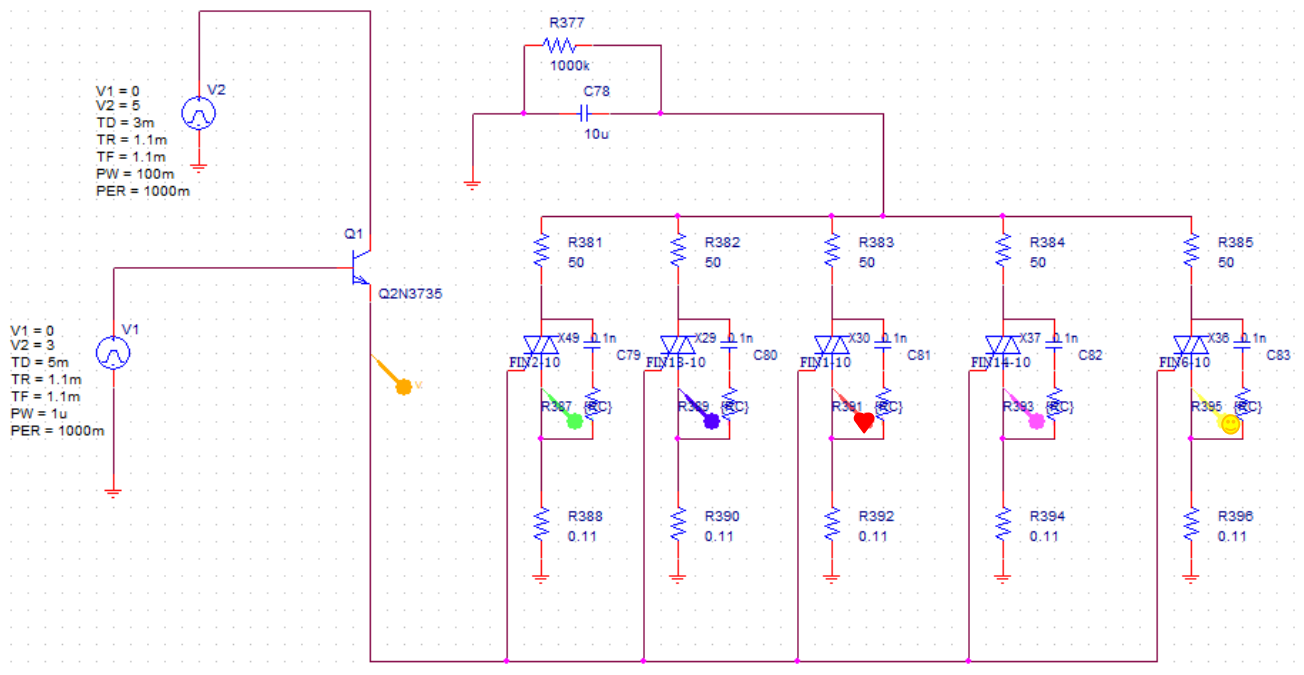


Рисунок А.9 - Компьютерная модель эксперимента

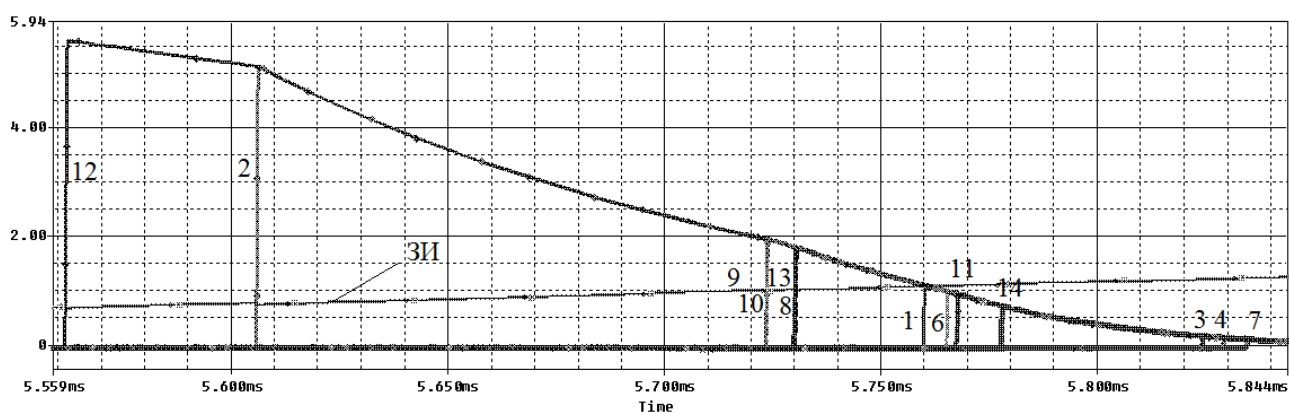


Рисунок А.10 - Осциллограмма времен срабатывания симисторов от 1-го до 14-го (за исключением 5-го), ЗИ – запускающий импульс

#### ПРИЛОЖЕНИЕ А.4 Изготовление и тестирование драйвера управления

Изготовление устройства управления проходило в несколько этапов:

- компьютерное моделирование;
- изготовление печатной платы;
- монтаж микроэлементов и комплектующих;
- настройка устройства управления и его испытание.

Изготовление печатной платы и сборка УУ производилось вручную. Упрощенная схема устройства управления приведена на рисунке А.11. При скачкообразном изменении напряжения на нейтрали  $u_N$  на выходе ДЗЦ (6) формируется импульс напряжения, который поступает на одновибратор (8), генерирующий импульс запуска. Выходное напряжение одновибратора управляет транзисторным ключом (5). Транзисторы-ключи возбуждают первичные обмотки ЗТ (1). Импульсы напряжения, поступающие со вторичной обмотки ЗТ (3), управляют составным симисторным ключом (4).

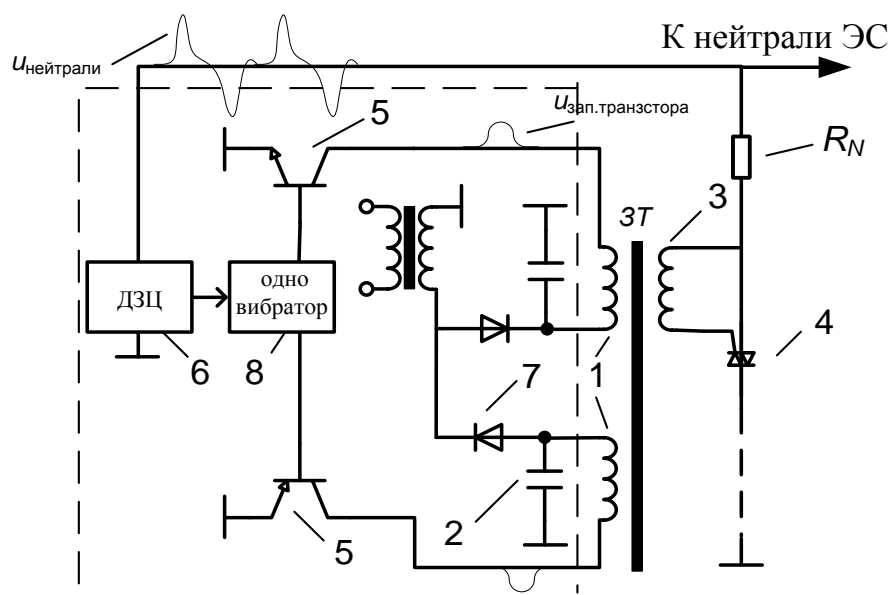


Рисунок А.11 - Упрощенная схема УУ выделенная пунктиром: 1 – первичные обмотки запускающего трансформатора; 2 – разрядные конденсаторы; 3 – вторичная обмотка; 4 – блок симисторов; 5 – транзисторы ключи; 6 – ДЗЦ; 7 – согласующие диоды; 8 – одновибратор

На первом этапе настройка УУ выполнялась виртуально на компьютерной модели. Примерные формы сигналов в УУ показаны на рисунке А.12. Верификация настройки реального УУ производилась с помощью генератора импульсов и осциллографа путем снятия осциллограмм напряжений в контрольных точках устройства.

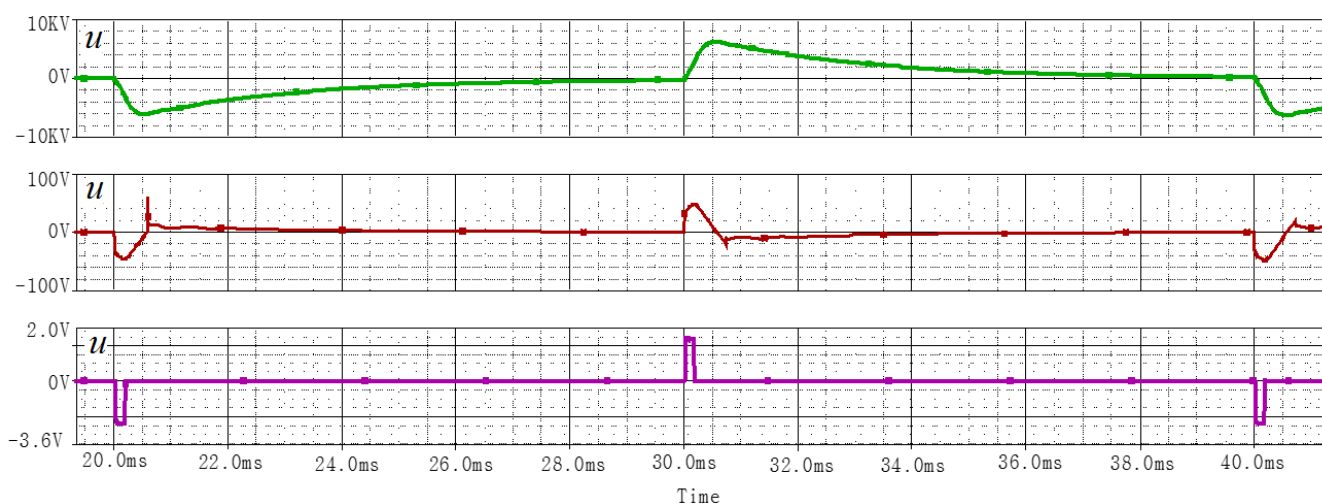


Рисунок А.12 – Расчётные осциллограммы сигналов (сверху вниз): напряжение на нейтрали сети при ОДЗ; выходной сигнал с ДЗЦ, напряжение поступающее на транзисторные ключи

На рисунке А.13 а, б приведены осциллограммы времен включения симисторного ключа (испытания на низком напряжении) на отрицательной (рисунок А.13, а) и положительной (рисунок А.13, б) полярностях. Разница во временах включения объясняется отличием чувствительности симистора при его работе в I и III квадрантах.

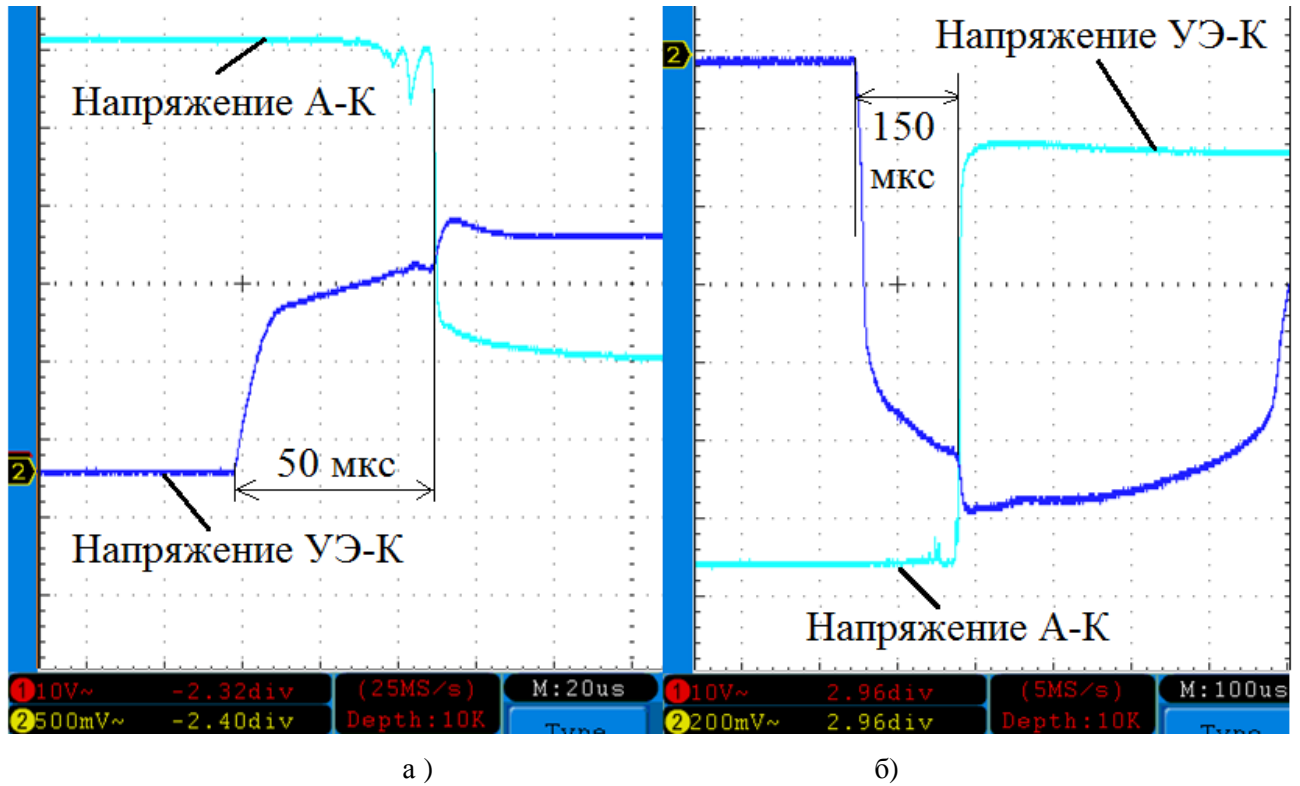


Рисунок А.13 - Времена включения симисторного ключа: (а) - при отрицательной полярности импульса на управляющем электроде; (б) - при положительной;

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ И ПРОТОКОЛ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе НГТУ,  
Профессор, доктор технических наук

\_\_\_\_\_ С. В. Брованов  
« 30 » « Октябрь » 2019 г.



**АКТ**

**внедрения научных результатов диссертационной работы  
Финашина Р.А. в учебный процесс Новосибирского государственного  
технического университета**

Содержащиеся в диссертации результаты научных исследований Р.А. Финашина, использованы при разработке: лабораторного практикума, оснащенного специализированным лабораторным оборудованием для исследования электрофизических переходных процессов при дуговых замыканиях в электрических сетях среднего напряжения (6-35 кВ). Указанные разработки составляют основу учебно-методического комплекса под общим названием «Техника высоких напряжений». С 2017 года результаты диссертационной работы Финашина Р.А. внедрены в учебный процесс на кафедре «Техники и электрофизики высоких напряжений» НГТУ в виде лабораторного стенда и используются при подготовке магистров специальности 13.06.01 «Техника высоких напряжений», аспирантов научной специальности 05.14.12 «Техника высоких напряжений».

Заведующий кафедрой ТЭВН,

доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_

Ю.А. Лавров



**МЭРИЯ**  
**города Новосибирска**  
 ДЕПАРТАМЕНТ ЭНЕРГЕТИКИ,  
 ЖИЛИЩНОГО И КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА ГОРОДА  
**КОМИТЕТ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ**

ул. Трудовая, 1  
 г. Новосибирск, 630099  
 тел. (383) 228-88-03, факс (383) 228-88-10

**ПРОТОКОЛ**  
 Рабочей встречи  
 г. Новосибирск

15.05.2019		14.00	
Присутствовали:	Зайков Д. В.	-	заместитель председателя комитета по энергетике мэрии города Новосибирска;
	Трифонов Д. В.	-	Консультант комитета по энергетике
	Суковатов И. М.	-	Представитель АО «РЭС»;
	Бородин А. Н.	-	Представитель МУП «Электросеть»;
	Качесов В. Е.	-	Представитель НГТУ
	Финашин Р. А.	-	Представитель НГТУ

ПОВЕСТКА ДНЯ:

Рассмотрение научной разработки на тему: «Устройство импульсного резистивного заземления нейтрали 3-х фазной электрической сети».

СЛУШАЛИ:

Аспиранта НГТУ Финашина Р. А. – особенности разработки, технические характеристики устройства, область применения.

ОТМЕТИЛИ:

Данная разработка ранее была номинирована на грант мэрии города Новосибирска.

Материалы по данной разработке целесообразно направить на рассмотрение технического совета АО «РЭС» и ОАО «РЖД».

РЕШИЛИ:

**1. Комитету по энергетике мэрии города Новосибирска:**

Направить материалы по данной разработке в УЭиВ и ОАО «РЖД».

**2. Рекомендовать АО «РЭС» рассмотреть разработку на техническом совете.**

Заместитель председателя комитета по энергетике мэрии города Новосибирска

  
 Д. В. Зайков