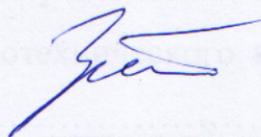


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



На правах рукописи

УДК 004.3: 621.3.015.3: 621.316.7

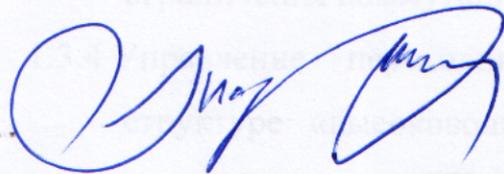
**Золотарев Евгений Владимирович**

**ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОЦЕССОМ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В  
ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ УЧАСТКА ШАХТЫ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

**Диссертация**

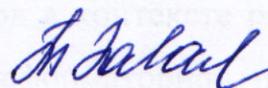
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Маренич Константин Николаевич

Идентичность всех экземпляров  
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ  
Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 01.024.04 канд. техн. наук доцент



 Т.В. Завадская

Донецк – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	15
1.1 Специфика функционирования участковой трансформаторной подстанции в структуре электротехнического комплекса участка шахты .....	15
1.2 Коммутационные перенапряжения как фактор воздействия на ресурс электротехнического оборудования рудничной трансформаторной подстанции .....	25
1.3 Аналитический обзор исследований и разработок в области подавления перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» .....	32
1.3.1 Воздействие на волну коммутационного импульса, как способ ограничения коммутационных перенапряжений ....	37
1.3.2 Анализ возможностей защиты трансформатора от коммутационных перенапряжений путем совершенствования конструкции коммутационного аппарата подстанции .....	45
1.3.3 Управление коммутацией фазных обмоток высшего напряжения трансформатора подстанции, как фактор ограничения коммутационных перенапряжений .....	47
1.3.4 Управление переходным колебательным процессом в структуре «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», как способ воздействия на коммутационные перенапряжения .....	50
1.4 Обзор исследований и разработок в области автоматизации технологических объектов и процессов в контексте расширения функций и повышения ресурса трансформаторной подстанции участка шахты .....	51

1.5 Выводы по главе 1. Обоснование цели и задач исследования .....	57
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ, ОСНАЩЁННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ КОММУТАЦИОННЫМ АППАРАТОМ .....	60
2.1 Обоснование программы и методики экспериментальных исследований .....	60
2.2 Разработка схемы и компоновки исследовательского стенда .....	62
2.3 Исследование коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в условиях применения различных средств ограничения перенапряжений .....	65
2.4 Оценка эффективности известных способов и средств ограничения перенапряжений применительно к комплексу «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» ...	71
2.5 Обоснование исходных данных для исследования коммутационных процессов в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» методами математического моделирования .....	82
2.6 Выводы по главе 2 .....	84
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СПОСОБОВ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В КОМПЛЕКСЕ «ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КОММУТАЦИОННЫЙ АППАРАТ - ТРАНСФОРМАТОР» МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	86
3.1 Обоснование структуры и параметров математической и компьютерной модели объекта исследования .....	86
3.2 Исследование объекта методами моделирования и анализ полученных результатов .....	95

3.3	Обоснование способов усовершенствования технических средств подавления коммутационных перенапряжений на основе управляемой коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора подстанции ...	101
3.4	Исследование процесса формирования и ограничения коммутационных перенапряжений комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в условиях применения управляемо-коммутируемых элементов шунтирования обмоток трансформатора .....	107
3.5	Выводы по главе 3 .....	111
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ .....		113
4.1	Обоснование схемных и компоновочных решений в области реализации способов управления процессом подавления перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной комплектной трансформаторной подстанции .....	113
4.2	Техническая реализация функции автоматической синхронизации коммутаций .....	124
4.2.1	Разработка структуры и алгоритма функционирования устройства управления коммутатором шунтирующих сопротивлений обмоток низшего напряжения трансформатора подстанции .....	124
4.2.2	Разработка структуры и алгоритма функционирования устройства управления коммутатором активно-реактивных цепей обмоток высшего напряжения трансформатора подстанции .....	129
4.3	Обоснование и разработка общей электрической схемы системы автоматического ограничения коммутационных перенапряжений	

трансформаторной подстанции .....	136
4.4 Выводы по главе 4 .....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	142
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ А Копии документов о внедрении результатов исследований .....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Копия акта обследования трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2 зав.№001 от 20.09.2010 г. ....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ В Копия акта обследования трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2 зав.№001 от 08.10.2010 г. ....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты измерений амплитуд коммутационных перенапряжений .....	168

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Участковые комплектные трансформаторные подстанции (КТП) как одно из ключевых звеньев в структуре электротехнических комплексов угольной шахты в значительной мере определяют надежность и бесперебойность функционирования технологических участков, а также безопасность персонала при эксплуатации электрооборудования. В свою очередь, надежная работа участковой КТП определяется параметрами защиты её силового трансформатора от опасных (аварийных) состояний. В этой связи особый практический интерес представляет направление совершенствования структуры шахтной участковой КТП на основе применения высоковольтных коммутационных аппаратов (ВКА) в цепи первичной (высоковольтной) обмотки её трансформатора. Такой подход позволяет существенно повысить быстрдействие защитного отключения силового присоединения при возникновении аварийных (опасных) состояний, расширить функциональность подстанции, рационализировать применение и структуру схем присоединений высоковольтных комплектных распределительных устройств.

Однако, в ходе опытно-промышленной эксплуатации образцов таких подстанций был выявлен повторяющийся негативный фактор – множественный пробой изоляции первичной обмотки трансформатора с последующим повышением интенсивности её повреждения электрической дугой воздушном промежутке на металлический корпус КТП, что явилось следствием возникновения коммутационных перенапряжений в процессе эксплуатации высоковольтных коммутационных аппаратов. Учитывая массовый, повторяющийся характер такого вида повреждения, представляется логичным сделать вывод о функциональной недостаточности штатных средств подавления коммутационных перенапряжений (поставляемых совместно с ВКА) при их размещении в конструкции рудничной взрывонепроницаемой оболочки шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции, а именно, – в непосредственной близости от силового трансформатора высокой мощности, обмотки которого обладают

значительной нелинейной индуктивностью и малой собственной емкостью. Поэтому разработка эффективных средств подавления коммутационных перенапряжений для условий функционирования КТП с ВКА в цепи первичной обмотки трансформатора является актуальной научно-практической задачей.

### **Степень разработанности темы.**

Современные шахтные участковые электротехнические комплексы содержат в своей структуре различные по назначению элементы, функции которых обоснованы в исследованиях Г.Г. Пивняка, Ф.П. Шкрабца, С.А. Волотковского (общие подходы к построению систем электроснабжения горного предприятия), Р.М. Лейбова, В.С. Дзюбана, В.П. Колосюка, Е.А. Вареника (защита от утечек тока на землю), Я.С. Римана, В.К. Житникова, В.Н. Савицкого (максимальные токовые защиты и защиты от токовых перегрузок электроустановок). Комплексное решение вопросов в отношении научного обоснования концепции построения шахтных участковых КТП при условии размещения трансформатора высокой мощности в рудничной взрывонепроницаемой оболочке принадлежит И.Я. Чернову. Развитием этого направления явились исследования в отношении возможности применения ВКА в структуре КТП на стороне подключения первичной обмотки трансформатора. В этой связи актуальны исследования специфики проявления коммутационных перенапряжений при эксплуатации вакуумных и элегазовых коммутационных аппаратов в отношении воздействия на электрическую изоляцию электрооборудования, выполненные для электрических сетей 6(10) кВ: А.Г. Мнухиным, Г.А. Евдокуниным, М. Popov, R. Smeets, К.П. Кадомской, М.А. Нагорным и др.

В частности, исследованием М. Devgan установлен, негативный характер воздействия на изоляцию силовых электрических проводников со стороны коммутационных перенапряжений при работе ВКА. Рассмотрена специфика проявления высокочастотных составляющих параметров переходного коммутационного процесса и установлена функциональная неэффективность нелинейных ограничителей напряжения (ОПН).

Общие выводы о потенциальной пригодности применения RC-цепи в сочетании с нелинейным ограничителем перенапряжений в структуре схем подстанций с ВКА содержатся в исследованиях А.Г. Гарганеева и Д.Е. Шевцова. Однако здесь не рассматривается специфика применения комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат-трансформатор» непосредственно в конструкции КТП с учётом влияния на процесс нелинейных реактивных параметров, образуемых обмотками трансформатора и конструкцией оболочки подстанции.

В исследованиях Е.В. Гавриловой, И.А. Лебедева, доказывається, что применение нелинейных ограничителей перенапряжений не позволяет ограничить опасные для электрической изоляции высокочастотные перенапряжения, проявляющиеся в коммутируемых при помощи вакуумной техники, ненагруженных трансформаторах. Поэтому использование ОПН в таких системах не может быть отнесено к эффективным техническим решениям.

Известные исследования в области автоматизации горно-технологических объектов и процессов, в т.ч. автоматизации рудничных электротехнических установок не охватывают область управления техническими средствами ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной КТП.

Таким образом, известными исследованиями выявлена и доказана потенциальная опасность разрушительного действия коммутационных перенапряжений относительно обмоток силовых трансформаторов высокой мощности шахтных участковых трансформаторных подстанций. Отсутствие научных результатов и технических решений в области адаптации высоковольтных коммутационных аппаратов к условиям безаварийного применения в структуре шахтных участковых КТП обуславливает необходимость проведения комплексных исследований по данной проблематике.

#### **Цель и задачи исследования.**

**Цель** исследования – совершенствование системы управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты

посредством научного обоснования структур, алгоритмов функционирования и практической реализации технических средств, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор».

Для достижения этой цели должны быть решены следующие **задачи**:

- анализ проблемных вопросов эксплуатации шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции, оснащенной высоковольтным коммутационным аппаратом, встроенным в распределительное устройство высшего напряжения;

- исследование свойств коммутационных процессов, возникающих в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», в том числе, при использовании применяющихся в промышленности технических средств ограничения перенапряжений;

- обоснование способа снижения коммутационного перенапряжения в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» на основе управляемого шунтирования обмоток силового трансформатора шахтной участковой трансформаторной подстанции активными и активно-реактивными сопротивлениями на интервале существования коммутационного процесса;

- разработка исследовательских стендов, программ, методики и выполнение экспериментальных исследований коммутационных процессов в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции, в том числе при использовании обоснованных способов управляемого шунтирования обмоток трансформатора активными и активно-реактивными сопротивлениями;

- алгоритмизация процесса и разработка схемных решений управляемого ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются процессы, протекающие в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат –

трансформатор» шахтной комплектной трансформаторной подстанции, обусловленные коммутацией в цепи обмотки высшего напряжения и электродинамическими свойствами трансформатора.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются принципы построения и алгоритмы функционирования устройств ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель коммутационного процесса в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», отличающаяся учётом электродинамических свойств трансформатора в условиях коммутации его обмоток, а также учётом свойств технических средств воздействия на амплитуды коммутационных импульсов, основанных на коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора, что позволило обосновать способ снижения коммутационных перенапряжений, параметры и алгоритмы управления техническими средствами его реализации.

2. Впервые обоснована структура и алгоритм функционирования технического средства подавления коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», основанные на применении управляемой коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора, синхронизированной с состояниями силовых коммутационных устройств и адаптированной к функциональным параметрам средств управления и защиты подстанции, что позволило исключить воздействие коммутационных перенапряжений на ресурс изоляции, что послужило дальнейшим развитием методики управления процессами коммутации комплектной трансформаторной подстанции, и обусловило возможность безаварийного применения высоковольтных коммутационных аппаратов в цепи обмотки высшего напряжения трансформатора.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость результатов работы заключается:

- в раскрытии закономерностей формирования коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в условиях воздействия электродинамических параметров трансформатора;

- в обосновании способа ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в виде управляемого шунтирования обмоток трансформатора активными и активно-реактивными сопротивлениями в интервале существования коммутационного процесса.

Практическое значение результатов исследований состоит:

- в обосновании структуры и алгоритмов функционирования технических средств ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции;

- в обеспечении возможности эксплуатации комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в структуре шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции на основе применения управляемых технических средств ограничения коммутационных перенапряжений;

- в создании технических средств ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» на основе управления процессом коммутации активных и активно-реактивных цепей шунтирования обмоток трансформатора.

**Методология и методы исследований.** Исследования выполнены с использованием: основных положений электротехники; теории переходных процессов; теории эксперимента, включая проведение натуральных экспериментов и применения методов систематизации; теории автоматического управления процессами и объектами; метода математического и компьютерного

моделирования; использования в условиях эксперимента цифровых измерительных устройств.

### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Установлено, что необходимым и достаточным средством ограничения на допустимом уровне коммутационного перенапряжения в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции в условиях воздействия реактивных параметров, образуемых обмотками трансформатора и элементами конструкции её корпуса, являются активные и активно-реактивные цепи шунтирования обмоток трансформатора, подключаемые в соответствии с алгоритмом управляемой коммутации.

2. Доказано и сформулировано в концепции совершенствования метода управления процессом коммутации в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции, что определение структуры, параметров и алгоритмов функционирования технических средств ограничения коммутационных перенапряжений может быть осуществлено при условии учёта электродинамических свойств трансформатора и воздействия на процесс реактивных параметров, образуемых его обмотками и элементами корпуса подстанции.

3. Установлено, что ограничительная функция устройства подавления коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции может быть реализована при условии синхронизации процесса коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора с состояниями силовых коммутационных устройств подстанции и адаптации к функциональным параметрам средств её управления и защиты.

Результаты диссертационного исследования в области развития теории и совершенствования технических средств ограничения коммутационных

перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции использованы в научно-исследовательской работе ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ», г. Донецк) по теме: «Проведение исследований коммутационных перенапряжений во взрывозащищённых комплектных трансформаторных подстанциях с высоковольтными коммутационными аппаратами и разработка технических предложений по их снижению», выполняемой в соответствии с планом научно-исследовательских работ ГУ «НИИВЭ» на 2020 – 2021 гг.

Полученные результаты признаны актуальными на ГП «Донецкий энергозавод» и приняты к внедрению при проектировании и производстве шахтных комплектных трансформаторных подстанций перспективных серий.

Личный вклад соискателя. Все разделы и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и её реализации, в разработке испытательных стендов, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и сопоставлении их результатов.

#### **Степень достоверности и апробация результатов работы.**

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами математического моделирования и натуральных экспериментов при решении поставленных задач.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки), в частности: п. 3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП)»; п.15 «Теоретические

основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСПП и др.).

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертации докладывались, обсуждались и одобрены на: XX Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, ДонНТУ, 2020 г.); IX Международной научно-практической конференции «Наука, техника, инновации» (Усинск, филиал УГТУ, 2019 г.); заседании круглого стола по теме «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах» (ГУ «МакНИИ», 2019 г.) в рамках V Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»; XVII Всероссийской конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (Таганрог, ЮФУ, 2019 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них, 5 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 3 – в материалах конференций, 2 – в других изданиях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста и состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы и 4 приложений на 16 страницах. Работа иллюстрирована 57 рисунками, содержит 16 таблиц. Список литературы включает 112 источников.

## ГЛАВА 1

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Специфика функционирования участковой трансформаторной подстанции в структуре электротехнического комплекса участка шахты

Эффективное функционирование систем электроснабжения угольных шахт и, в частности, их технологических участков в значительной степени определяется надежностью, функциональностью применяемого силового электрогенерирующего, преобразовательного, распределительного и коммутационного электрооборудования. В этой связи важнейшую роль в структуре электротехнического комплекса участка шахты играет комплектная трансформаторная подстанция (КТП), где в одном устройстве объединены функции преобразования напряжения (6/0,66 кВ, либо 6/1,14 кВ), а применительно к электрооборудованию участка, косвенно – электрогенерации, коммутации общей схемы электротехнического комплекса, включая защитное отключение при возникновении коротких замыканий, утечек тока на землю, срабатывании других технологических защит. Разработанные в предыдущие периоды КТП серий ТСШВП, ТСВП и КТПВ, выпускаемые до недавнего времени, нашли широкое применение на угольных шахтах стран СНГ. Идеология построения электрической схемы вышеуказанных серий КТП была направлена на выполнение требований ГОСТ 16837-79 «Подстанции рудничные комплектные трансформаторные взрывобезопасные передвижные. Общие технические условия» [73]. Представленная на рисунке 1.1 структурная схема однотипна для этих КТП, а электрическая схема отличается только элементной базой используемых блоков защит [86].

Взрывозащищенная оболочка КТП включает в себя следующие составные части: коробку кабельных вводов высшего напряжения (А1), распределительное устройство высшего напряжения (РУВН) совмещенное с корпусом активной части силового трансформатора (А2), распределительное устройство низшего напряжения (РУНН) (А3) и коробку кабельных вводов низшего напряжения (А4).

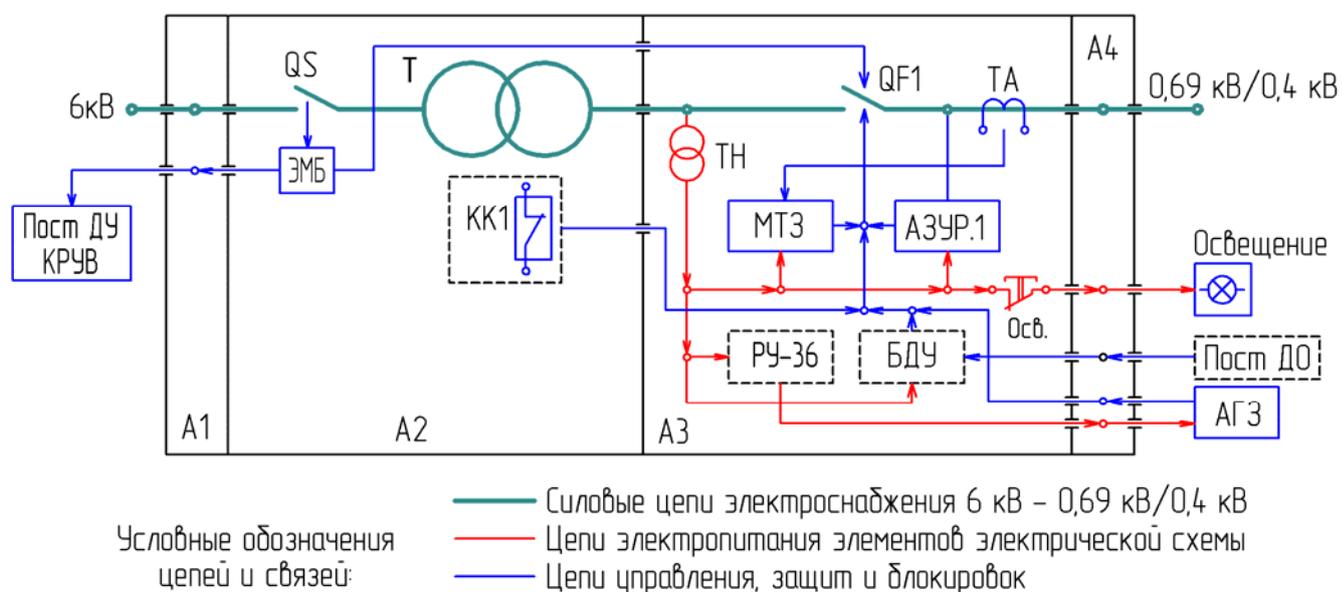


Рисунок 1.1 – Структурная схема подстанций серий ТСШВП, ТСВП и КТПВ

В РУВН расположен разъединитель холостого хода (QS), имеющий электромеханическую блокировку (ЭМБ) с высоковольтным комплектным распределительным устройством (КРУВ), питающим КТП и автоматическим выключателем типа АЗ792У (QF1). Активная часть силового трансформатора (Т) снабжена тепловой защитой от перегрузки при помощи контактных термореле (КК1). В РУНН расположен трансформатор собственных нужд (ТН), питающий блок максимальной токовой защиты (МТЗ), аппарат защиты от токов утечки (АЗУР), блок дистанционного управления (БДУ), внешнюю аппаратуру газовой защиты (АГЗ) и светильники местного освещения. Блок защиты РЧ-36 цепей питания аппаратуры АГЗ стал применяться позже, в связи с ужесточившимися требованиями правил безопасности, а БДУ используют только в КТП с напряжением отходящих присоединений низшего напряжения (НН) 1140В. Трансформаторы (ТА) выполняют функцию датчиков тока для блока МТЗ. Защита от аварийных режимов в силовом трансформаторе и в высоковольтных цепях КТП возлагается на защиту КРУВ, питающего КТП и среди защит электрической схемы самой КТП отсутствует. К подстанции подключены внешние устройства: аппаратура газовой защиты (АГЗ), светильники местного освещения, пост дистанционного отключения (Пост ДО) и пост дистанционного управления высоковольтным КРУВ (Пост ДУ КРУВ). Перечень функций

электрической схемы КТП серий ТСШВП, ТСВП и КТПВ, а также структурных элементов, обеспечивающих выполнение указанных функций, представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Функции электрической схемы КТП серий ТСШВП, ТСВП и КТПВ

Обозначение	Наименование функции	Наличие и тип исполнительных устройств для серий КТП		
		ТСШВП	ТСВП	КТПВ
МТЗ	Максимальная токовая защита	УМЗ	ПМЗ	БКЗ-3
АЗУР	Защита от токов утечки	АЗПБ	АЗУР.1 (АЗУР.4)	
	Контроль изоляции отходящих присоединений НН (режим БРУ)			
КК1	Тепловая защита силового трансформатора	ДТР		МО2-125
РУ-36	Защита цепей 36 В от токов утечки и токов короткого замыкания	нет		есть
АГЗ	Возможность подключения аппаратуры АГЗ	есть		
QF1	Нулевая защита	Расцепитель нулевого напряжения		
ЭМБ	Защита от отключения высоковольтным разъединителем нагруженного трансформатора	есть		
БДУ	Дистанционное отключение КТП при помощи выносного поста ДО	Только для КТП с напряжением отходящих присоединений 1140 В		
ТН, Осв.	Возможность подключения светильников местного освещения	есть		
-	Индикация напряжения и сопротивления изоляции в отходящих присоединениях НН	Стрелочные приборы		
-	Индикация силы тока нагрузки КТП	Стрелочные приборы	Светодиодная шкала	
-	Индикация срабатывания защит и блокировок	Газоразрядные световые индикаторы	Светодиоды	

Такие подстанции успешно эксплуатировались, начиная с 60-х годов прошлого столетия, и продолжают эксплуатироваться до настоящего времени. Однако устаревшая элементная база, функциональная ограниченность электрической схемы, особенно в части интеграции в автоматическую систему управления технологическим процессом (АСУТП) горного предприятия, невозможность питать от одной КРУВ несколько подстанций различной мощности и постоянно ужесточающиеся требования правил безопасности, потребовали создания более надежных КТП на современной элементной базе, в функциональном плане выходящими далеко за требования ГОСТ 16837-79.

Особо актуальной задачей при эксплуатации КТП является организация рациональной схемы электроснабжения участков шахты в условиях большой

протяжённости кабельных линий [72]. На рисунке 1.2 представлены три возможных варианта организации участкового электроснабжения при условии применения нескольких технологически связанных КТП на участке. Очевидно, что наиболее рациональной является схема 3-го участка, где все КТП запитаны от одной ячейки КРУВ одним кабелем последовательным транзитным соединением.

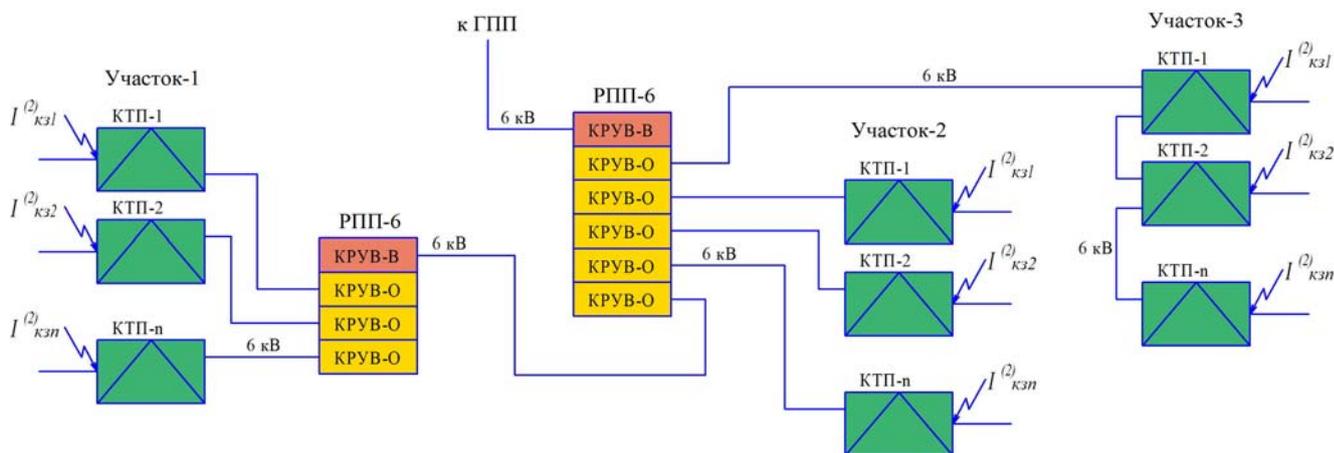


Рисунок 1.2 – Варианты организации электроснабжения участков шахты в условиях большой протяжённости кабельных линий

Однако, согласно п.5.8.1 «Правил безопасности в угольных шахтах» (ПБ), при организации электроснабжения участка шахты «Допускается подключать к одному КРУ не более трёх одинаковой мощности технологически связанных передвижных подстанций или трансформаторов при условии обеспечения чувствительности максимальной токовой защиты» [76]. Данный пункт исключает возможность применения КТП различной мощности при их питании от одного КРУ, что сужает область рациональной организации электроснабжения участков угольной шахты. Например, в случае необходимости применения КТП мощностью 1000 кВ·А, исходя из требований ПБ, остальные КТП, при схеме их питания от одного высоковольтного КРУ, должны быть такой же мощности, или же они должны быть запитаны от другого высоковольтного КРУ, что требует дополнительных капитальных затрат в виде прокладки дополнительных высоковольтных кабелей (схема участка 2) или организации дополнительного высоковольтного распределителя РПП-6 вблизи участка (схема участка 1).

Методика выбора области допустимого использования КТП при включении их в схему транзитного питания от одного КРУВ (схема участка 3), согласно [79], предполагает соблюдение условия, определяемого выражением (1.1).

$$I_Y \leq \frac{I_{K3 \min}^{(2)}}{k_\psi} \quad (1.1)$$

где  $I_Y$  – ток уставки МТЗ питающего КРУВ;  $I_{K3 \min}^{(2)}$  – ток в обмотках ВН для КТП наименьшей мощности при двухфазном коротком замыкании (КЗ) на её шинах со стороны обмоток НН;  $k_\psi = 2$  – коэффициент чувствительности защиты.

Величина  $I_Y$  выбирается в соответствии с выражением (1.2) исходя из условия нечувствительности защиты к наиболее «тяжёлему» режиму работы системы участковых КТП [87]:

$$I_Y = k_n \cdot \left( \sum_{i=1}^n I_{ni} + I_{n \max} \right) \quad (1.2)$$

где  $k_n = 1, 1 \dots 1, 2$  – коэффициент надёжности;  $\sum_{i=1}^n I_{ni}$  и  $\sum_{i=1}^n I_{n \max}$  – соответственно сумма номинальных токов потребителей электроэнергии, питающихся от системы транзитно-включенных КТП и пусковой ток наиболее мощного среди них потребителя, приведенные к стороне ВН;  $n$  – общее количество потребителей электроэнергии.

Вопрос организации электроснабжения участка одним кабелем, путем последовательного транзитного соединения всех КТП (схема участка 3) проработан в [25], где теоретически показана возможность и определены параметры для соблюдения условия (1.1) при совместной работе КТП мощностью 1000 кВА и 400 кВА, однако такая работа подстанций, по-прежнему, остается под запретом ПБ.

В отношении эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов с потребителями высокой мощности, при линейном напряжении

1140 В особую актуальность приобретает задача безаварийного отключения силового присоединения в режиме междуфазного КЗ [39, 47]. Это обусловлено имеющими место повторяющимися случаями возникновения междуфазной проводимости в конструкции автоматического выключателя А3792У в процессе отключения последним тока КЗ (результат проявления процесса коммутационного плазмообразования высокой мощности с эффектом придиафрагменного расширения плазмы дуги в области между неподвижными контактами выключателя и передними пластинами дугогасительных камер) [57]. Исследованиями [56] установлена потенциальная возможность ограничения энергетики процесса и существенного ускорения отключения КЗ на основе применения схемы управляемой коммутации цепи «звезда» вторичной обмотки трансформатора КТП. Соответствующая силовая схема представляет собой структуру, состоящую из мостового выпрямителя, нагруженного плавким предохранителем (Рисунок 1.3).

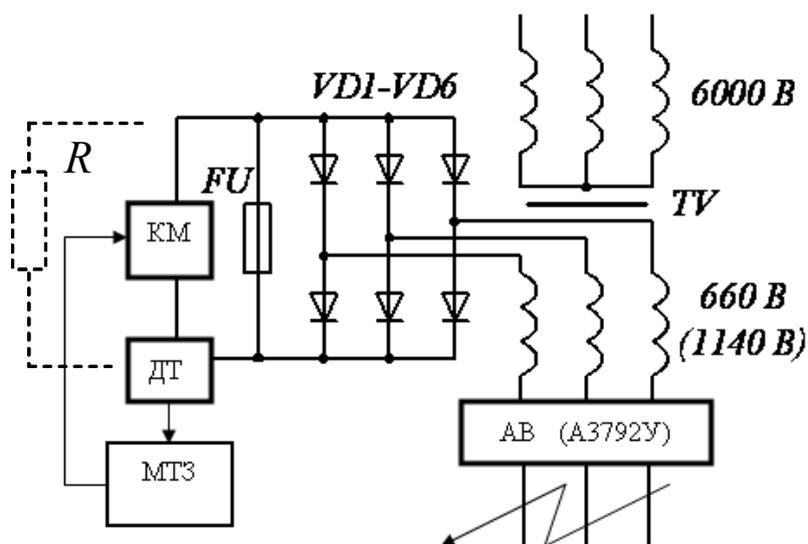


Рисунок 1.3 – Схема ускорения коммутационного процесса отключения короткого замыкания автоматическим выключателем, адаптированная к сети линейного напряжения 1140 В

Однако применение силового выпрямителя в составе РУНН КТП будет сопровождаться значительными выделениями тепловой мощности (вследствие нагрева силовых полупроводниковых приборов).

Альтернативным решением, позволяющим ускорить процесс отключения КЗ и снизить энергетику коммутационного плазмообразования в автоматическом выключателе РУНН КТП могло бы стать применение ВКА в цепи обмотки ВН силового трансформатора и синхронизация процессов защитного отключения ВКА с автоматическим выключателем РУНН КТП.

В конце XX – начале XXI века, с появлением компактных ВКА (вакуумных либо элегазовых), практически все отечественные и зарубежные производители начали располагать ВКА внутри РУВН подстанции что, прежде всего, решало задачу защиты силового трансформатора в случае возникновения короткого замыкания в его обмотках [63, 65]. В результате, в электрической схеме подстанции возникла соответствующая новая функция – МТЗ ВН, а сила тока уставок МТЗ питающей подстанции ячейки КРУВ в такой схеме выбирается уже без учёта эквивалентного сопротивления трансформатора. На законодательном уровне, в п.8.8.1 новой редакции ПБ был добавлен текст гласящий: «При применении передвижных трансформаторных подстанций со встроенным выключателем высокого напряжения, допускается подключение к одному КРУ нескольких таких технологически связанных подстанций» [75]. В связи с этим появилась возможность питать КТП различной мощности от одного КРУВ и, тем самым, существенно рационализировать систему электроснабжения горного предприятия.

Наличие защит на стороне ВН повысило надёжность работы и безопасность эксплуатации КТП [60]. Однако, присутствие в непосредственной близости от силового трансформатора ВКА, обуславливает возможность воздействия опасных КП на некоторые элементы электрической схемы КТП, а также на главную и продольную изоляцию обмоток силового трансформатора [55].

Структурная схема шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции типа ТВПШ-Х/6-1,2/0,69-УХЛ15-20, являющаяся характерным представителем КТП, оснащенной ВКА, представлена на рисунке 1.4 [18].

Питающее напряжение 6 кВ поступает на разъединитель QS, расположенный во вводной коробке А0, распределительного устройства высшего напряжения А1.

Разъединитель QS оснащён электромеханической блокировкой ЭМБ с коммутационными аппаратами подстанции высшего QF1 и низшего QF2 напряжений, а также с высоковольтной ячейкой КРУВ, питающей КТП. В функциональном плане ЭМБ осуществляет: блокировку, препятствующую отключению рабочих токов КТП разъединителем QS; блокировку, препятствующую доступу внутрь распределительных устройств подстанции при включенном разъединителе QS; блокировку включения КРУВ при отключенном разъединителе QS.

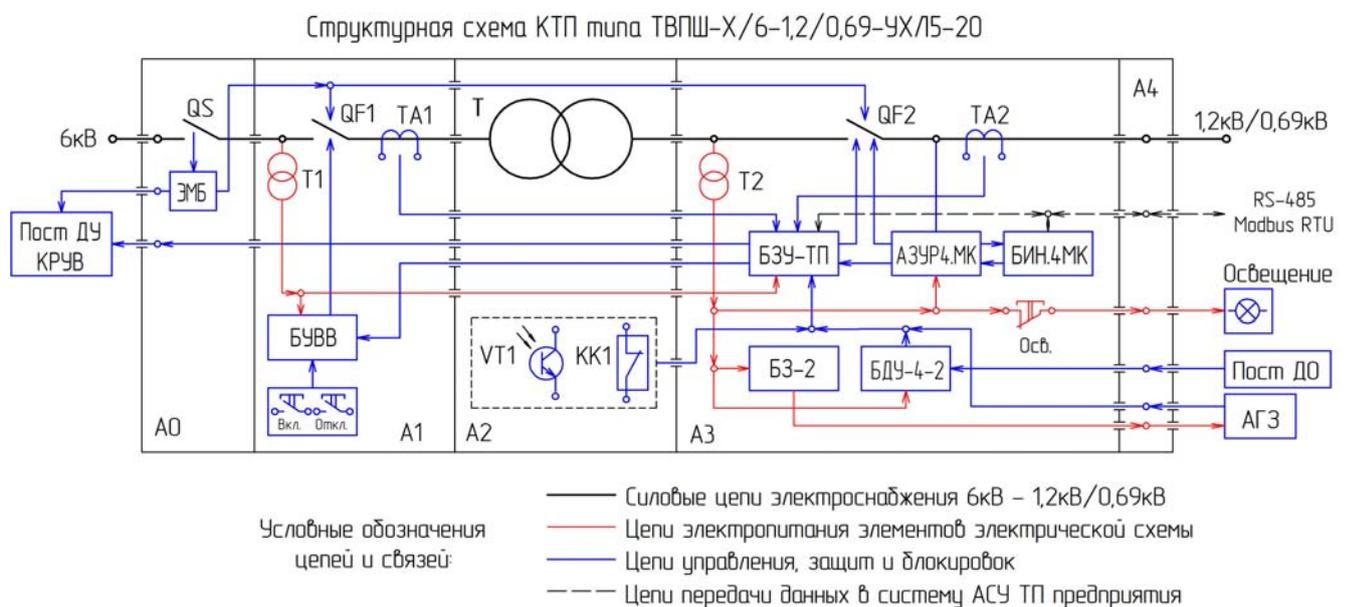


Рисунок 1.4 – Структурная схема КТП типа ТВПШ-Х/6-1,2/0,69-УХЛ5-20

При включении разъединителя QS, напряжение поступает на трансформатор T1, от вторичных обмоток которого получает питание блок управления коммутационным аппаратом QF1 – БУВВ и блок защиты и управления трансформаторной подстанцией БЗУ-ТП.

Управление коммутационным аппаратом QF1 происходит при помощи кнопочных выключателей, размещённых на откидной крышке РУВН. При нажатии на кнопку «Вкл.», БУВВ формирует команду включения QF1 при условии отсутствия блокировки со стороны БЗУ-ТП.

После включения выключателя QF1, напряжение 6 кВ поступает на первичную обмотку трёхфазного силового трансформатора T, расположенного в

отдельном отсеке А2. Непосредственно от вторичной обмотки силового трансформатора Т запитан трансформатор собственных нужд Т2 который, в свою очередь, является источником питания для следующих блоков, входящих в состав РУНН А3: аппарата защиты от токов утечки на землю АЗУР4.МК, аппаратуры газовой защиты АГЗ, блока дистанционного отключения выключателя QF2 БДУ-4-2, цепей ламп местного освещения подстанции. При этом аппарат АЗУР4.МК работает в режиме предварительного контроля сопротивления изоляции отходящих присоединений сети НН. Блок защит БЗ-2, выполняет функцию защиты выходных цепей 36 В питания аппаратуры АГЗ от токов утечки на землю и токов короткого замыкания. Блок информационный БИН.4МК получает питание напрямую от внутренних цепей аппарата АЗУР4.МК и выполняет функции по сбору, отображению и хранению данных о работе аппарата АЗУР4.МК. БИН.4МК также осуществляет контроль общего времени отключения отходящей сети НН при срабатывании защиты от токов утечки на землю в режиме «Проверка» в условиях шахты без применения дополнительных устройств контроля времени.

При включении автоматического выключателя QF2, напряжение питания поступает в сеть отходящих присоединений НН, а аппарат АЗУР4.МК переходит в режим общесетевой защиты от токов утечки на землю.

Блок БЗУ-ТП обеспечивает выполнение следующих функций [81]:

- нулевую защиту выключателя QF1 (при отсутствии расцепителя минимального напряжения);
- защиту от КЗ силового трансформатора и силовых цепей РУВН и РУНН, с возможностью её проверки, совместно с датчиками тока ТА1, ТА2;
- защиту от асимметрии (обрыва) фаз силовых цепей ВН и НН, совместно с датчиками тока ТА1, ТА2;
- защиту от искровых и дуговых явлений в отсеке силового трансформатора, совместно с датчиками VT1;
- двухуровневую интегральную защиту силового трансформатора от перегрева, совместно с датчиками температуры КК1;

- отключение выключателя QF1, при отказе выключателя QF2;
- отключение питающей ячейки КРУВ, при отказе выключателя QF1;
- отключение и блокирование подстанции при срабатывании аппаратуры газовой защиты АГЗ;
- возможность дистанционного отключения выключателя QF2 по искробезопасному интерфейсу RS-485.

На рисунке 1.5 представлен общий вид КТП типа ТВПШ-1000/6-1,2/0,69-УХЛ5-20 с размещенным основным электрооборудованием в отсеках РУВН и РУНН [92].

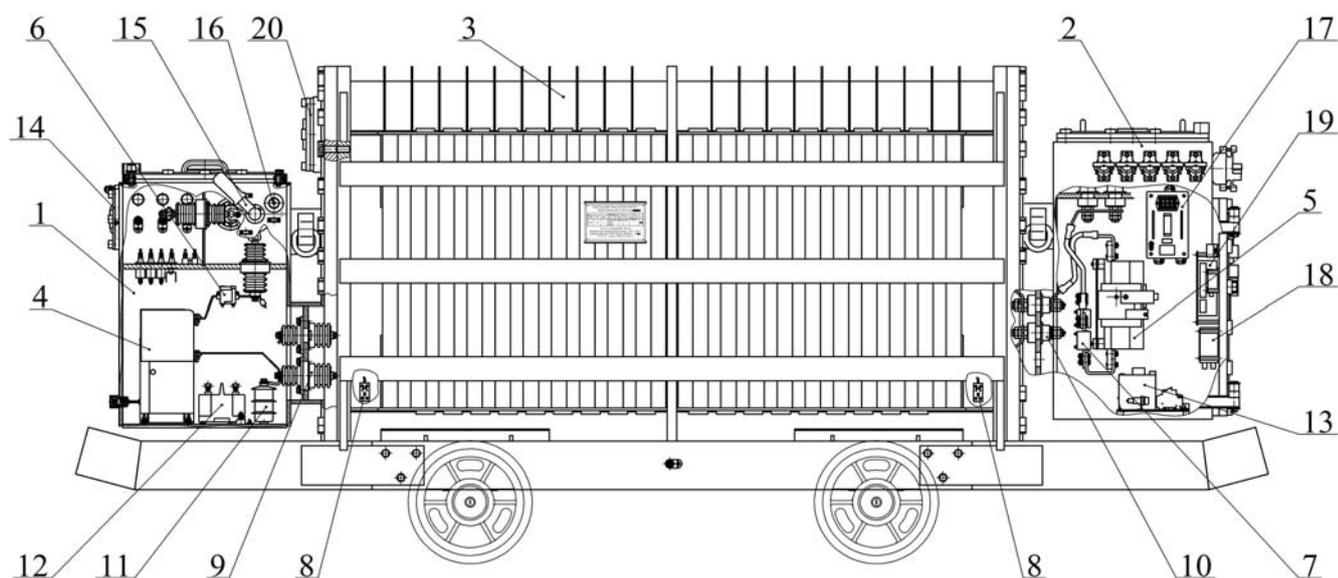


Рисунок 1.5 – Общий вид КТП типа ТВПШ-1000/6-1,2/0,69-УХЛ5-20: 1 – РУВН; 2 – РУНН; 3 – отсек силового трансформатора; 4 – ВКА; 5 – коммутационный аппарат РУНН; 6, 7 – датчики тока соответственно цепей ВН и НН; 8 – датчики искровых и дуговых явлений; 9, 10 – проходные изоляторы соответственно цепей ВН и НН; 11 – нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН); 12, 13 – трансформаторы собственных нужд соответственно цепей ВН и НН; 14 – люк вводной муфты питающей сети 6 кВ; 15 – разъединитель; 16 – кнопка ЭМБ; 17 – аппарат АЗУР.МК; 18 – БИН.4МК; 19 – БЗУ-ТП; 20 – люк переключения коэффициента трансформации.

При отсутствии аварийных ситуаций схема КТП работает таким образом, что коммутация QF1 (ВКА) всегда происходит при отключенном QF2. Т.е. в подавляющем большинстве случаев ВКА подстанции коммутирует малые индуктивные токи ненагруженного трансформатора, что вызывает возникновение перенапряжений с импульсами наибольшей амплитуды [98, 106].

Таким образом, схема данной КТП отличается большей функциональностью. Однако её эксплуатация сопряжена с появлением значительных по величине перенапряжений при коммутации ВКА (не смотря на используемые средства защиты в виде ОПН), что может привести к повреждению изоляции обмоток трансформатора и сделать дальнейшую эксплуатацию КТП невозможной.

## 1.2 Коммутационные перенапряжения как фактор воздействия на ресурс электротехнического оборудования рудничной трансформаторной подстанции

Предварительные выводы о специфике воздействия коммутационных перенапряжений (КП) на активную часть трансформатора КТП при расположении ВКА в непосредственной близости от этого трансформатора (в составе КТП) могут быть сделаны на основании анализа технического состояния конструктивных элементов трансформатора, функционировавшего в ходе опытно-промышленной эксплуатации КТП типа ТВКП-1000/6-1,2 в условиях ОАО Шахта «Комсомолец Донбасса». В данном случае в составе РУВН КТП применён вакуумный ВКА типа ВВ/TEL-10-20/1000-У2, а для защиты от КП, в соответствии с общепринятой практикой, использованы ограничители перенапряжений типа ОПН-РТ/TEL-6/6,9 УХЛ2, согласно рекомендациям предприятия-изготовителя вакуумного выключателя [11, 91].

По результатам опытно-промышленной эксплуатации зафиксирован выход из строя трансформатора КТП вследствие разрушения изоляции его обмоток ВН. В частности, установлено, что по характеру разрушения обмоток – имел место пробой изоляции силового трансформатора вследствие образования дуги между крайними витками первой катушки обмотки ВН фазы «В» и ярмовой балкой

магнитопровода по воздуху с последующим развитием дуги на катушки фаз «В» и «А» (Рисунок 1.6). Очевидной причиной образования дуги представляются перенапряжения, возникшие при коммутации индуктивных токов обмотки ВН силового трансформатора с помощью ВКА, что согласуется с классической теорией техники высоких напряжений [8, 10, 12].

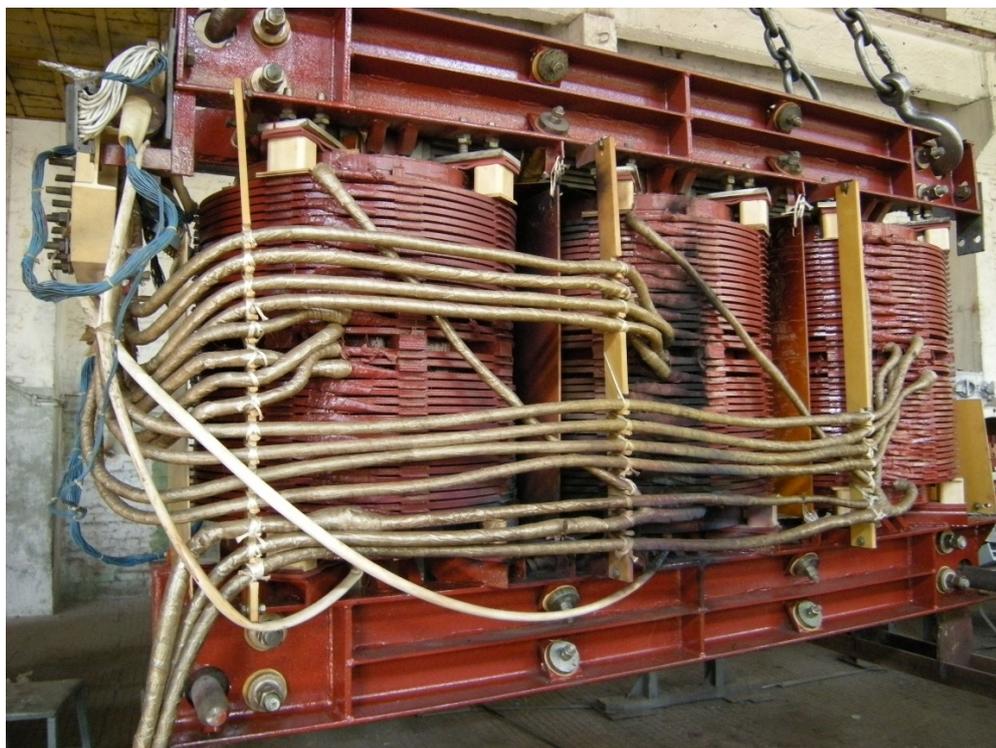


Рисунок 1.6 – Активная часть трансформатора подстанции ТВКП-1000/6-1,2, со следами дугового прожигания изоляции обмотки ВН, характерного при воздействии импульсов коммутационных перенапряжений

По характеру повреждений видно, что имели место множественные случаи пробоя изоляции обмоток ВН на выступающие участки ярмовой балки магнитопровода, причём расстояние по воздуху составляло более 60 мм (Рисунок 1.7). Особенности конструкции и взаиморасположения элементов активной части трансформатора подстанции и характер выявленных повреждений дают основания сделать следующие предположения относительно процессов, обусловленных КП. В частности, в результате множественных электрических пробоев изоляции под воздействием ионизации, снизилось общее сопротивление

окружающего воздуха, а образовавшийся электропроводящий «нагар», представляющий собой частицы повреждённой изоляции обмоток, осел на опорных изоляторах (поз. 4) и электроизоляционном экране (поз. 3), что в итоге привело к устойчивому замыканию обмоток ВН на «землю». Кроме того, важную роль сыграл фактор общего снижения сопротивления изоляции активной части при её нагреве (во время работы КТП под нагрузкой).

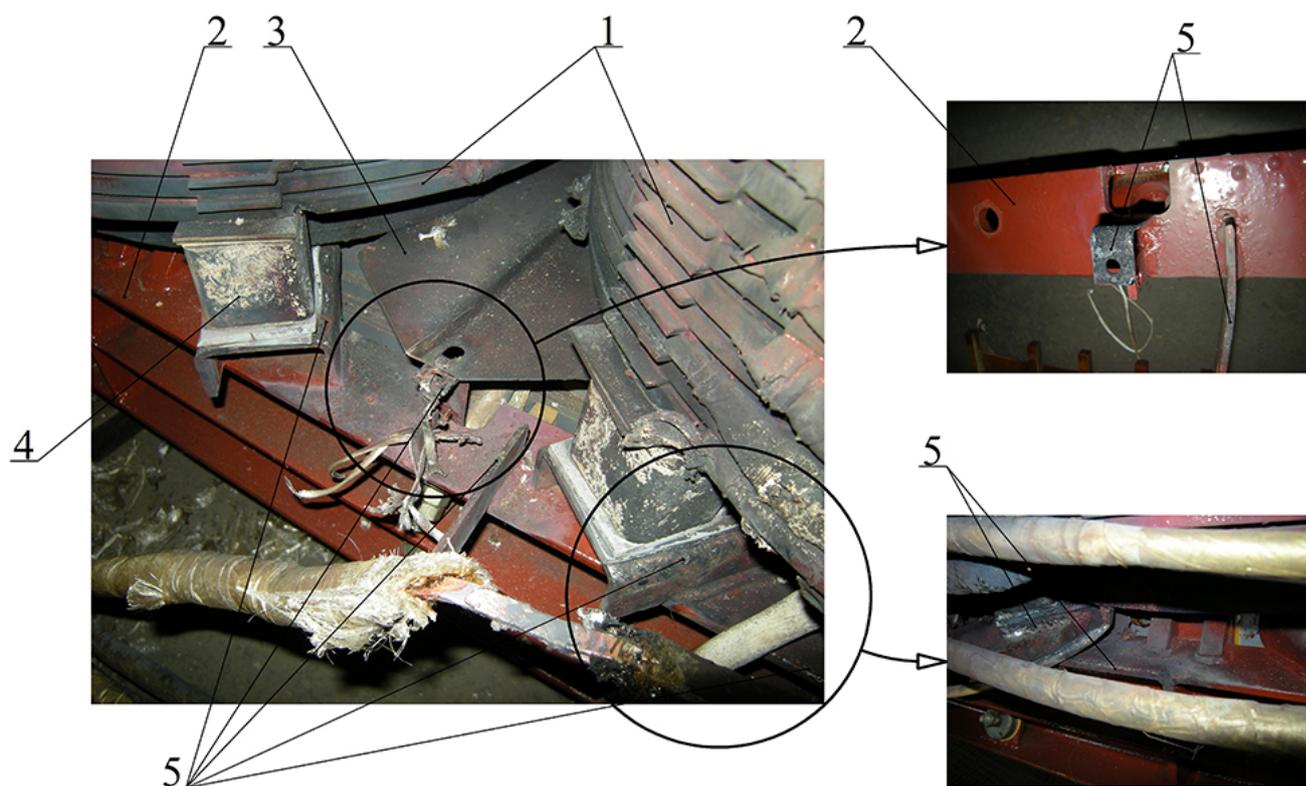


Рисунок 1.7 – Пробой изоляции обмоток на ярмовую балку магнитопровода: 1 – обмотки ВН; 2 – ярмовая балка магнитопровода; 3 – электроизоляционный экран; 4 – опорный изолятор; 5 – места пробоя изоляции обмоток на ярмовую балку магнитопровода

На рисунке 1.8 показаны результаты пробоя междуфазной изоляции между обмотками ВН фаз «А» и «В» (поз. 1). В верхней и средней части обмотки фазы «В», наблюдаются два характерных места пробоя изоляции (поз. 4). То, что причиной этих повреждений явились именно коммутационные перенапряжения, указывает расположение мест пробоя изоляции с внешней стороны обмотки (изоляция проводников внутренних слоев обмотки повреждений не имеет). Пробой

происходил с обмотки на обмотку через междуфазную электроизоляционную перегородку (поз. 2) из стеклотекстолита толщиной 4 мм, на которой также видны соответствующие места повреждений (поз. 5).

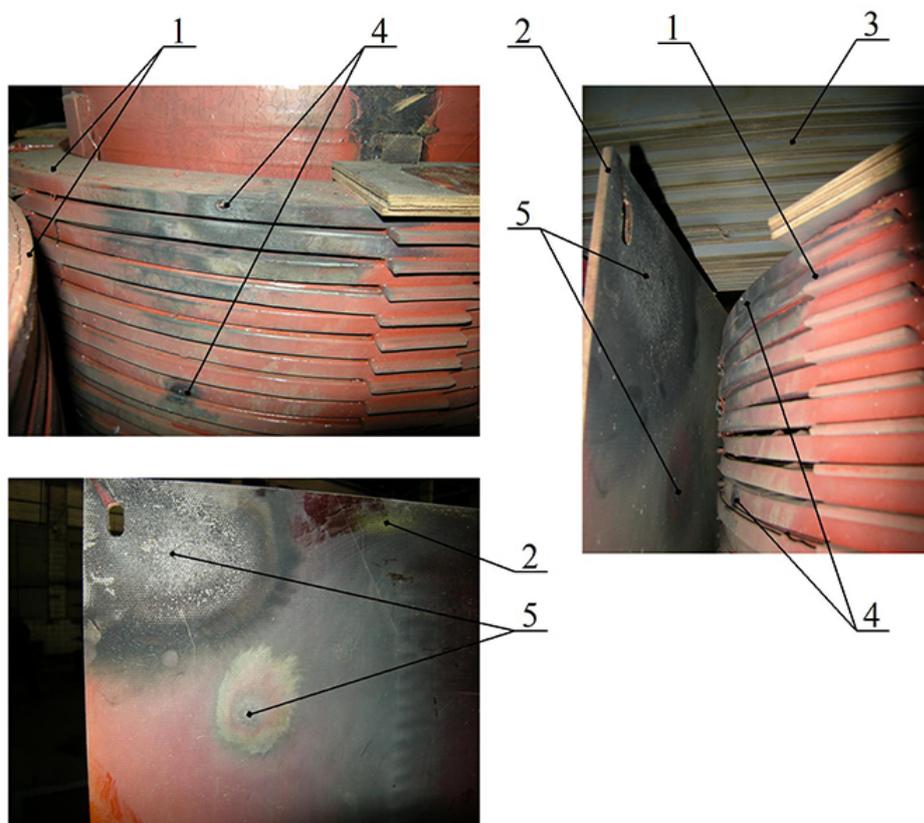


Рисунок 1.8 – Пробой междуфазной изоляции активной части трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2: 1 – обмотки ВН; 2 – междуфазная электроизоляционная перегородка; 3 – ядро магнитопровода; 4 – место пробоя изоляции обмоток; 5 – место пробоя изоляции междуфазных электроизоляционных перегородок

Наличие пробоя изоляции через воздушный промежуток более 60 мм, объясняется не только ионизацией воздушного пространства в оболочке КТП, изолированной от внешней среды, но также и переносом молекул обмоточной меди в воздушную среду под действием электрического поля высокой напряженности, возникающего при КП. На рисунке 1.9 приведен участок внутренней стенки взрывозащищенного корпуса подстанции с характерным медным напылением, образовавшемся в результате систематического пробоя изоляции обмотки ВН одной из фаз.

Таким образом, опытный образец трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2, разработанный в соответствии с требованиями действующей нормативно-технической документации и прошедший полный комплекс лабораторных испытаний, в т.ч. испытание главной изоляции обмоток ВН трансформатора приложенным испытательным напряжением промышленной частоты – 20 кВ, вышел из строя в результате возникновения перенапряжений при коммутации силового трансформатора КТП с использованием ВКА, что подтверждается соответствующими актами обследования (Приложения Б, В).

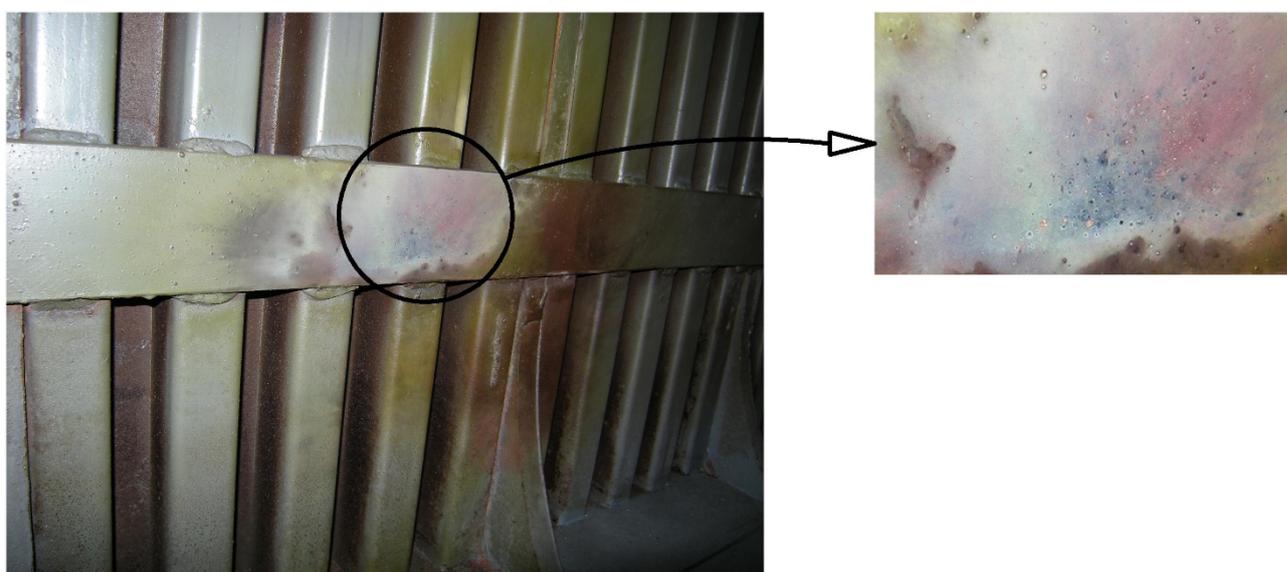


Рисунок 1.9 – Результат пробы изоляции на внутреннюю стенку взрывозащищенного корпуса КТП

На первый взгляд, одним из наиболее очевидных способов устранения негативного воздействия КП на силовой трансформатор КТП является усиление электрической прочности главной и продольной изоляции его обмоток. Однако, как показали дальнейшие исследования, указанный способ не даёт удовлетворительного результата, т.к. зачастую амплитуды коммутационных импульсов многократно превышают расчетную величину электрической прочности изоляции трансформатора, которая, в свою очередь, напрямую зависит от его теплового состояния.

Косвенно о электрической прочности изоляции силового трансформатора КТП можно судить по сопротивлению изоляции его обмоток, которое при нормальных значениях климатических факторов внешней среды по ГОСТ 15150 согласно [74] должно быть не менее:

а) в холодном состоянии: обмотка ВН - корпус (земля) – 500 МОм; обмотка ВН - обмотка НН – 500 МОм; обмотка НН - корпус (земля) – 100 МОм;

б) в нагретом состоянии непосредственно после нагревания обмоток номинальной силой тока до установившейся температуры: обмотка ВН - корпус (земля) – 80 МОм; обмотка ВН - обмотка НН – 80 МОм; обмотка НН - корпус (земля) – 20 МОм.

Исследованиями [54] установлено, что обмотки трансформатора шахтной КТП имеют неравномерный нагрев. В наиболее нагретых участках обмоток происходит снижение электрической прочности изоляции и, соответственно, более высокая подверженность влиянию коммутационных перенапряжений.

На базе метода конечных элементов (МКЭ) в среде SolidWorks Flow Simulation был выполнен тепловой анализ отсека силового трансформатора мощностью 1000 кВ·А в режиме номинальной нагрузки и дан сравнительный анализ полученных результатов с данными экспериментальных тепловых исследований подстанции типа КТПВ-1000/6-1,2. На рисунке 1.10 представлен срез теплового поля в поперечном сечении фазы «В». Сравнение расчётных и экспериментальных данных превышения температуры  $\theta$  внутри осевого канала обмотки НН фазы «В» представлен на рисунке 1.11.

Экспериментальный и расчетный анализ полученных градиентов температур обмоток трансформатора по высоте показал, что перепад температур различных частей обмотки может достигать 100 °С. Наименьший нагрев возникает в нижней части обмотки (около 70 °С), наибольший – на расстоянии  $\frac{3}{4}$  обмотки по высоте (около 170 °С). В соответствии с рисунком 1.8, именно в наиболее нагретой части обмотки ВН отмечен факт пробоя изоляции, в том числе, с повреждением изоляции междуфазных электроизоляционных перегородок.

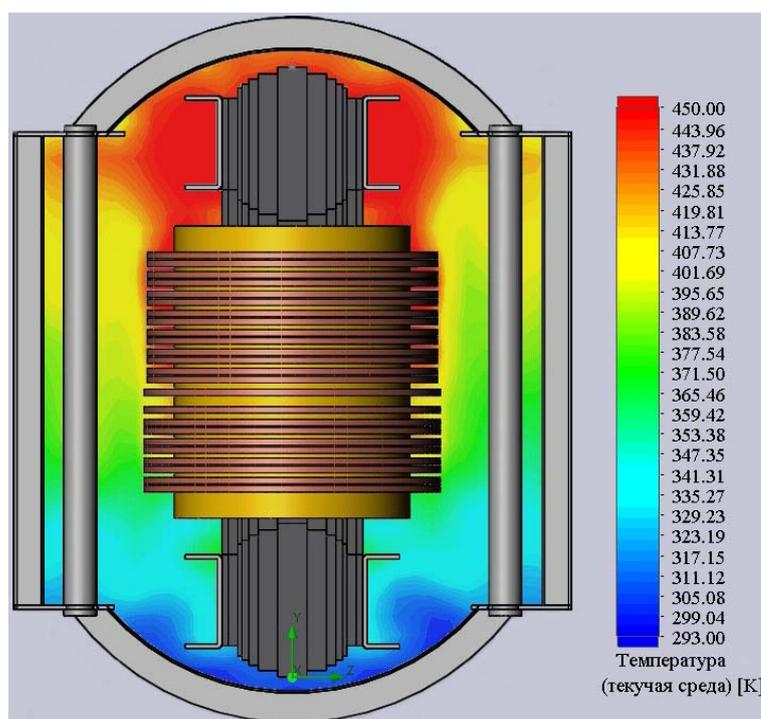


Рисунок 1.10 – Срез теплового поля в поперечном сечении фазы В

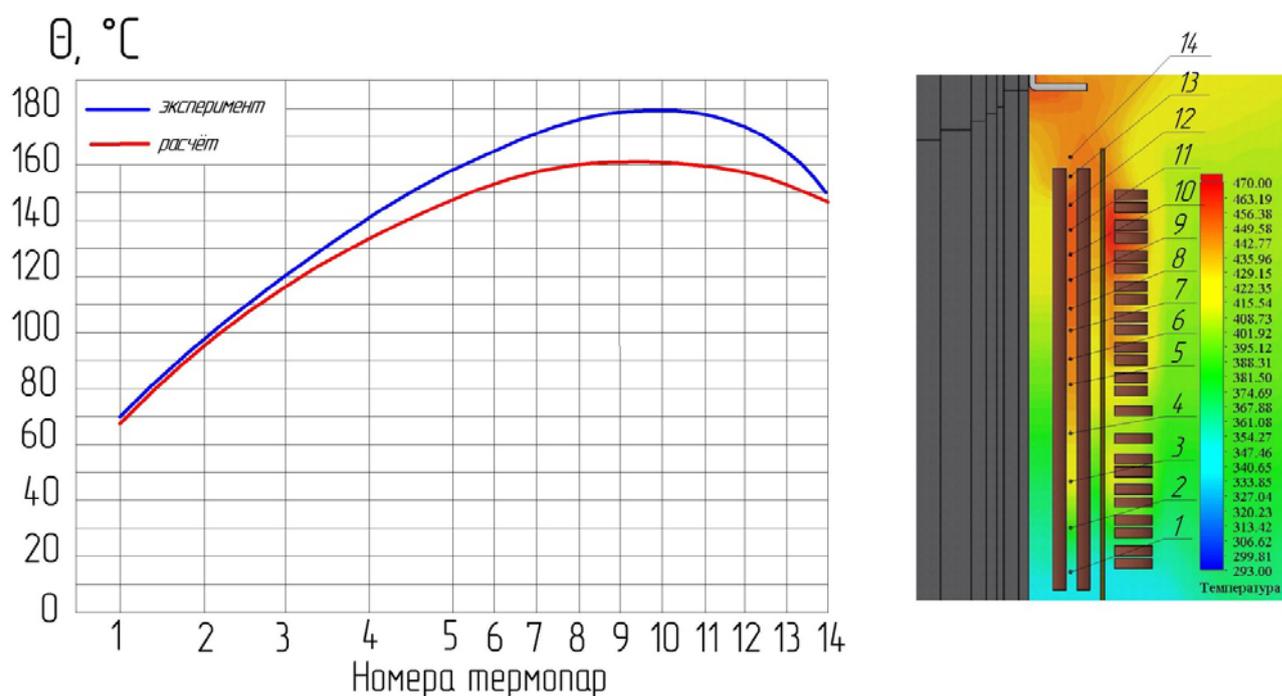


Рисунок 1.11 – График распределения превышения температуры  $\Theta$  по высоте осевого канала обмотки НН фазы В

Как показали промышленные испытания, реальные перенапряжения, возникающие в рассматриваемом объекте в условиях шахтной сети, оказались выше допустимых значений, и принятых мер, согласующихся с известными

средствами и методами по снижению КП, оказалось недостаточно. Этим подтверждается актуальность поиска технических решений в контексте ограничения, либо полного подавления КП, возникающих в КТП с ВКА, расположенным в непосредственной близости от силового трансформатора.

Помимо рудничных КТП, потенциальным объектом использования комплекса «коммутационный аппарат – трансформатор», элементы которой располагаются в непосредственной близости друг от друга, является мощный очистной комбайн (например, КДК-500), где эта система применяется в качестве составляющей источника питания частотно-регулируемого привода подачи [34]. Высокие значения амплитуд КП, в данном случае, несут опасность повреждения не только изоляции самого трансформатора и цепей его питания, но и полупроводниковых приборов преобразователя частоты, являющегося наиболее уязвимым элементом такой конструкции.

### 1.3 Аналитический обзор исследований и разработок в области подавления перенапряжений в структуре «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор»

Очевидно, что переходные процессы, возникающие в результате коммутации трансформатора с использованием ВКА, и сопровождаемые перенапряжениями в обмотках ВН и НН, носят волновой характер, а параметры возмущающих воздействий, обусловленных КП, определяются закономерностями протекания электромагнитных процессов в объекте. Наиболее опасным для изоляции является режим отключения трансформатора на холостом ходу, в результате которого возникает импульс напряжения максимальной амплитуды [80, 108].

Так, при отключении индуктивной нагрузки ВКА возникает т.н. явление среза тока, заключающееся в том, что если момент начала разведения контактов ВКА не совпадает с нулем тока промышленной частоты, то дуга, загорающаяся между его контактами, гаснет прежде момента перехода кривой тока через нуль. При этом, в индуктивности обмоток трансформатора остается накопленная

энергия, которая затем освобождается на ёмкость присоединения, что вызывает перенапряжения, значительно превышающие величину амплитудного напряжения в сети. Это определяется первым законом коммутации, в соответствии с которым ток, протекающий через индуктивность, мгновенно измениться не может. Поэтому для поддержания тока  $i$  в обмотках с индуктивностью  $L$  на размыкаемых контактах создается ЭДС  $E$ , которая тем больше, чем больше индуктивность обмоток и чем меньше время коммутации  $t$  [59]:

$$E = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.3)$$

На рисунке 1.12 представлена эквивалентная электрическая схема обмотки трансформатора.

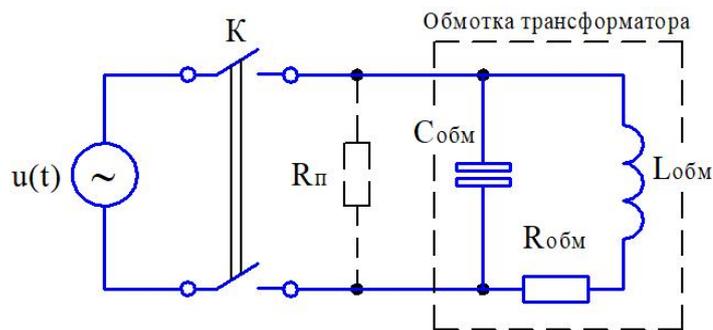


Рисунок 1.12 – Эквивалентная электрическая схема обмотки трансформатора

В момент отключения, характеризуемого начальной фазой  $\varphi_0$ , исходная магнитная энергия  $W_{L0}$ , накопленная в индуктивности обмоток  $L_{обм}$ , и исходная электрическая энергия  $W_{C0}$ , накопленная в эквивалентной ёмкости обмоток  $C_{обм}$ , состоящей из собственной параллельной ёмкости обмоток, а также ёмкости обмоток относительно «земли», определяются выражениями (1.4):

$$W_{L0} = \frac{L_{обм} \cdot I_m^2 \cdot \sin^2 \varphi_0}{2}$$

$$W_{C0} = \frac{C_{обм} \cdot U_m^2 \cdot \cos^2 \varphi_0}{2} \quad (1.4)$$

Полная энергия системы  $W_0$ , согласно выражению (1.5), определяется их суммой, и совпадает с максимальной электрической энергией ёмкости  $C_{обм}$  или максимальной магнитной энергией индуктивности  $L_{обм}$ :

$$W_0 = \frac{L_{обм} \cdot I_m^2 \cdot \sin^2 \varphi_0}{2} + \frac{C_{обм} \cdot U_m^2 \cdot \cos^2 \varphi_0}{2} = \frac{L_{обм} \cdot I_m^2}{2} = \frac{C_{обм} \cdot U_m^2}{2} \quad (1.5)$$

Затем возникают электромагнитные колебания в цепи, состоящей из параллельного колебательного контура  $L_{обм}$  и  $C_{обм}$ . Активное сопротивление обмотки  $R_{обм}$ , а также потери в магнитопроводе  $R_n$  вносят в этот колебательный процесс элемент затухания [105, 110]. При этом энергия, запасенная в реактивных элементах системы, согласно выражениям (1.6), уменьшается по экспоненциальному закону, выделяясь в виде тепла на сопротивлениях  $R_{обм}$  и  $R_n$ :

$$\begin{aligned} W_C(t) &= W_0 \cdot e^{-2\beta t} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_0) \\ W_L(t) &= W_0 \cdot e^{-2\beta t} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (1.6)$$

где  $\omega$  – частота затухающих колебаний (1.7);  $\omega_0$  – собственная резонансная частота колебательного контура (1.8);  $\beta$  – коэффициент затухания (1.9).

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (1.7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{обм} \cdot C_{обм}}} \quad (1.8)$$

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot R_n \cdot C_{обм}} + \frac{R_{обм}}{2 \cdot L_{обм}} \quad (1.9)$$

Согласно закону сохранения энергии, максимальное напряжение  $U_{max}$  появится на ёмкости  $C_{обм}$  в первый полупериод колебаний, когда вся энергия сосредоточится в ёмкости, в соответствии с уравнением (1.10):

$$\frac{C_{обм} \cdot U_{max}^2}{2} = \frac{L_{обм} \cdot I_m^2}{2} \cdot e^{-2\beta t} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{C_{обм} \cdot U_m^2}{2} \cdot e^{-2\beta t} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_0) \quad (1.10)$$

Очевидно, что при ёмкости  $C_{обм} = \text{const}$ , которая зависит только от конструктивных особенностей трансформатора, закон сохранения энергии выполняется за счёт роста напряжения  $U_{max}$ :

$$U_{max} = \sqrt{U_m^2 \cdot e^{-2\beta t} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{L_{обм} \cdot I_m^2}{C_{обм}} \cdot e^{-2\beta t} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi_0)} \quad (1.11)$$

Исходя из выражения (1.11), если в момент отключения (при  $t = 0$ ) начальная фаза составит  $\varphi_0 = 0^\circ$ , то  $U_{max}$  принимает минимально возможное значение и равно амплитудному значению напряжения питания  $U_m$ , а при  $\varphi_0 = 90^\circ$   $U_{max}$  – максимально, и определяется исходя из выражения (1.12):

$$U_{max} = \sqrt{\frac{L_{обм} \cdot I_m^2}{C_{обм}}} = I_m \cdot \rho_{обм} \quad (1.12)$$

$$\rho_{обм} = \sqrt{\frac{L_{обм}}{C_{обм}}} \quad (1.13)$$

где  $\rho_{обм}$  – характеристическое (волновое) сопротивление контура (1.13).

Характерно, что в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) величина  $U_{max}$  не зависит от активных сопротивлений контура  $R_{обм}$  и  $R_n$ , а определяется лишь индуктивностью обмоток трансформатора, собственной входной ёмкостью трансформатора, ёмкостью присоединения (длиной кабельной линии) и величиной тока среза, который различается для выключателей с разными дугогасящими средами и химическим составом материала контактов [22, 26].

При  $t \neq 0$  характер переходного процесса зависит от соотношения параметров  $\omega_0$  и  $\beta$ . Если  $\beta < \omega_0$ , то имеет место затухающий по экспоненте колебательный

процесс. При увеличении активных потерь в контуре, а следовательно и коэффициента затухания  $\beta$ , период затухающих колебаний, определяемый выражением (1.14), возрастает.

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (1.14)$$

При условии  $\beta = \omega_0$  – период стремится к бесконечности, колебания в контуре становятся невозможными. Если  $\beta > \omega_0$  –  $U_{max}$  снижается по апериодической кривой, причем интенсивность снижения тем больше, чем больше коэффициент  $\beta$ .

На базе вышеизложенного, очевидны следующие способы подавления коммутационных перенапряжений:

- применение разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН), шунтирующих недопустимо-высокий импульс  $U_{max}$ ;
- увеличение  $C_{обм}$  за счет присоединения дополнительных С- или RC-цепей к обмоткам трансформатора;
- управляемая коммутация (применение синхронного выключателя с коммутацией тока в момент его перехода через нуль);
- снижение величины тока среза  $I_m$  коммутационного аппарата;
- добавление дополнительной активной составляющей  $R_n$  на период коммутации, способствующей интенсивному принудительному затуханию колебаний переходного процесса (Рисунок 1.12).

Отмеченные подходы и методы подавления КП подробно рассматриваются в работах [3, 5, 7, 13, 24, 29, 30, 33, 37, 44, 46, 52, 69, 78, 82, 94, 95, 99, 100, 103, 104, 112]. В общем виде их можно классифицировать в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Классификация методов защиты трансформатора шахтной участковой КТП от коммутационных перенапряжений

Согласно представленной на рисунке 1.13 схеме, снижение КП может быть достигнуто: подавлением внутренних колебаний, воздействием на падающую волну коммутационного импульса, управляемой пофазной коммутацией ВКА или совершенствованием конструкции используемого коммутационного аппарата.

1.3.1 Воздействие на волну коммутационного импульса как способ ограничения коммутационных перенапряжений

#### *Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН)*

Одним из основных устройств, применяемых в рудничной КТП для воздействия на амплитуду и длину волны коммутационного импульса, на сегодняшний момент являются ОПН, которые, в отличие от вентильных разрядников, не имеют искровых промежутков и обладают рядом следующих преимуществ: относительным быстродействием (время срабатывания  $t_{cp} - 1$  мкс и менее); отсутствием сопровождающего тока после затухания коммутационного

импульса; стабильностью характеристик в течение всего срока эксплуатации; способностью к поглощению больших энергий (удельная энергия поглощения  $W_{уд}$  – не менее 2 кДж/кВ) [28, 64]. Конструкция и пример вольтамперной характеристики типового ОПН представлены на рисунке 1.14.

Если отношение напряжения сети  $U$  к рабочему напряжению ОПН  $U_{н.р.}$  не превышает некоторого порогового значения (в данном случае  $U/U_{н.р.} < 1,35$ ), то через ОПН вследствие нелинейности вольтамперной характеристики оксидно-цинковых или металл-оксидных элементов, протекает небольшой ток (порядка сотен микроампер), который имеет преимущественно емкостной характер. При возникновении импульса перенапряжения, ОПН переходит в проводящее состояние и способен пропустить через варисторы токи в сотни и тысячи ампер, что существенно снижает напряжение на защищаемом оборудовании КТП. После срабатывания проводимость ОПН возвращается в исходное состояние, сохраняя при этом все свои характеристики [38].

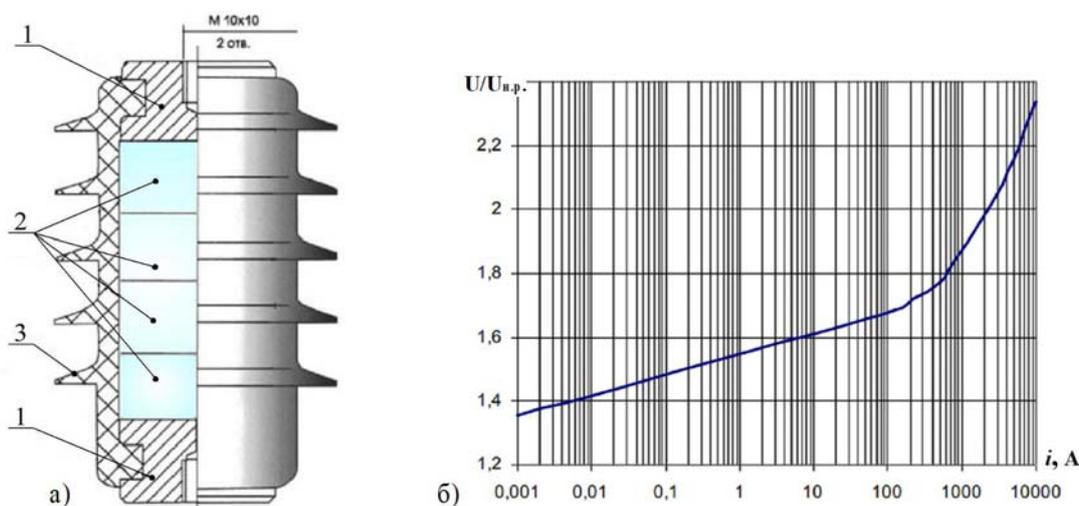


Рисунок 1.14 – Конструкция (а) и вольтамперная характеристика (б) ОПН:

1 – контактный электрод; 2 – нелинейные элементы на основе оксидно-цинковых или металл-оксидных варисторов; 3 – электроизоляционный корпус.

Несмотря на очевидные преимущества ОПН имеют ограниченную область применения. Исследованиями [21, 52, с.102–103] установлено, что при

высокочастотных колебаниях, частота которых превышает 45 кГц, ОПН перестает реагировать на коммутационный импульс, амплитуда которого в несколько раз может превышать порог срабатывания ОПН. В рудничных КТП ВКА размещен в непосредственной близости от силового трансформатора, обмотки которого обладают значительной нелинейной индуктивностью и малой собственной емкостью, при отсутствующей емкости присоединительного кабеля. Сочетание указанных условий способствует возникновению высокочастотных КП с частотой 45 кГц и выше.

Природа таких перенапряжений состоит в том, что при срезах индуктивных токов, обычно скорость роста электрической прочности  $U_{\text{эпр}}$  расходящегося межконтактного промежутка силовой контактной группы ВКА меньше скорости роста напряжения на входной емкости обмоток трансформатора  $U_C$  (1.15):

$$\frac{dU_{\text{эпр}}}{dt} < \frac{dU_C}{dt} \quad (1.15)$$

В момент времени, когда  $U_{\text{эпр}} = U_C$ , между расходящимися контактами ВКА происходит электрический пробой с возникновением дуги. При этом, рост напряжения  $U_C$  – прекращается. Однако, поскольку сохраняются предпосылки для среза тока дуги, через сравнительно небольшой отрезок времени после ее зажигания она гасится вновь, и процесс повторяется.

В процессе пробоя межконтактного промежутка ВКА разряд емкости  $C_{\text{обм}}$  происходит на цепь источника, обладающего малым значением индуктивности, вследствие чего импульсы таких КП носят высокочастотный характер, а средства подавления КП в виде ОПН, при таком процессе, имеют низкую эффективность.

Другим недостатком ОПН является его низкая термическая устойчивость при возникновении однофазных замыканий на землю.

Исследованиями [59] установлено, что при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью, возникает перемежающаяся дуга, которая при несвоевременном отключении линий (из-за низкой селективности защит) может вызвать длительные перенапряжения относительно низкочастотного

характера амплитудой до 4 крат. Указанные перенапряжения, как правило, возникают на неповрежденных фазах сети, а низкая селективность защит от замыкания на землю в рудничных сетях напряжением 6 кВ обусловлена значительным удалением участковой КТП от питающей ее высоковольтной ячейки КРУВ, в которой, обычно, располагается данная защита. В таких условиях ОПН переходит в проводящее состояние, что приводит к длительному протеканию тока замыкания на землю через ОПН и может привести к его термическому разрушению.

Таким образом, основными недостатками ОПН являются их низкая эффективность функционирования при высокочастотных колебаниях переходного процесса, а также низкая термическая устойчивость в режиме однофазного замыкания на землю, что не позволяет на базе ОПН выполнить эффективную защиту от коммутационных перенапряжений оборудования рудничных КТП с встроенным ВКА.

#### *Кабельная линия*

Подключение кабельной линии между коммутационным аппаратом и индуктивной нагрузкой приводит к увеличению входной емкости коммутируемой цепи за счет собственной емкости кабеля  $C_{каб}$ , причем суммарная индуктивность цепи возрастает незначительно, т.к. индуктивность кабеля  $L_{каб}$  на порядок меньше индуктивности обмоток ВН трансформатора. Максимальная амплитуда коммутационного импульса, в данном случае, определяется выражением:

$$U_{max} = I_m \cdot \sqrt{\frac{(L_{обм} + L_{каб})}{(C_{обм} + C_{каб})}} \quad (1.16)$$

На основании выражения (1.16) приходим к выводу, что коммутация трансформатора через кабельную линию определенной длины приводит к снижению амплитуды и крутизны коммутационных импульсов вследствие снижения общего волнового сопротивления системы. В результате происходит

снижение величины  $U_{max}$  и, как следствие, уменьшение числа повторных зажиганий дуги в камерах ВКА.

На рисунке 1.15 представлена зависимость кратности максимальных перенапряжений  $K_{П}$  на обмотках ВН трансформатора в зависимости от его мощности  $S_T$  и длины кабеля при срезе тока холостого хода  $i_{ср} \leq 5$  А [31, с. 102]. В данной работе показано, что при неизменной длине кабеля кратность коммутационных перенапряжений растет с мощностью трансформатора, т.к. из-за увеличения тока намагничивания трансформатора возрастает максимально возможный ток среза. Однако с увеличением мощности трансформатора также увеличиваются потери, связанные с перемагничиванием сердечника (потери ХХ), поэтому зависимость  $K_{П} = f(S_T)$  имеет нелинейный характер.

Увеличение длины кабеля, очевидно, снижает  $K_{П}$ , однако использование высоковольтного кабеля длиной 25 м и более в конструкции КТП с встроенным ВКА, в качестве устройства подавления коммутационных перенапряжений – нерационально.

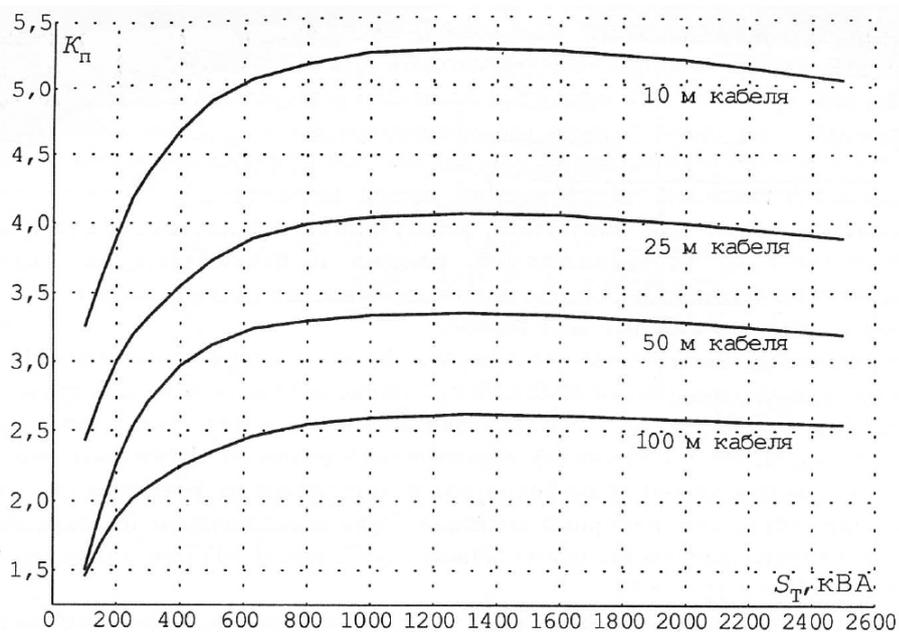


Рисунок 1.15 – Кратности максимальных перенапряжений  $K_{П}$  на обмотках ВН трансформатора в зависимости от его мощности  $S_T$  и длины кабеля (при срезе тока холостого хода  $i_{ср} \leq 5$  А).

### Резистивно-емкостные цепи (RC-цепи)

Подключение параллельно высоковольтным цепям силового трансформатора дополнительных RC-цепей также, как и подключение дополнительной кабельной линии, приводит к уменьшению общего волнового сопротивления системы. Из-за чего снижается максимально-возможное напряжение контура  $U_{max}$ . Также за счет снижения собственной резонансной частоты контура происходит снижение крутизны коммутационного импульса (скорость роста  $U_{max}$ ) в соответствии с выражениями (1.17):

$$U_{max} = I_m \cdot \sqrt{\frac{L_{обм}}{(C_{обм} + C_{пр})}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{обм} \cdot (C_{обм} + C_{пр})}} \quad (1.17)$$

Номинальное значение емкости присоединения  $C_{пр}$  выбирается исходя из допустимого уровня кратности КП, который зависит от электрической прочности изоляции электрооборудования, подверженного воздействию негативного фактора КП. В результате допустимые уровни кратности КП зависят от типа оборудования и напряжения питания электрической сети. Согласно ГОСТ 27863, допустимые кратности ограничения КП устройств защиты независимо от применяемого ВКА должны соответствовать, указанным в таблице 1.2 [90].

Таблица 1.2 – Допустимые кратности КП подземных электрических сетей угольных шахт

Тип оборудования	Допустимые кратности при напряжении сети, кВ				
	0,38	0,5; 0,66	1,0; 1,14	6,0	10,0
Коммутационные аппараты	7,3	5,2	4,0	4,8	4,4
Силовые трансформаторы	9,1	6,2	5,0	4,0	3,3

На рисунке 1.16 представлены различные схемы и способы присоединения RC-цепей к шахтной КТП, оснащенной ВКА [66, 67, 68, 70, 109].

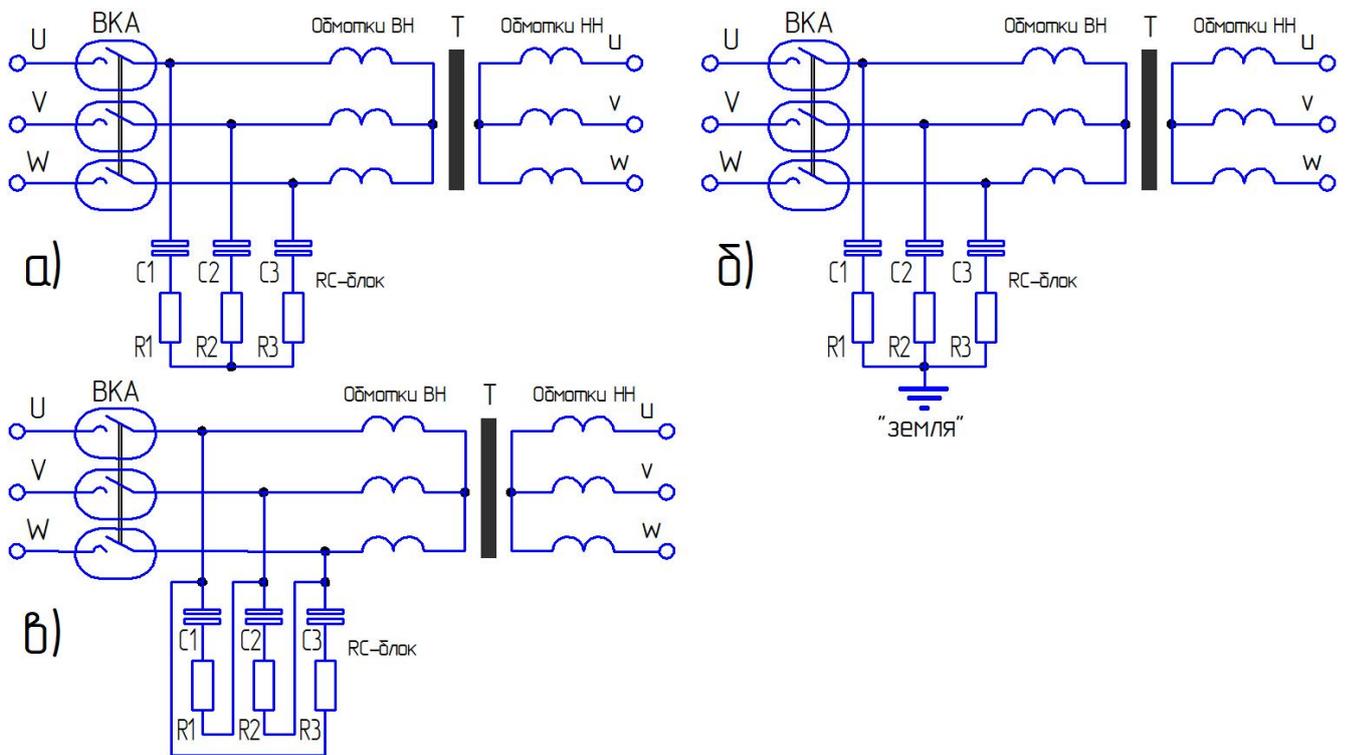


Рисунок 1.16 – Присоединение RC-цепей к обмоткам силового трансформатора:  
 а) звезда; б) звезда с заземленной общей точкой; в) треугольник

Каждая из представленных на рисунке 1.16 схем имеет собственные преимущества и недостатки. Параметры составных элементов RC-цепей для рисунка 1.16а составляют  $C1 - C3 = 0,25 \text{ мкФ}$ ,  $R1 - R3 = 50 \text{ Ом}$ , а для рисунка 1.16б –  $C1 - C3 = 0,125 \text{ мкФ}$ ,  $R1 - R3 = 50 \text{ Ом}$ . Из-за более низкой емкости  $C1 - C3$ , по массогабаритным критериям схема, представленная на рисунке 1.16б выгоднее, однако из-за наличия заземленной нейтральной точки, при работе в режиме однофазного замыкания на землю, такая схема создает дополнительный емкостной ток величиной до 400 мА, что негативно отражается на электробезопасности персонала, так как с ростом тока однофазного замыкания на землю увеличивается напряжение прикосновения.

Массовое использование RC-цепей с заземленной нейтральной точкой может привести к изменению режима нейтрали в сети 6 кВ с изолированного на компенсированный, а в сетях с компенсированным режимом нейтрали потребуется установка более мощных дугогасящих реакторов, что влечет дополнительные экономические затраты [94]. Согласно ПУЭ, допустимое

значение тока однофазного замыкания на землю в сетях 6 кВ не должно превышать 30 А, поэтому количество КТП, оборудованных RC-блоками по схеме рисунка 1.16б не должно превышать 15 – 20 шт., что гораздо меньше общего количества эксплуатируемых КТП шахты.

Кроме того, в схемах RC-блоков, соединенных в звезду (Рисунок 1.16а, б), через конденсаторы и резисторы протекает весь спектр токов высших гармоник, вследствие чего емкостное сопротивление фазной ветви RC-блока падает, а на резисторах возрастает мощность рассеяния, что при длительном воздействии, может вызвать термическое разрушение устройства [21, с.7].

Отличительной особенностью схемы, представленной на рисунке 1.16в, является соединение ветвей RC-блока в треугольник. Это позволяет исключить протекание гармонических токов кратных трем, повышая термическую устойчивость устройства к влиянию высших гармоник тока. Так как соединение RC-цепей по схеме треугольник, предполагает отсутствие гальванического контакта элементов схемы с «землей», то данная схемная конфигурация никак не влияет на ток однофазного замыкания на землю. Недостатком такой схемы являются повышенные массогабаритные показатели (в 1,5 – 2 раза выше, чем при соединении ветвей RC-блока в звезду), обусловленные необходимостью использования конденсаторов с повышенным максимально-допустимым напряжением [58, 102].

#### *Электростатическое экранирование обмоток трансформатора*

Для борьбы с высокочастотными электромагнитными колебаниями, возникающими в результате неравномерного распределения совокупных зарядов на входной емкости обмотки трансформатора  $C_{обм}$ , применяют специальные емкостные или электростатические экраны, представляющие собой металлизированные диски, разрезанные по радиусу во избежание образования КЗ витка и соединенные с началом обмотки, или с «землей». Данные диски предотвращают электромагнитные колебания, вызванные приходом внешней волны перенапряжений к концам обмотки, изменяя кривую начального

распределения напряжения по обмотке таким образом, чтобы приблизить её к кривой конечного распределения. Защищенные таким образом трансформаторы носят название нерезонирующих, т.к. они не вступают в резонанс с падающей внешней волной любой формы [14].

С точки зрения влияния на КП, входная емкость такого трансформатора оказывается увеличена в 10 – 20 раз, что в соответствии с выражением (1.12) приводит к повышению волнового сопротивления обмотки, оказывая эффект снижения максимальной амплитуды импульса КП.

Трансформаторы с подобной защитой в основном применяются в сетях напряжением 35 кВ и выше. Главным недостатком нерезонирующих трансформаторов являются повышенные потери КЗ и ХХ, вследствие увеличения габаритных размеров обмоток и магнитопровода, из-за чего использование данного метода снижения КП в конструкции шахтной КТП является нерациональным.

1.3.2 Анализ возможностей защиты трансформатора от коммутационных перенапряжений путем совершенствования конструкции коммутационного аппарата подстанции

Одним из перспективных направлений по защите электрооборудования от коммутационных перенапряжений является разработка специальных конструкций коммутационных аппаратов, характеризующихся малой величиной среза тока [111].

Коммутационный процесс со срезом тока характерен для коммутационных аппаратов любого типа (воздушных, маломасляных, вакуумных, элегазовых).

Причиной среза тока воздушных и маломасляных коммутационных аппаратов является развитие высокочастотных колебаний на спадающем участке синусоиды отключаемого тока. Эти колебания развиваются в контуре: емкость на шинах питания – нелинейное сопротивление дуги – индуктивность и емкость на шинах присоединения, которые налагаются на ток промышленной частоты 50 Гц,

что может вызвать явление, когда суммарный эквивалентный ток в дуговом промежутке перейдет через нуль, произведя его гашение со срезом [41].

В элегазовых коммутационных аппаратах основной причиной среза тока является интенсивное магнитное дутье, вызывающее значительное охлаждение плазмы в дуговом промежутке и, как следствие, быстрое уменьшение ее проводимости [4].

В вакуумных выключателях основной причиной возникновения среза тока является неустойчивость горения дуги при малых значениях тока, так как источником ее поддержания являются исключительно пары металла контактной группы [42].

Разработчики вакуумных камер первых вакуумных выключателей, изготовленных в начале 80-х г. XX века в СССР полагали, что применение в составе контактных групп вольфрама позволит снизить их эксплуатационный износ. Однако такие выключатели были способны создавать значительные (до 30 А) срезы тока. Это, в свое время, привело к значительному ущербу в результате пробоев изоляции электрооборудования в сетях напряжением 6 – 35 кВ [1].

В настоящее время снижение величины среза тока достигается за счет применения специальных материалов при производстве контактных групп вакуумных или элегазовых коммутационных аппаратов. В связи с этим наибольшее практическое применение нашел контактный материал CuCr, который, в отличие от других контактных материалов, значительно их превосходит по параметрам: отключающей способности; восстановлению диэлектрической прочности промежутка между контактами; устойчивости к эрозии; срезу тока при его переходе через нуль и переходному сопротивлению контактов в течении всего срока службы. Контактные группы, изготовленные на базе CuCr, имеют величину среза тока не более 5А и пригодны почти для всех коммутационных задач [45].

Перспективным является поиск химического состава контактных групп для улучшения коммутационных характеристик вакуумных и элегазовых коммутационных аппаратов. В работе [31, с.14–17] представлены результаты

исследований свойств контактных групп коммутационных аппаратов при их легировании различными химическими элементами. Например, добавка в состав контактов 0,1 – 4% теллура уменьшает их эрозию, введение 2 – 15% висмута уменьшает срез тока, а добавка 0,11 до 1,8% углерода снижает содержащийся в металле контактов кислород. Для улучшения других коммутационных характеристик в состав контактов вводят: вольфрам, кремний, цирконий, сурьму и другие химические элементы.

### 1.3.3 Управление коммутацией фазных обмоток высшего напряжения трансформатора подстанции, как фактор ограничения коммутационных перенапряжений

Управляемая (синхронная) коммутация – это коммутация электрической сети в определенный момент времени, производимая с учетом состояния сети на момент операции, позволяющая произвести включение или отключение в наиболее благоприятных для оборудования условиях. Синхронный коммутационный аппарат, реализующий принципы управляемой коммутации, представляет собой устройство, контакты которого размыкаются в заданную фазу тока и (или) замыкаются в заданную фазу напряжения [46, с.12–13].

Применительно к объекту «ВКА – трансформатор», управляемое отключение осуществляется путем размыкания каждой фазы контактов ВКА отдельно, в строго определенный момент времени с опережением момента перехода отключаемого тока через нуль. Данный процесс описывается выражением (1.11) при условии, когда начальная фаза  $\varphi_0$  в момент коммутации принимает околонулевые значения на ниспадающем участке синусоиды. Время горения дуги в этом случае значительно сокращается, так как количество энергии, выделяющейся в дуге, уменьшается. В идеальных условиях отключения (при  $\varphi_0 = 0^\circ$ ), выражение (1.11) принимает вид:  $U_{max} = U_m$ , т.е. максимально-возможные перенапряжения системы не превышают амплитудной величины напряжения сети.

В синхронном ВКА необходимо очень точно подать сигнал на размыкание и создать очень большую скорость движения контактов, чтобы к моменту погасания электрической дуги расстояние между контактами было достаточным для обеспечения необходимой электрической прочности промежутка и исключения возможности повторного зажигания дуги. Точность подачи импульса на отключение определяется синхронизирующим устройством, а большая скорость движения контактов создается специальным приводом.

На рисунке 1.17 представлен принцип управляемого отключения одной фазы высоковольтного коммутационного аппарата [94, с.31–32].

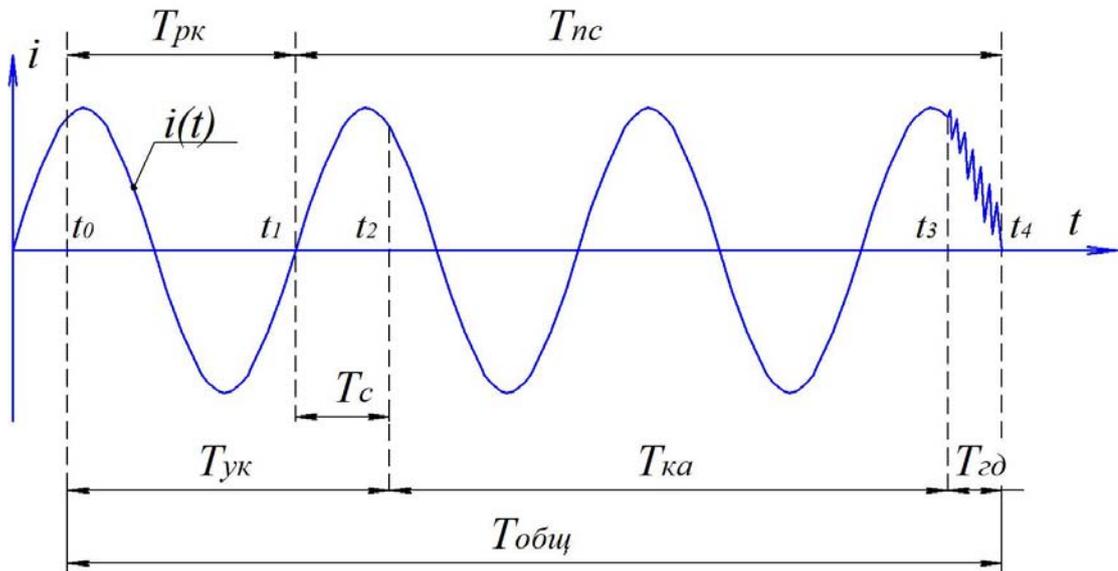


Рисунок 1.17 – Временная диаграмма управляемого отключения фазы ВКА

На устройство синхронизации в случайный момент времени  $t_0$  подается команда на отключение ВКА. Эта команда задерживается на некоторый промежуток времени  $T_{ук}$ , который, в соответствии с выражением (1.18), представляет собой сумму времени реакции устройства синхронизации  $T_{рк}$  и преднамеренной задержки времени синхронизации  $T_c$ .

$$T_{ук} = T_{рк} + T_c \quad (1.18)$$

Интервал времени  $T_c$ , рассчитываемый в соответствии с (1.19) относительно определенного момента перехода тока через нуль  $t_1$ , зависит от собственного времени отключения коммутационного аппарата  $T_{ка}$  и времени горения дуги в межконтактном промежутке  $T_{зд}$ .

$$T_c = T_{nc} - (T_{ка} + T_{зд}) \quad (1.19)$$

Собственное время отключения  $T_{ка}$ , является интервалом времени между подачей питания на катушку привода (момент времени  $t_2$ ) и началом расхождения контактов коммутационного аппарата (момент времени  $t_3$ ). В момент времени  $t_4$  обеспечивается необходимая электрическая прочность межконтактного промежутка.  $T_{nc}$  – интервал времени, необходимый для достижения положительного значения синхронизации.

В работе [46, с.13] представлены результаты разработки альтернативных алгоритмов коммутации ненагруженного трансформатора, позволяющие существенно снизить количество повторных зажигания и уменьшить уровень КП при его отключении. Установлено, что для системы с изолированной нейтралью необходимо одновременно произвести коммутацию двух фаз, а затем, через 90 электрических градусов произвести коммутацию третьей фазы. Также возможен вариант коммутации одной фазы при прохождении её тока через нуль, с последующей коммутацией остальных двух фаз с временной задержкой в 90 электрических градусов.

Одним из представителей устройств, полностью реализующего технологию управляемой коммутации в сетях 6(10) кВ, является синхронный вакуумный выключатель типа EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000 УЗ [94, с.44]. Этот выключатель является универсальным и реализует синхронную коммутацию любого вида нагрузки на принципах, представленных на рисунке 1.17.

Основным достоинством снижения КП при помощи способа управляемой коммутации является его универсальность, т.е. независимость от параметров объекта

коммутации. Недостатком – сложность конструкции, а также необходимость поддержания стабильности временных характеристик механических приводов вакуумных камер в течении длительного эксплуатационного периода в широком диапазоне рабочих климатических факторов.

1.3.4 Управление переходным колебательным процессом в структуре «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», как способ воздействия на коммутационные перенапряжения

На основании выражений (1.6–1.11) очевидно, что если во время переходного процесса искусственным путём увеличить потери в трансформаторе и эти потери будут достаточно велики, то переходной процесс может стать аperiodическим с одновременным ограничением амплитуды коммутационного импульса. На рисунке 1.18 представлен график коммутационного процесса в обмотках трансформатора при различных коэффициентах затухания  $\beta$ .

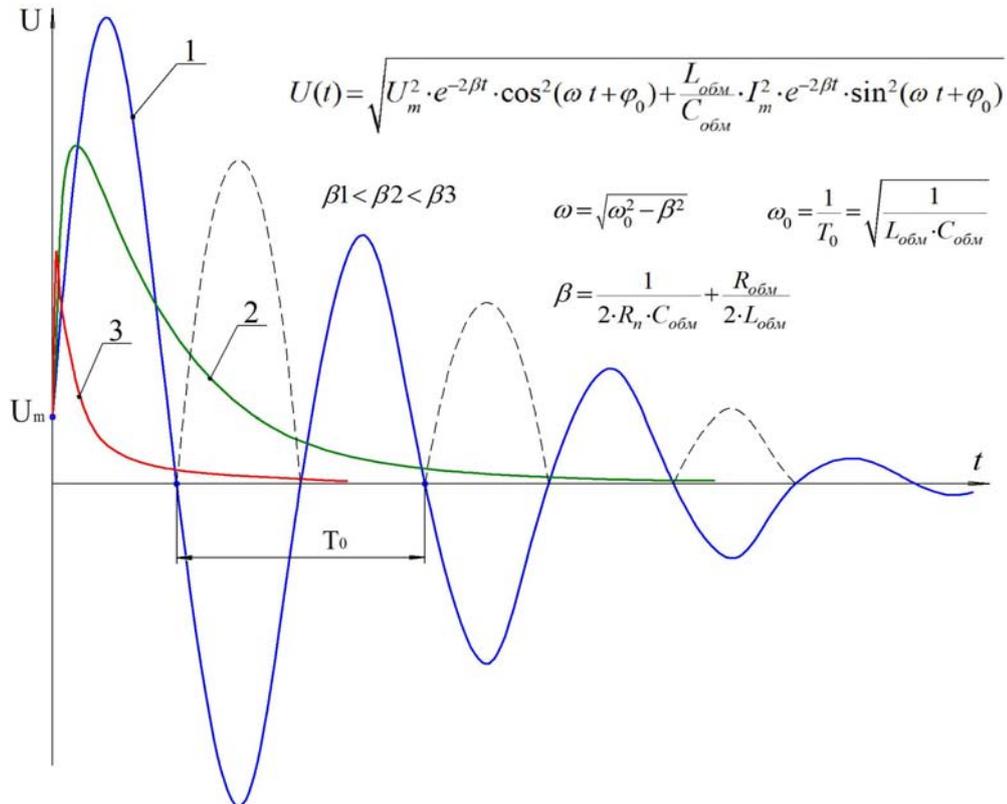


Рисунок 1.18 – График коммутационного процесса в обмотках трансформатора при различных коэффициентах затухания  $\beta$

Кривые 1, 2, 3, представленные на рисунке 1.18, характеризуются коэффициентами затухания соответственно  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\beta_3$ , причем  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$ . На основании выражения (1.9) очевидно, что наиболее рациональным способом увеличить коэффициент затухания  $\beta$  является снижение величины сопротивления  $R_n$ , для чего достаточно, в соответствии со схемой (Рисунок 1.12), подключить параллельно обмотке трансформатора дополнительное активное сопротивление (резистор).

Однако на таком резисторе в процессе работы КТП будет выделяться значительная мощность, поэтому шунтирование должно осуществляться только в период коммутационного процесса особым шунтирующим устройством, работающим по специальному алгоритму.

Данный эффект представляется целесообразным использовать в основе функционирования системы автоматического ограничения перенапряжений (САОП) КТП [36, 93]. Разработка принципа функционирования САОП в комплексе «ВКА – силовой трансформатор КТП» представлены в главе 3.

#### 1.4 Обзор исследований и разработок в области автоматизации технологических объектов и процессов в контексте расширения функций и повышения ресурса трансформаторной подстанции участка шахты

Исследования и разработки в области автоматизации шахтных участков КТП, в первую очередь, связаны с вопросами безопасности ведения горных работ. В сложных горногеологических условиях современных угольных шахт большая доля вопросов безопасности решается с применением организационно-технических мероприятий, где база надёжности возлагается на «человеческий фактор» (компетентность и сознательность рабочих и горных инженеров). Однако именно этот фактор зачастую является «слабым звеном» в системе организации безопасного труда на угольном предприятии.

В связи, с чем ставится вопрос сведения к минимуму влияния поведения людей на безопасность угледобычи. Это может быть достигнуто с помощью

введения автоматических, полуавтоматических и автоматизированных систем подземными технологическими процессами и создания единой АСУТП шахты с возможностью контроля технологических процессов горным диспетчером.

Концепция такого развития и требования, предъявляемые к горношахтному оборудованию различного уровня, сформулированы в [9]. Шахтная участковая комплектная трансформаторная подстанция, в соответствии с указанной концепцией, должна также отвечать определенным условиям, позволяющим ей эффективно функционировать в качестве составного элемента АСУТП шахты.

В работе [17] произведен анализ основных принципов построения и алгоритм функционирования шахтной трансформаторной подстанции нового поколения в структуре технологического комплекса шахты, оснащённого системой АСУТП на базе цифровых микропроцессорных технологий.

На рисунке 1.19 представлена структурная схема защит, управления и контроля такой подстанции, выполненной на основе цифровых микроконтроллерных блоков защит и контроля параметров.

Изначально предполагается, что силовая часть подстанции состоит из разъединителя, высоковольтного автоматического выключателя, силового трансформатора мощностью 1000 кВ·А и трёх отходящих присоединений низшего напряжения, каждое из которых снабжено силовым контактором.

Каждый коммутационный аппарат КТП снабжён собственным независимым микропроцессорным блоком защиты, управления и контроля, которые соединены в общую внутреннюю сеть обмена информацией. Координация схемы выполнена при помощи внутреннего терминала подстанции, оснащённого дисплеем и клавиатурой. Через терминал также осуществляется вход в систему АСУТП шахты и связь с горным диспетчером.

Размещение узлов, блоков и датчиков схемы защит, управления и контроля подстанции нового поколения в отсеках корпуса подстанции представлено на рисунке 1.20.

Перечень функций, выполняемых схемой автоматизированной КТП, представлен ниже.

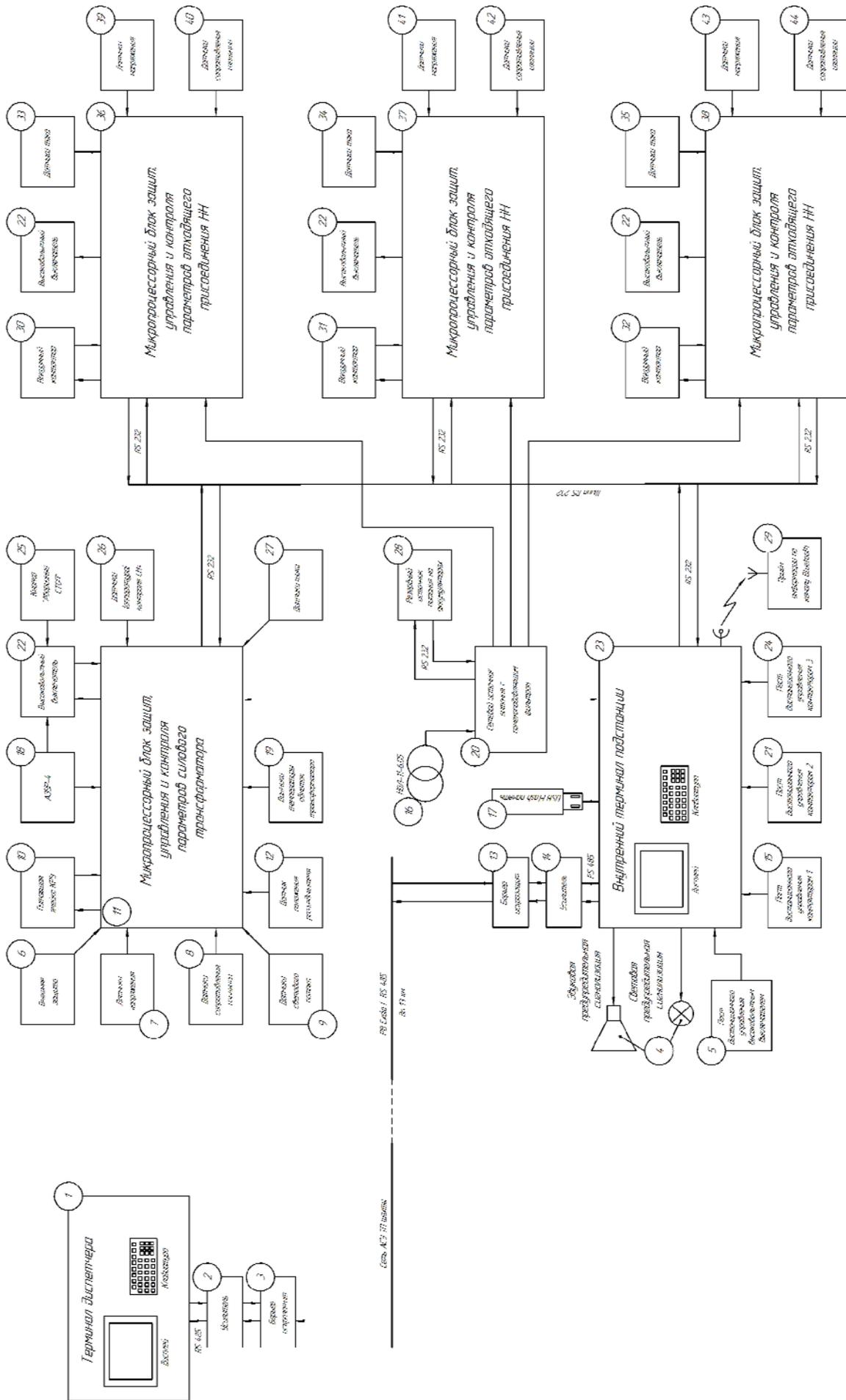


Рисунок 1.19 – Структурная схема управления и контроля автоматизированной шахтной участковой КТП

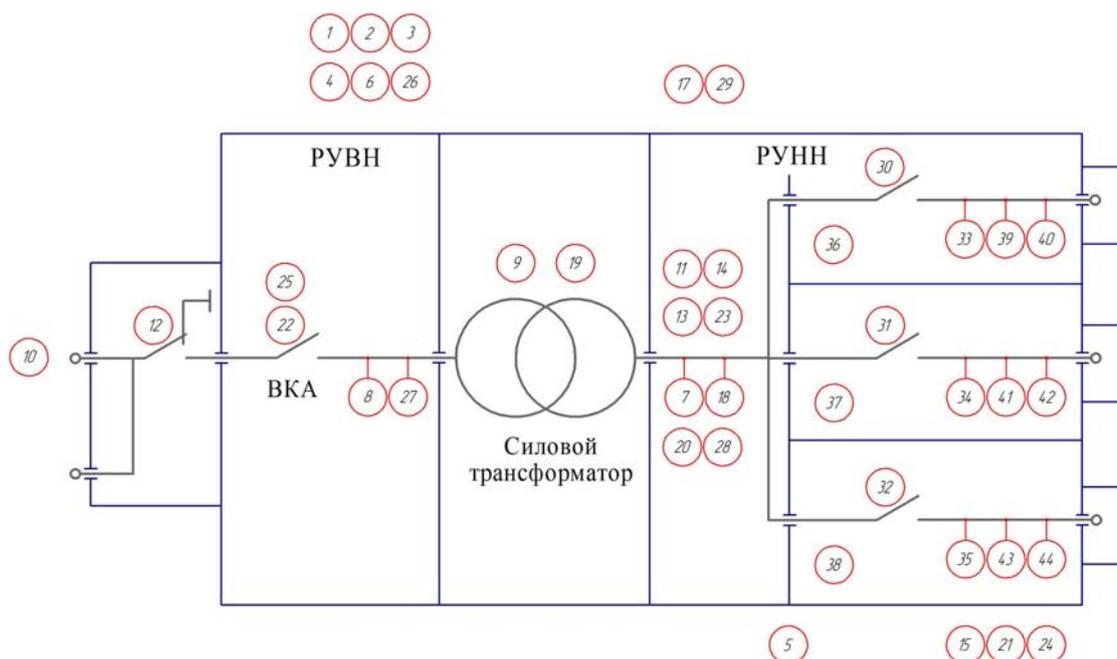


Рисунок 1.20 – Схема размещения узлов, блоков и датчиков в отсеках корпуса подстанции: 1 – терминал диспетчера; 2, 14 – усилитель мощности сигнала передаваемых данных; 3, 13 – барьер искрозащиты; 4 – устройства звуковой и световой предупредительной сигнализации; 5 – пост дистанционного управления высоковольтным выключателем; 6 – Устройство (датчик) внешней защиты; 7, 39, 41, 43 – датчики напряжения трёхфазной сети; 8 – датчик сопротивления изоляции обмотки ВН; 9 – датчики светового потока; 10 – питающая ячейка КРУ; 11 – микропроцессорный блок защит, управления и контроля параметров силового трансформатора; 12 – датчик положения ножей разъединителя; 15, 21, 24 – посты дистанционного управления контакторами; 16 – трансформатор напряжения 6000/127В; 17 – внешняя USB Flash память; 18 – аппарат защиты от утечек тока на землю типа АЗУР.МК; 19 – датчики измерения температуры обмоток силового трансформатора; 20 – сетевой источник питания с помехоподавляющим фильтром; 22 – высоковольтный вакуумный выключатель; 23 – внутренний терминал подстанции; 25 – аварийная кнопка «СТОП»; 26 – аппаратура газовой защиты; 27, 33, 34, 35 – датчики тока; 28 – резервный источник питания на аккумуляторах; 29 – устройство приёма информации по каналу Bluetooth; 30, 31, 32 – вакуумные контакторы; 36, 37, 38 – микропроцессорный блок защит, управления и контроля параметров отходящего присоединения НН; 40, 42, 44 – датчики сопротивления изоляции в сети НН.

Перечень функций, выполняемых схемой защит, управления и контроля автоматизированной шахтной участковой КТП:

1. Защита от междуфазных коротких замыканий (МТЗ) в силовом трансформаторе и каждом из отходящих присоединений НН;
2. Селективная защита от пусковых токов недопустимой продолжительности подстанции и отдельных отходящих присоединений НН;
3. Селективная токовая защита от перегрузки каждого из отходящих присоединений НН;
4. Селективная защита от асимметрии фаз (обрыв фаз) в подстанции и каждом из отходящих присоединений НН;
5. Защита от подачи напряжения на силовой трансформатор с низким сопротивлением изоляции обмоток высшего напряжения;
6. Селективная защита от подачи напряжения на отходящие присоединения НН с низким сопротивлением изоляции;
7. Защита от возникновения световых явлений внутри оболочки с трансформатором (электрическая дуга, продолжительный разряд, горение);
8. Защита от исчезновения напряжения в питающей сети либо его снижение ниже допустимой нормы (нулевая защита);
9. Двухуровневая тепловая защита силового трансформатора от перегрузки;
10. Защита от сваривания силовых контактов вакуумных коммутационных аппаратов (контроль цепи коммутационных аппаратов РУВН и РУНН);
11. Защита от утечек тока на землю в сети НН и обмотке НН трансформатора;
12. Защита персонала от поражения электрическим током в сети НН и ЭДС выбега электродвигателя;
13. Отключение подстанции от внешних защит (аппаратуры газовой защиты и др.);
14. Отключения ячейки КРУВ при отказе высоковольтного выключателя (УРОВ);
15. Однократное автоматическое повторное включение высоковольтного выключателя при срабатывании МТЗ любого из отходящих присоединений или аппарата защиты от утечек АЗУР.МК;

16. Контроль сопротивления заземления подстанции и дополнительного заземлителя (ДЗ);
17. Резервирование по питанию системы диагностики, индикации и передачи информации;
18. Автоматический контроль исправности схемы, каналов дистанционного управления коммутационными аппаратами и канала передачи информации;
19. Возможность дистанционного и местного управления подстанцией, а также приём команд с ПЭВМ поста горного диспетчера;
20. Измерение, запись и хранение в энергонезависимой памяти в режиме реального времени следующих величин:
  - фазных токов;
  - фазных и линейных напряжений;
  - коэффициента мощности;
  - активной, реактивной и полной мощности;
  - активной, реактивной и полной потреблённой электроэнергии;
  - сопротивления изоляции в сети ВН и НН;
  - количество срабатываний (коммутационный ресурс) и текущее состояние коммутационных аппаратов подстанции;
  - количество срабатываний и текущее состояние каждой из защит, в том числе защиты от утечек тока, реализуемой внешним устройством АЗУР.МК;
22. Передача содержимого энергонезависимой памяти блока на внешнюю Flash память через USB соединение и соединение Bluetooth, а также в сеть АСУТП шахты и горному диспетчеру на поверхность;
23. Управление внешними устройствами звуковой и световой предупредительной сигнализации;
24. Автоматический анализ и отображение на дисплее в графическом и символьном режимах состояния электрической схемы подстанции и параметров электрической сети участка;
25. Многоуровневый доступ в систему по индивидуальному паролю.

Таким образом, общая концепция в области автоматизации технологических объектов и процессов в контексте расширения функций и повышения ресурса трансформаторной подстанции участка шахты предусматривает обязательное использование встроенного в распределительное устройство высшего напряжения подстанции высоковольтного коммутационного аппарата. Однако функция подавления коммутационных перенапряжений в структуре данной концепции возложена на штатные (поставляемые совместно с коммутационными аппаратами) средства, в подавляющем большинстве случаев, представляющие нелинейные ограничители перенапряжений или варисторы, отмеченные низкой эффективностью в данных условиях.

В связи с этим, приобретает актуальность дополнение вышеупомянутой концепции эффективными техническими средствами управления процессом подавления коммутационных перенапряжений для обеспечения безаварийного функционирования комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции.

### 1.5 Выводы по главе 1. Обоснование цели и задач исследования

1. Анализ особенностей эксплуатации шахтных КТП в составе электротехнического комплекса шахты показал неоспоримые преимущества КТП, оснащенных ВКА, по сравнению с КТП традиционной конструкции, в части повышения надежности и безопасной эксплуатации электрооборудования участка, а также организации рациональной схемы электроснабжения участка шахты, с несколькими КТП.

2. Присутствие в непосредственной близости от силового трансформатора ВКА, обуславливает возможность воздействия опасных коммутационных перенапряжений на некоторые элементы электрической схемы КТП, а также на главную и продольную изоляцию обмоток силового трансформатора.

3. Результаты опытной эксплуатации КТП содержащей комплекс «ВКА – трансформатор» в условиях угольной шахты подтвердили, что соотношение активно-реактивных параметров такой системы и наличие факторов, ограничивающих дугообразование в выключателе, способствуют созданию амплитуд импульсов перенапряжений, достаточных для пробоя изоляции обмотки ВН трансформатора. Эффективность работы нелинейных ограничителей перенапряжений типа ОПН-КР/TEL-6/6,9 и аналогичных, в конструкциях трансформаторных подстанций, содержащих комплекс «ВКА – трансформатор» следует признать неудовлетворительной.

4. Существующие в настоящее время методы и технические средства снижения КП при коммутации трансформаторов с помощью ВКА, встроенного в РУВН КТП, в полной мере не решают поставленной задачи, т.к. зависят от различных параметров отключаемого объекта, многие из которых носят вариативный, вероятностный характер, что обуславливает необходимость совершенствования устройств снижения коммутационных перенапряжений. Одним из наиболее перспективных методов снижения коммутационных перенапряжений для объекта «ВКА – трансформатор», по мнению автора, является метод подавления колебательного переходного процесса в обмотках трансформатора при помощи предварительного шунтирования его обмоток активными сопротивлениями в течение времени коммутационного процесса. Предполагается, что указанный метод будет реализован на основании функционирования системы автоматического ограничения перенапряжений в структуре шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции.

Данным обстоятельством обусловлена цель исследования – совершенствование системы управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты посредством научного обоснования структур, алгоритмов функционирования и практической реализации технических средств, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор».

Для достижения этой цели должны быть решены следующие задачи:

- анализ проблемных вопросов эксплуатации шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции, оснащенной высоковольтным коммутационным аппаратом, встроенным в распределительное устройство высшего напряжения;

- исследование свойств коммутационных процессов, возникающих в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», в том числе, при использовании применяющихся в промышленности технических средств ограничения перенапряжений;

- обоснование способа снижения коммутационного перенапряжения в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» на основе управляемого шунтирования обмоток силового трансформатора шахтной участковой трансформаторной подстанции активными и активно-реактивными сопротивлениями на интервале существования коммутационного процесса;

- разработка исследовательских стендов, программ, методики и выполнение экспериментальных исследований коммутационных процессов в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции, в том числе при использовании обоснованных способов управляемого шунтирования обмоток трансформатора активными и активно-реактивными сопротивлениями;

- алгоритмизация процесса и разработка схемных решений управляемого ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции.

## ГЛАВА 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
И ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРЕ  
ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ, ОСНАЩЁННОЙ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ КОММУТАЦИОННЫМ АППАРАТОМ

Объектом исследования являются электромагнитные процессы, протекающие в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной комплектной трансформаторной подстанции, обусловленные коммутацией в цепи обмотки высшего напряжения и электродинамическими свойствами трансформатора.

Полный исследовательский цикл включает в себя: обоснование программы и методики экспериментальных исследований, разработка и изготовление исследовательского стенда, проведение испытаний и обработка полученных результатов.

## 2.1 Обоснование программы и методики экспериментальных исследований

Программа исследований предполагает проведение осциллографирования переходных процессов фазного напряжения в обмотке ВН (фаза В) силового трансформатора при его включении и отключении в режиме ХХ вакуумными и элегазовыми контакторами. Программа исследований представлена в таблице 2.1.

Согласно [6], природа КП, возникающих при включении трансформатора та же, что и при отключении. Процесс описывается выражением (1.1) и объясняется явлением так называемого «дребезга» силовой контактной группы коммутационного аппарата. При включении контакты этого коммутационного аппарата, обладая свойством упругости, многократно замыкаются и размыкаются, прежде чем замкнуться окончательно. При этом электрические импульсы КП при размыкании контактной группы, проявляют себя в виде энергии электрического поля, которая успела накопиться в реактивных элементах  $L_{обм}$  и  $C_{обм}$  трансформатора за время предыдущего подключения к источнику напряжения.

Исследованием [108] установлено, что амплитуды импульсов КП при включении трансформатора в режиме ХХ, как правило, оказываются ниже таковых при его отключении.

Таблица 2.1 – Программа исследований

Наименование (вид) исследования	Наименование средства снижения КП	Количество опытов
Осциллографирование фазного (фаза В) напряжения в обмотке ВН силового трансформатора при его <i>отключении</i> в режиме ХХ вакуумным и элегазовым контакторами	Без средств снижения	50 для каждого из условий коммутации
	ОПН на стороне ВН	
	РС-блок	
	$R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$	
	$R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	
Осциллографирование фазного (фаза В) напряжения в обмотке ВН силового трансформатора при его <i>включении</i> в режиме ХХ вакуумным и элегазовым контакторами	Без средств снижения	
	ОПН на стороне ВН	
	РС-блок	
	$R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$	
	$R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	

Поскольку значения сопротивлений шунтирующих резисторов  $R_{шВН}$  и  $R_{шНН}$  зависят от большого числа параметров, а именно: максимальной рассеиваемой мощности резисторов, времени их подключения к напряжению сети, максимальной энергии, которую способен аккумулировать трансформатор, а также от коммутационной способности коммутаторов К1 и К2, то на данном этапе исследований сопротивления резисторов  $R_{шВН}$  и  $R_{шНН}$  выбраны, исходя из условия (2.1):

$$t_R \leq (t_o + t_{np}) \quad (2.1)$$

где  $t_R$  – температура шунтирующих сопротивлений;  $t_o$  – температура окружающей среды;  $t_{np} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  – допустимое превышение температуры.

Искомые параметрами в ходе экспериментов являются максимальные амплитуды импульсов КП и вероятности возникновения различных кратностей

КП в процессе коммутации QF1. Под кратностью КП понимается отношение максимальной амплитуды напряжения коммутационного импульса за период коммутационного процесса к амплитудному значению напряжения питания [30, с.5]. Результаты экспериментов обобщаются и обрабатываются согласно базовым положениям теории эксперимента [88].

## 2.2 Разработка схемы и компоновки исследовательского стенда

С целью фиксации и измерения электрических параметров в комплексе «ВКА – трансформатор», обусловленных коммутационными процессами, разработан стенд [35], структура которого представлена на рисунке 2.1.

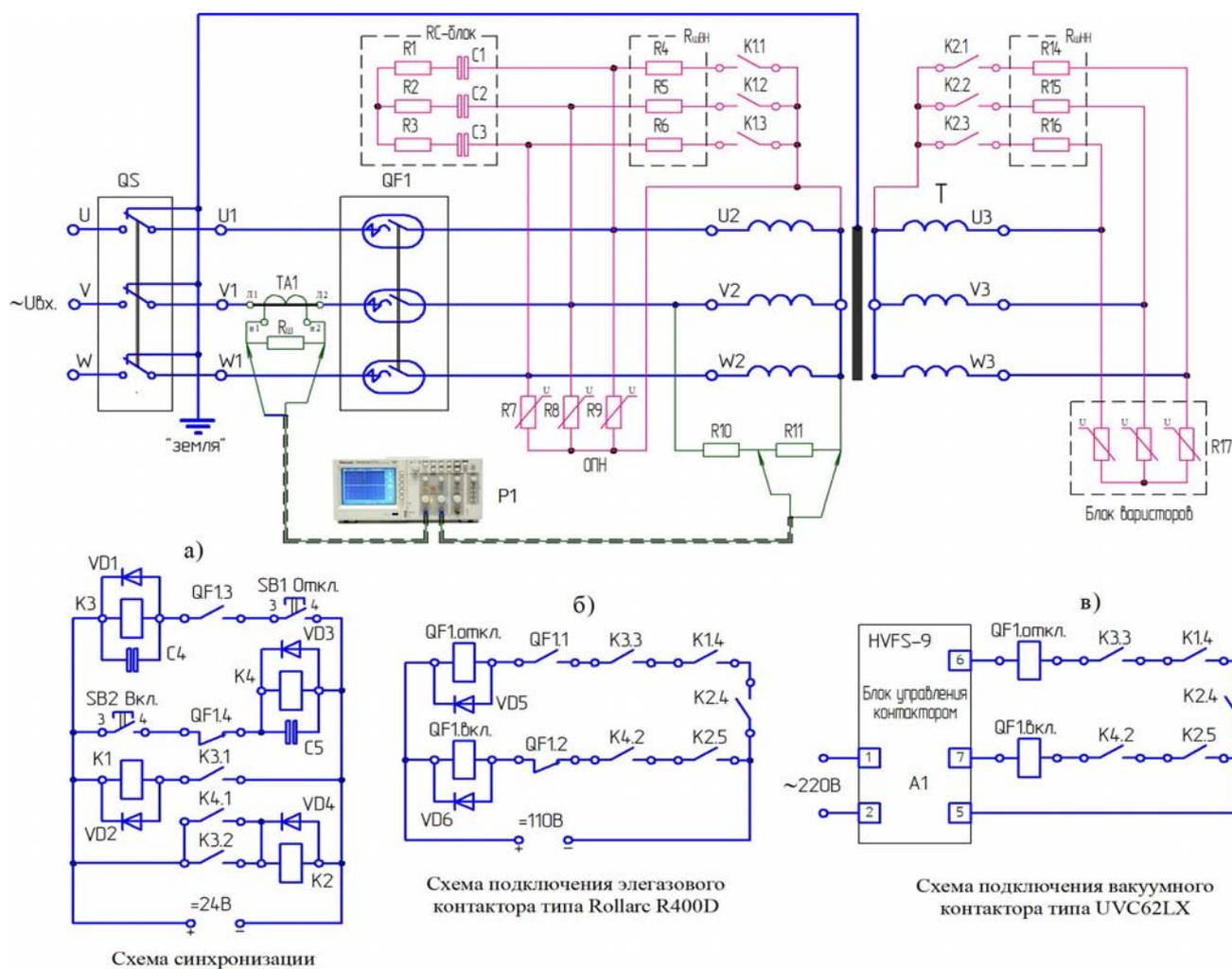


Рисунок 2.1 – Схема электрическая принципиальная стенда исследований электромагнитных коммутационных процессов в комплексе «ВКА – трансформатор» шахтной участковой КТП

Внешний исследовательского стенда представлен на рисунке 2.2, а перечень структурных элементов, входящих в его состав – в таблице 2.2.

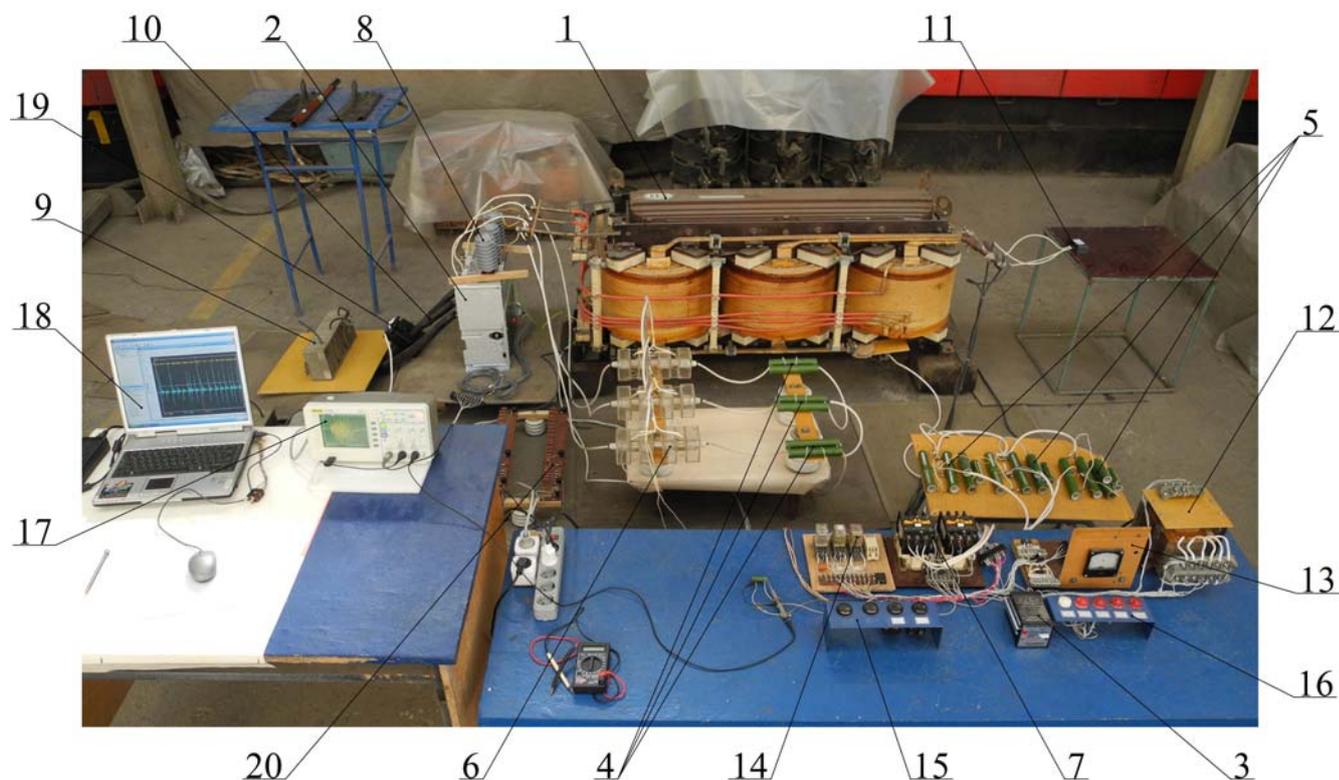


Рисунок 2.2 – Общий вид исследовательского стенда

Таблица 2.2 – Перечень структурных элементов исследовательского стенда

№ п.п.	Наименование элемента, тип	Обозначение на электрической схеме (рис.2.1)	Обозначение на схеме общего вида (рис.2.2)
1	Силовой трансформатор ТНЕВ 5639 $S_{\text{H}} = 400 \text{ кВА}$ , $U_{\text{H}} = 6/1,05 \text{ кВ}$	T	поз.1
2	ВКА: - вакуумный контактор UVC62LX1 [15] - элегазовый контактор Rollarc R400D [40]	QF1	поз.2
3	Блок управления вакуумным контактором HVFS-9	A1	поз.3
4	Шунтирующие сопротивления фазных обмоток ВН ( $R_{\text{шВН}} = 16,5 \text{ кОм}$ )	R4, R5, R6	поз.4
5	Шунтирующие сопротивления фазных обмоток НН ( $R_{\text{шНН}} = 46 \text{ Ом}$ )	R14, R15, R16	поз.5
6	Высоковольтный коммутатор, выполненный на базе высоковольтных герконов типа МКА-40142	K1	поз.6

## Продолжение таблицы 2.2

№ п.п.	Наименование элемента, тип	Обозначение на электрической схеме (рис.2.1)	Обозначение на схеме общего вида (рис.2.2)
7	Магнитный пускатель типа ПМЛ-63	K2	поз.7
8	Ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН-П-6/7,2/10/400 УХЛ1	R7, R8, R9	поз.8
9	RC-блок (параметры ветви: $R = 50 \text{ Ом}$ , $C = 0,25 \text{ мкФ}$ )	R1, R2, R3, C1, C2, C3	поз.9
10	Питающий высоковольтный кабель	-	поз.10
11	Блок варисторов 1200 В	R17	поз.11
12	Трансформатор собственных нужд	-	поз.12
13	Блок выпрямителей	-	поз.13
14	Реле включения и отключения коммутационного аппарата QF1	K3, K4	поз.14
15	Кнопки управления	SB1, SB2	поз.15
16	Индикаторы состояния коммутационного устройства	-	поз.16
17	Цифровой осциллограф Rigol DS1052	P1	поз.17
18	Ноутбук	-	поз.18
19	Трансформатор тока типа УТТ-5 600/5 А с шунтирующим резистором $R_{ш} = 2,4 \text{ Ом}$	TA1	поз.19
20	Пассивный делитель напряжения 1:20, 1:50, 1:100	R10, R11	поз.20

Элементы подавления коммутационных перенапряжений, состоящие из RC-блока, шунтирующих сопротивлений  $R_{шВН}$  и  $R_{шНН}$ , ОПН и блока варисторов включаются в схему поочередно, для получения результатов эффективности работы каждого из них по отдельности. Для снижения выделяемой мощности на шунтирующих резисторах, предусмотрена специальная схема синхронизации, которая выполняет их подключение к обмоткам трансформатора только в момент коммутации коммутационного аппарата QF1.

Схема синхронизации работает следующим образом. При нажатии на кнопку SB2 включается реле K4, которое своим контактом K4.1 включает коммутатор K2. Коммутационный аппарат QF1 включится тогда, когда реле K4 и коммутатор K2 будут также находиться во включенном состоянии (блок-контакты K4.2 и K5.2 должны быть замкнуты). Включившись, QF1 своим блок-контактом QF1.4 разрывает цепь питания реле K4 которое, в свою очередь, отключает коммутатор

К2. QF1 остается во включенном состоянии, удерживаемый механической защелкой. Процесс отключения QF1 происходит аналогичным образом после нажатия на кнопку SB1. Различия между процессами включения и отключения состоят лишь в том, что при отключении шунтируется не только вторичная, но и первичная обмотка трансформатора, используя в алгоритме работы коммутатор К1. Диоды VD1 – VD6 подавляют обратную ЭДС самоиндукции катушек реле, устраняя помехи в измерительной цепи. Конденсаторы С4 и С5 используются для временной задержки, чтобы отключение коммутаторов К1 и К2 происходило только после завершения переходного процесса.

Фиксация переходных процессов выполняется посредством цифрового осциллографа Rigol DS1052E, через делитель напряжения, выполненный на резисторах R10, R11.

### 2.3 Исследование коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в условиях применения различных средств ограничения перенапряжений

В ходе проведения экспериментов в соответствии с программой исследований получено более 1000 осциллограмм коммутационных перенапряжений для различных условий коммутации, численные значения амплитуд которых представлены в приложении Г. Указанный материал позволил выявить закономерности и определить условия наибольшего и наименьшего благоприятствования для возникновения максимальных значений кратностей КП в комплексе «ВКА – трансформатор».

На рисунках 2.3 и 2.4 представлены характерные осциллограммы КП при отключении трансформатора, соответственно, элегазовым и вакуумным контактором.

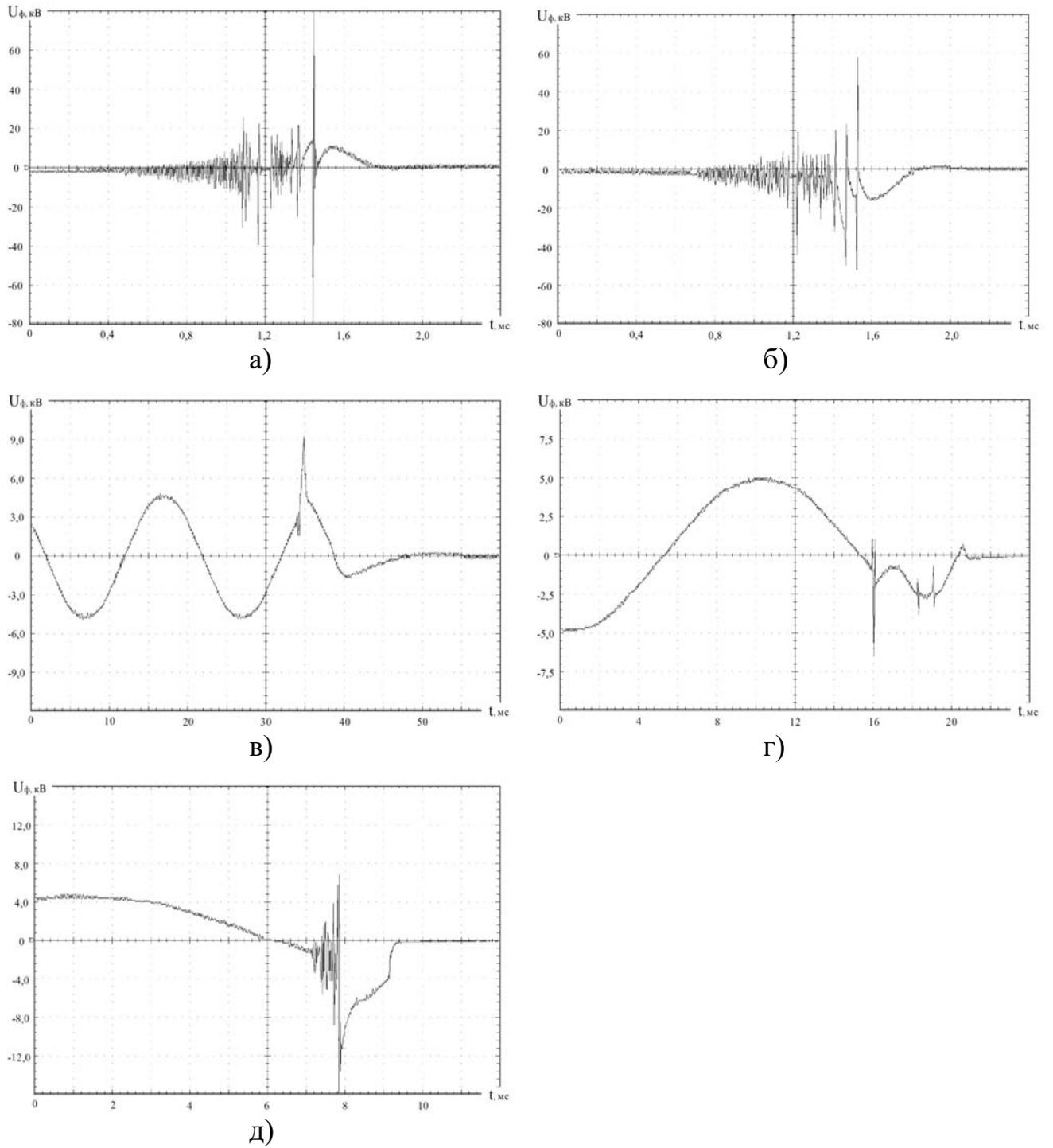


Рисунок 2.3 – Осциллограммы КП при *отключении* трансформатора элегазовым контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$  и  $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$

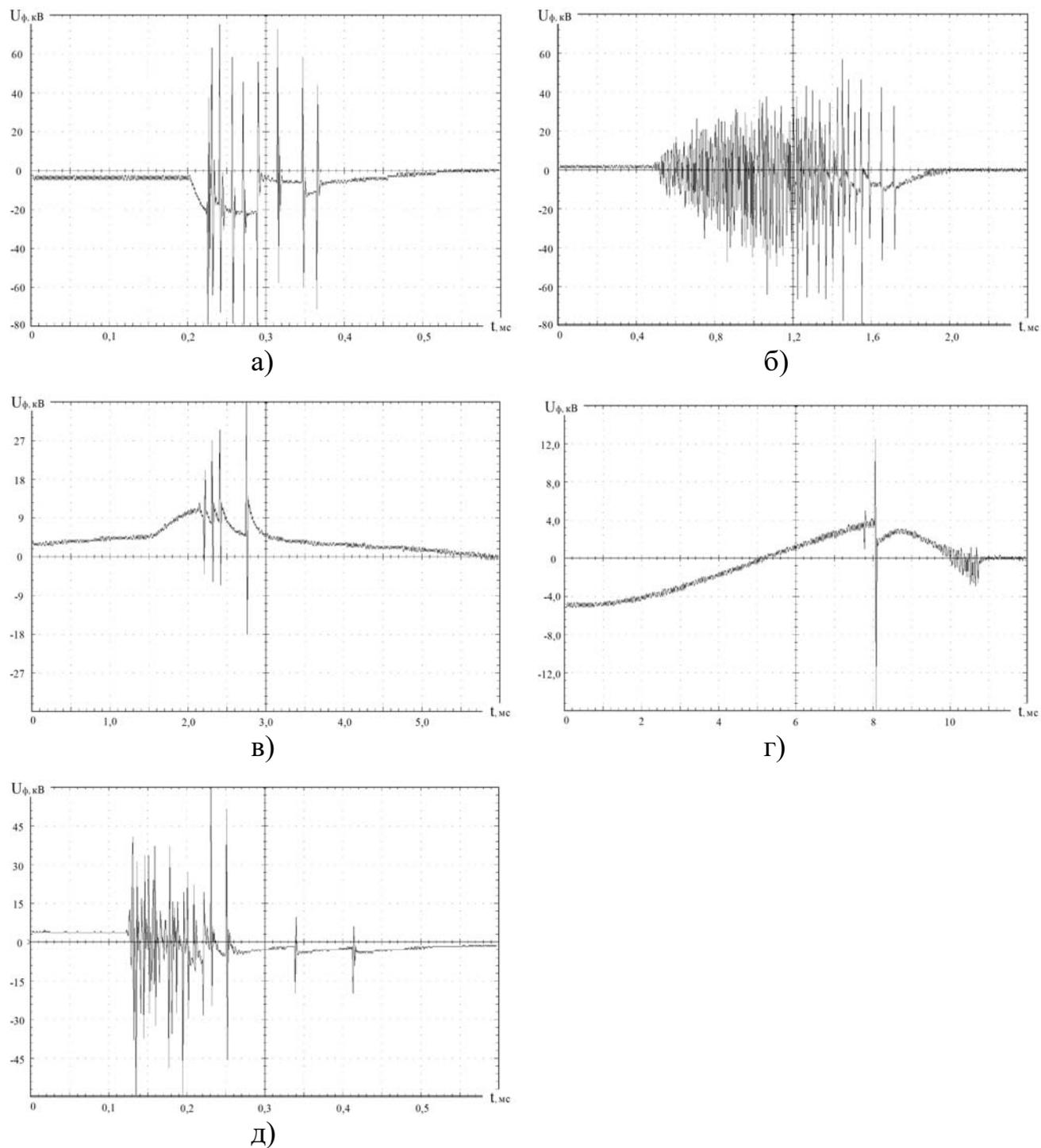


Рисунок 2.4 – Осциллограммы КП при *отключении* трансформатора *вакуумным* контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шНН} = 46$  Ом и  $R_{шВН} = 16,5$  кОм

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены характерные осциллограммы КП при включении трансформатора, соответственно, элегазовым и вакуумным контактором.

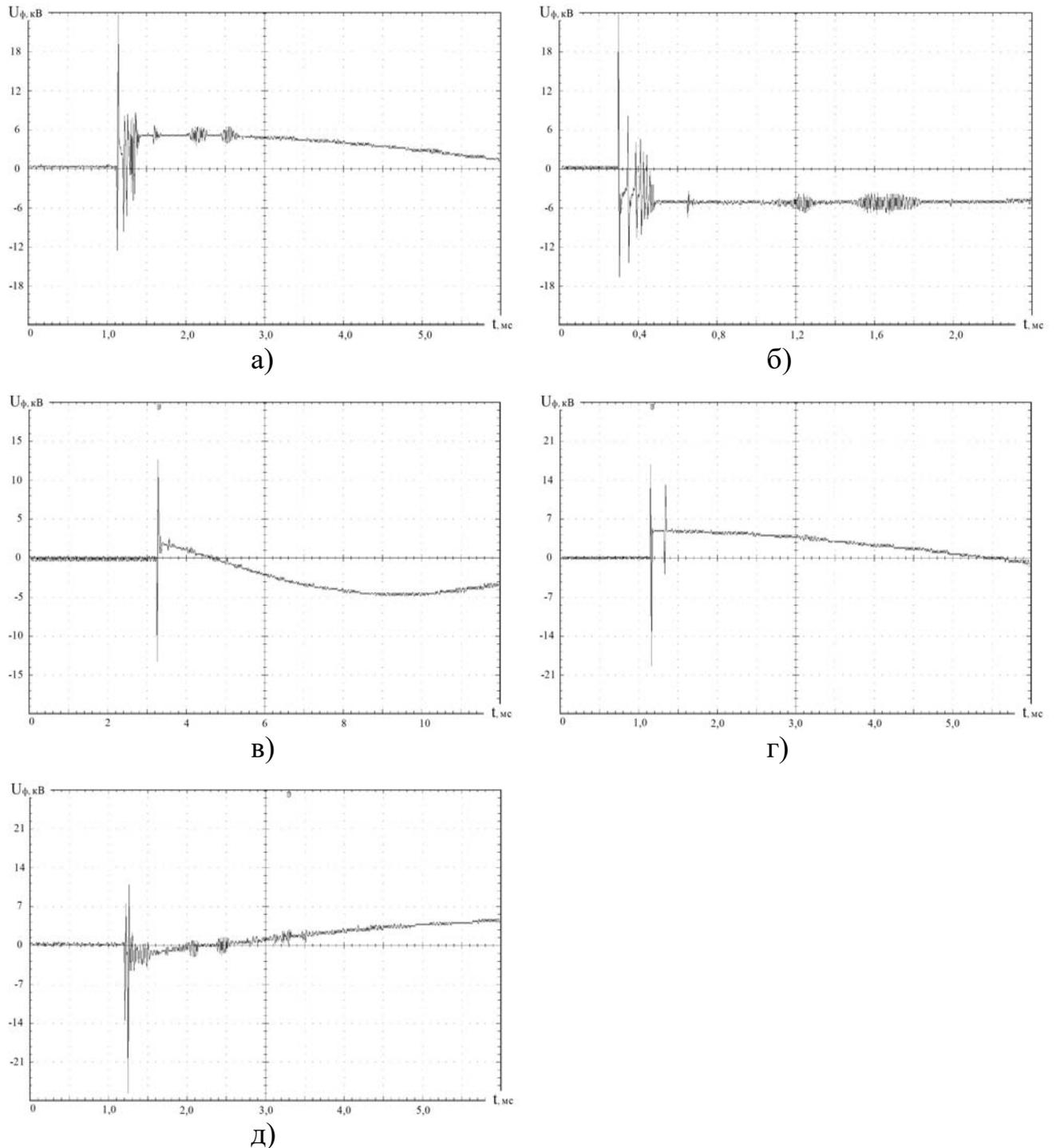


Рисунок 2.5 – Осциллограммы КП при *включении* трансформатора *элегазовым* контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$  и  $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$

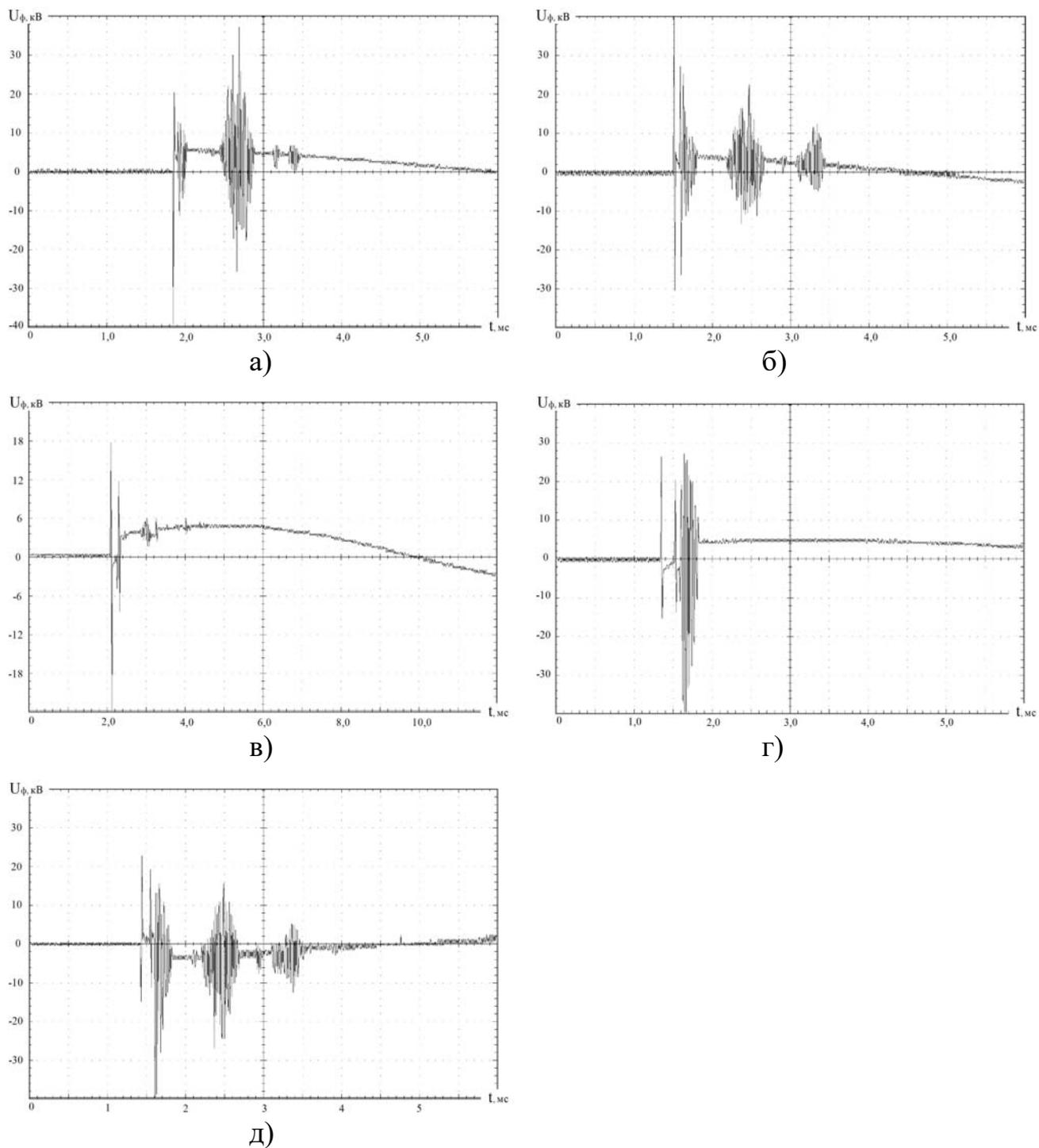


Рисунок 2.6 – Осциллограммы КП при *включении* трансформатора *вакуумным* контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$  и  $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$

Из анализа представленных на рисунках 2.3 – 2.6 осциллограмм следует, что в зависимости от типа используемого ВКА (вакуумный или элегазовый), вида коммутации (включение или отключение), а также примененных средств снижения КП, зафиксированные перенапряжения имеют кратность от 1 до 20. Это указывает на то, что для получения сведений о закономерности возникновения максимально возможных коммутационных перенапряжений необходимо использовать методы статистического анализа.

Обработка статистических данных производилась методом сравнения двух выборочных средних при проверке однородности дисперсий с использованием *F*-критерия Фишера.

Статистическому сравнению подверглись выборочные данные максимальных амплитуд импульсов КП, измеренных без средств снижения КП с выборочными данными максимальных амплитуд импульсов КП, измеренных с использованием средств снижения КП. Сравнение проводилось отдельно для режима включения и отключения как вакуумного, так и элегазового ВКА.

Также статистическому сравнению подверглись выборочные данные максимальных амплитуд импульсов КП с использованием вакуумного и элегазового ВКА при однотипных средствах снижения КП, отдельно для режима включения и отключения ВКА.

Подобный анализ позволил оценить влияние на величину КП таких факторов, как тип коммутационного аппарата, условие коммутации и метод снижения КП.

Обработка указанных статистических данных (см. п.2.4) позволила получить зависимость максимальных кратностей амплитуд импульсов КП от вышеперечисленных факторов и применить данную зависимость для оценки эффективности используемых средств снижения КП для условий включения и отключения трансформатора вакуумным и элегазовым ВКА.

## 2.4 Оценка эффективности известных способов и средств ограничения перенапряжений применительно к комплексу «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор»

Обработка статистических данных проводилась в следующем порядке:

1. Для каждой из полученных осциллограмм сравниваемых выборочных данных, определялись максимальные значения амплитуд коммутационных импульсов и вычислялись кратности величин КП на основании выражения (2.2):

$$K_{\Pi i} = \frac{U_{\max i}}{U_{ai}} \quad (2.2)$$

где  $U_{\max i}$  – максимальное значение амплитуды импульса КП;  $U_{ai}$  – амплитудное значение фазного напряжения обмотки ВН трансформатора (т.к. в соответствии со структурной схемой (Рисунок 2.1) обмотки ВН трансформатора  $T$  соединены в звезду, то  $U_{ai} = 6000/1,73 \cdot 1,41 = 4885$  В;  $i$  – порядковый номер опыта (№ осциллограммы) исследуемых выборочных данных.

2. Для параметра кратности КП выполнялся расчет математических ожиданий  $M_X$ , среднеквадратических отклонений  $S_X$  и дисперсий  $D_X$  каждой из сравниваемых выборочных данных в соответствии с выражениями (2.3) – (2.5):

$$M_X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_{\Pi i} \quad (2.3)$$

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - M_X)^2}{n-1}} \quad (2.4)$$

$$D_X = S_X^2 \quad (2.5)$$

где  $n$  – количество измерений исследуемой выборки.

3. В соответствии с  $F$ -критерием Фишера проводилась проверка двух сравниваемых выборочных данных на однородность. Для чего определялось расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  исходя из выражения (2.6):

$$F_p = \frac{S_{X1}^2}{S_{X2}^2} = \frac{D_{X1}}{D_{X2}} \quad (2.6)$$

где  $D_{X1}$  и  $D_{X2}$  – соответственно большее и меньшее по величине значения дисперсий сравниваемых выборочных данных.

Затем выполнялось сравнение расчетного значения критерия Фишера  $F_p$  с табличной величиной  $F_m$ . Для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы  $f_1 = f_2 = n - 1 = 49$  табличное значение  $F$ -критерия составляет  $F_m = 1,62$  [88, с. 45].

В случае выполнения условия  $F_p < F_m$  данные сравниваемых выборок признаются однородными, пригодными к объединению. В противном случае выборки не объединяются. Если выборки не объединяются, то фактор, по которому происходило сравнение выборочных данных, признается как существенно влияющий на максимальную амплитуду (кратность) и характер КП.

4. При условии объединения выборочных данных, вычислялась их средневзвешенная дисперсия  $D_{cv}$  (2.7) и доверительный интервал  $Z$  (2.8):

$$D_{cv} = \frac{(S_{X1}^2 \cdot f_1 + S_{X2}^2 \cdot f_2)}{(f_1 + f_2)} \quad (2.7)$$

$$Z = \pm t_a \cdot \sqrt{D_{cv}} \cdot \sqrt{\frac{(n_1 + n_2)}{n_1 \cdot n_2}} \quad (2.8)$$

где  $t_a$  – критерий Стьюдента.

Так как объединенные выборочные данные состоят уже из  $n = 100$  значений, то критерий Стьюдента составляет  $t_a = 1,39$  и выбирается исходя из числа степеней свободы  $f = n - 1 = 99$  [88, с. 43].

5. Если доверительный интервал  $Z$  включает в себя различие между оценками математических ожиданий  $M_{X2} - M_{X1}$ , то с вероятностью 0,95 можно утверждать, что исследуемый фактор не оказывает существенного влияния на амплитуды импульсов КП. В противном случае влияние исследуемого фактора признается значимым. Степень влияния тем больше, чем дальше за границы доверительного

интервала выходит различие между оценками математических ожиданий. Причем влияние может быть, как положительным, так и отрицательным.

Исходные данные, положенные в основание статистического анализа приведены в приложении Г.

Результаты статистического анализа представлены в таблицах 2.3–2.8. Они позволили выявить факторы, оказывающие и не оказывающие существенное влияние на амплитуды импульсов КП, что дало возможность выделить наиболее благоприятные условия коммутации и определиться с приемлемыми методами снижения КП в комплексе «ВКА – трансформатор».

Данные таблицы 2.3 указывают, что в режиме отключения трансформатора элегазовым контактором с использованием различных средств снижения КП, возникают импульсы перенапряжений, различные по амплитуде и характеру. Так как выборки данных неоднородны, то для указанных условий коммутации используемые средства снижения КП оказывают существенное влияние на величины кратностей КП. Результат сравнения величин  $F_p$  и  $F_m$  показал, что наибольшее влияние происходит с использованием средств снижения КП в виде RC-блока и  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$ , наименьшее – при использовании ОПН.

Таблица 2.3 – Сравнительный анализ двух выборочных средних кратностей КП для режима отключения трансформатора элегазовым контактором

Наименование параметра	Варианты для сравнительного анализа выборочных данных			
	Без средств снижения и ОПН	Без средств снижения и RC-блок	Без средств снижения и $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	Без средств снижения и $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$
$M_{X1}; M_{X2}$	8,32; 4,99	8,32; 1,07	8,32; 1,13	8,32; 4,56
$S_{X1}; S_{X2}$	4,77; 3,05	4,77; 0,19	4,77; 0,34	4,77; 2,31
$D_{X1}; D_{X2}$	22,75; 9,30	22,75; 0,036	22,75; 0,116	22,75; 5,34
$F_p$	2,45	615	202	4,28
$F_m$	1,62	1,62	1,62	1,62
Однородность дисперсий	неоднородна	неоднородна	неоднородна	неоднородна
Оценка влияния	влияет	влияет	влияет	влияет

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ двух выборочных средних кратностей КП для режима отключения трансформатора вакуумным контактором

Наименование параметра	Варианты для сравнительного анализа выборочных данных			
	Без средств снижения и ОПН	Без средств снижения и RC-блок	Без средств снижения и $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	Без средств снижения и $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$
$M_{X1}; M_{X2}$	12,75; 13,31	12,75; 3,37	12,75; 2,12	12,75; 7,92
$S_{X1}; S_{X2}$	3,26; 3,09	3,26; 1,61	3,26; 1,62	3,26; 3,73
$D_{X1}; D_{X2}$	10,63; 9,55	10,63; 2,59	10,63; 2,62	10,63; 13,91
$F_p$	1,11	4,09	4,02	1,31
$F_m$	1,62	1,62	1,62	1,62
Однородность дисперсий	однородна	неоднородна	неоднородна	однородна
$D_{св}$	10,07	-	-	12,27
$Z$	$\pm 1,275$	-	-	$\pm 1,407$
$M_{X2} - M_{X1}$	0,56	-	-	-4,83
Оценка влияния	не влияет	влияет	влияет	влияет

Таблица 2.5 – Сравнительный анализ двух выборочных средних кратностей КП для режима включения трансформатора элегазовым контактором

Наименование параметра	Варианты для сравнительного анализа выборочных данных			
	Без средств снижения и ОПН	Без средств снижения и RC-блок	Без средств снижения и $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	Без средств снижения и $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$
$M_{X1}; M_{X2}$	3,25; 3,03	3,25; 3,12	3,25; 3,35	3,25; 3,84
$S_{X1}; S_{X2}$	0,77; 0,81	0,77; 0,97	0,77; 0,96	0,77; 0,88
$D_{X1}; D_{X2}$	0,59; 0,66	0,59; 0,94	0,59; 0,92	0,59; 0,77
$F_p$	1,10	1,57	1,55	1,31
$F_m$	1,62	1,62	1,62	1,62
Однородность дисперсий	однородна	однородна	однородна	однородна
$D_{св}$	0,62	0,76	0,76	0,68
$Z$	$\pm 0,317$	$\pm 0,351$	$\pm 0,35$	$\pm 0,332$
$M_{X2} - M_{X1}$	-0,21	-0,12	0,11	0,59
Оценка влияния	не влияет	не влияет	не влияет	влияет

Данные таблицы 2.4 указывают, что в режиме *отключения* трансформатора *вакуумным* контактором с использованием различных средств снижения КП, существенное влияние на величины кратностей КП оказывают только средства снижения КП в виде RC-блока,  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$  и  $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$ . Применение ОПН для указанных условий на величины кратностей КП влияния не оказывает.

Данные таблицы 2.5 указывают, что в режиме *включения* трансформатора *элегазовым* контактором используемые средства снижения КП влияния на величины кратностей КП не оказали.

Таблица 2.6 – Сравнительный анализ двух выборочных средних кратностей КП для режима *включения* трансформатора *вакуумным* контактором

Наименование параметра	Варианты для сравнительного анализа выборочных данных			
	Без средств снижения и ОПН	Без средств снижения и RC-блок	Без средств снижения и $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	Без средств снижения и $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$
$M_{X1}; M_{X2}$	4,25; 4,56	4,25; 3,68	4,25; 6,25	4,25; 5,26
$S_{X1}; S_{X2}$	1,22; 1,40	1,22; 1,49	1,22; 1,62	1,22; 1,43
$D_{X1}; D_{X2}$	1,49; 1,96	1,49; 2,22	1,49; 2,62	1,49; 2,04
$F_p$	1,31	1,48	1,75	1,36
$F_m$	1,62	1,62	1,62	1,62
Однородность дисперсий	однородна	однородна	неоднородна	однородна
$D_{св}$	1,73	1,86	-	1,77
$Z$	$\pm 0,529$	$\pm 0,548$	-	$\pm 0,534$
$M_{X2} - M_{X1}$	0,30	-0,57	-	1,01
Оценка влияния	не влияет	влияет	влияет	влияет

Данные таблицы 2.6 указывают, что в режиме *включения* трансформатора *вакуумным* контактором существенное влияние на величины кратностей КП оказывает только средство снижения КП в виде  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$ , причем влияние это носит негативный характер. Применение ОПН для указанных условий на величины кратностей КП влияния не оказывает. Влияние на величину кратностей КП RC-блока и  $R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$  для указанных условий следует признать

несущественным, т.к. величина  $M_{X2} - M_{X1}$  незначительно выходит за пределы доверительного интервала  $Z$ .

Таблица 2.7 – Сравнительный анализ двух выборочных средних кратностей КП для режима *включения* трансформатора вакуумным и элегазовым ВКА при однотипных средствах снижения КП

Наименование параметра	Варианты для сравнительного анализа выборочных данных вакуумного и элегазового ВКА				
	Без средств снижения КП	ОПН	РС-блок	$R_{\text{шНН}} = 46 \text{ Ом}$	$R_{\text{шВН}} = 16,5 \text{ кОм}$
$M_{X1}; M_{X2}$	4,25; 3,25	4,56; 3,03	3,68; 3,12	6,25; 3,35	5,26; 3,84
$S_{X1}; S_{X2}$	1,22; 0,77	1,40; 0,81	1,49; 0,97	1,62; 0,96	1,43; 0,88
$D_{X1}; D_{X2}$	1,49; 0,59	1,96; 0,66	2,22; 0,94	2,62; 0,92	2,04; 0,77
$F_p$	2,53	3,01	2,38	2,84	2,63
$F_m$	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
Однородность дисперсий	неоднородна	неоднородна	неоднородна	неоднородна	неоднородна
Оценка влияния	влияет	влияет	влияет	влияет	влияет

Таблица 2.8 – Сравнительный анализ двух выборочных средних кратностей КП для режима *отключения* трансформатора вакуумным и элегазовым ВКА при однотипных средствах снижения КП

Наименование параметра	Варианты для сравнительного анализа выборочных данных вакуумного и элегазового ВКА				
	Без средств снижения КП	ОПН	РС-блок	$R_{\text{шНН}} = 46 \text{ Ом}$	$R_{\text{шВН}} = 16,5 \text{ кОм}$
$M_{X1}; M_{X2}$	12,75; 8,32	13,31; 4,99	2,69; 1,07	2,12; 1,13	7,92; 4,56
$S_{X1}; S_{X2}$	3,26; 4,77	3,09; 3,05	1,46; 0,19	1,62; 0,34	3,73; 2,31
$D_{X1}; D_{X2}$	10,63; 22,75	9,55; 9,30	2,13; 0,036	2,62; 0,116	13,91; 5,34
$F_p$	2,15	1,03	57,53	23,47	2,62
$F_m$	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
Однородность дисперсий	неоднородна	однородна	неоднородна	неоднородна	неоднородна
$D_{св}$	-	9,95	-	-	-
$Z$	-	$\pm 0,877$	-	-	-
$M_{X2} - M_{X1}$	-	-8,32	-	-	-
Оценка влияния	влияет	влияет	влияет	влияет	влияет

Данные, представленные в таблицах 2.7 и 2.8 указывают, что при коммутации трансформатора различными типами ВКА в равных условиях коммутации с однотипными средствами снижения КП, возникающие импульсы перенапряжений, имеют существенное различие по амплитуде и характеру. На основании чего делается вывод, что тип коммутационного аппарата (вакуумный или элегазовый) оказывает существенное влияние на амплитуду и характер КП. Вакуумный ВКА создает более высокий уровень КП, чем элегазовый.

Для получения наглядной картины вероятностных показателей массива экспериментальных данных, для каждого условия коммутации были построены гистограммы оценок вероятностей возникновения максимальных коммутационных импульсов кратностью  $K_{II}$ . Методика указанной обработки экспериментальных данных представлена в [88, с.33–38]. Процесс обработки выполнялся в следующем порядке:

1. Весь диапазон значений величин кратностей КП делился на равные единичные интервалы, число которых  $\Psi$  соответствует максимальному целому значению величины  $K_{II}$ , полученному при определенных экспериментальных условиях и, в соответствии с выражением (2.9), определялась ширина диапазона измерений  $\Delta K_{II}$ :

$$\Delta K_{II} = \frac{(K_{II\max} - K_{II\min})}{\Psi} \quad (2.9)$$

где  $K_{II\max}$  и  $K_{II\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значение кратности импульса КП в анализируемой выборке данных;  $\Psi$  – число интервалов диапазона.

2. Для каждого интервала определялось количество измерений  $n_i$ , принадлежащее рассматриваемому интервалу.

3. На основании выражений (2.10) и (2.11) производился расчет величины вероятности попадания единичных измерений в соответствующий интервал  $P_i$  и относительную частоту попаданий единичных измерений в соответствующий интервал  $p_i$ :

$$P_i = \frac{n_i}{n} \quad (2.10)$$

$$p_i = \frac{P_i}{\Delta K_{II}} \quad (2.11)$$

На основании результатов расчета вероятностных показателей кратности коммутационных перенапряжений для различных условий коммутации, построены гистограммы оценки вероятностей возникновения амплитуд КП в условиях, определенных программой исследований (Таблица 2.2), которые приведены на рисунках 2.7 – 2.10.

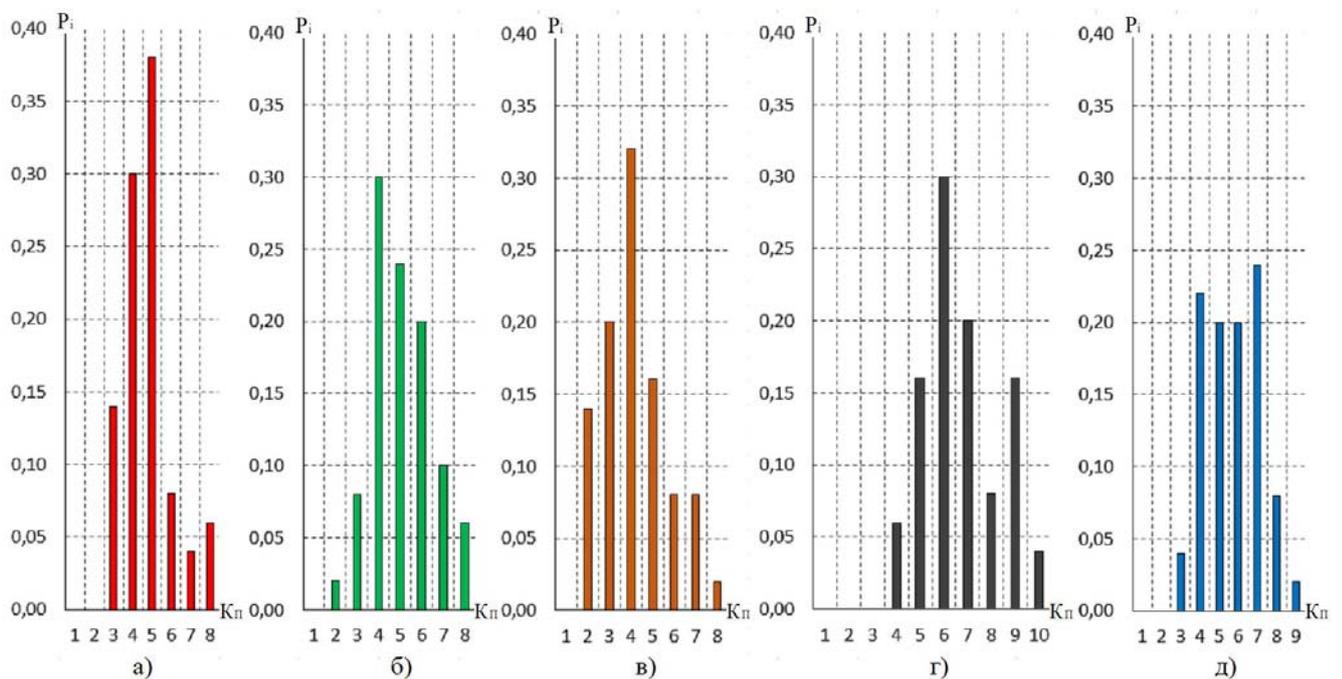


Рисунок 2.7 – Вероятности возникновения амплитуд КП заданной кратности при включении трансформатора вакуумным контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном РС-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шНН} = 46$  Ом и  $R_{шВН} = 16,5$  кОм

Согласно ГОСТ 27863, кратности КП для шахтных КТП с напряжением питающей сети 6 кВ не должны превышать  $K_{II} = 4$  (Таблица 1.2). Соответственно условия коммутации с показателем кратности перенапряжений  $K_{II} \leq 4$  признаются благоприятными для исследуемого объекта. В случае, когда  $K_{II} > 4$  – условия

коммутации признаются неблагоприятными, способными вызвать электрический пробой системы изоляции силового трансформатора КТП.

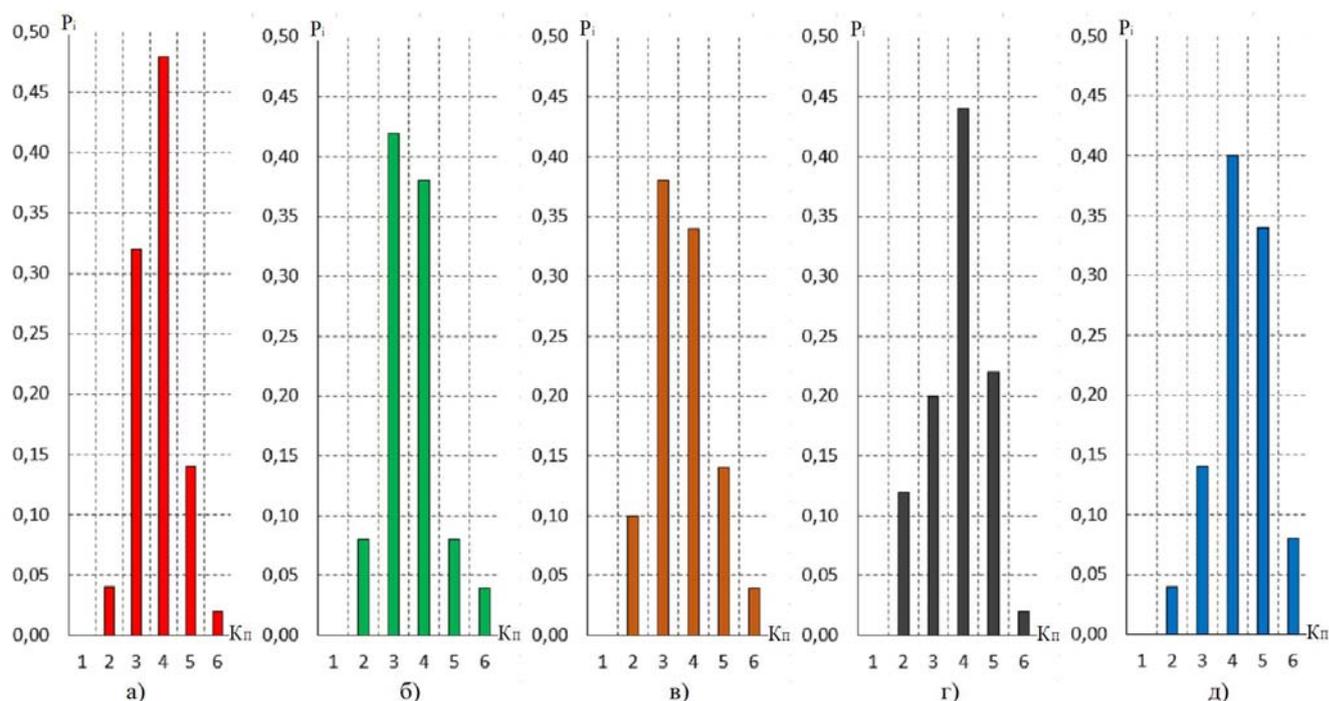


Рисунок 2.8 – Вероятности возникновения амплитуд КП заданной кратности при *включении* трансформатора элегазовым контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шНН} = 46$  Ом и  $R_{шВН} = 16,5$  кОм

Полученные данные гистограмм вероятностных показателей массива экспериментальных данных на основании сформированного критерия благоприятных и неблагоприятных условий коммутации обобщаем в виде таблицы 2.9, где представлены вероятности возникновения благоприятных  $P_{Kп \leq 4}$  и неблагоприятных  $P_{Kп > 4}$  условий коммутации в зависимости от используемых средств снижения КП, вида коммутации и типа ВКА. Величины  $P_{Kп \leq 4}$  и  $P_{Kп > 4}$  для каждого условия коммутации определяются исходя из выражений (2.12, 2.13):

$$P_{Kn \leq 4} = \sum_{i=1}^4 P_i \quad (2.12)$$

$$P_{Kn > 4} = \sum_{i=5}^{\Psi} P_i \quad (2.13)$$

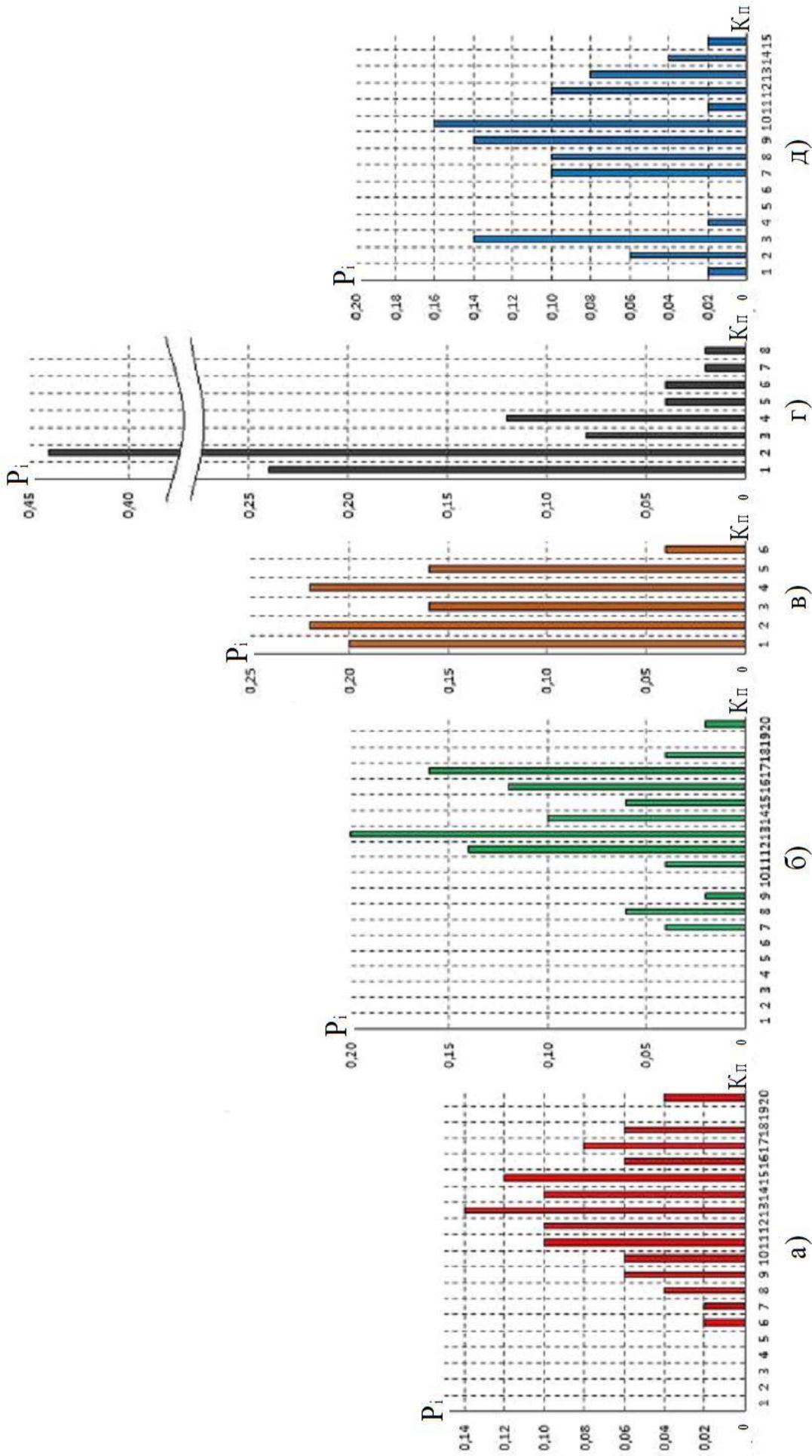


Рисунок 2.9 – Вероятности возникновения амплитуд КП заданной кратности при *отключении* трансформатора *вакуумным* контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном РС-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шнн} = 46 \text{ Ом}$  и  $R_{швн} = 16,5 \text{ кОм}$

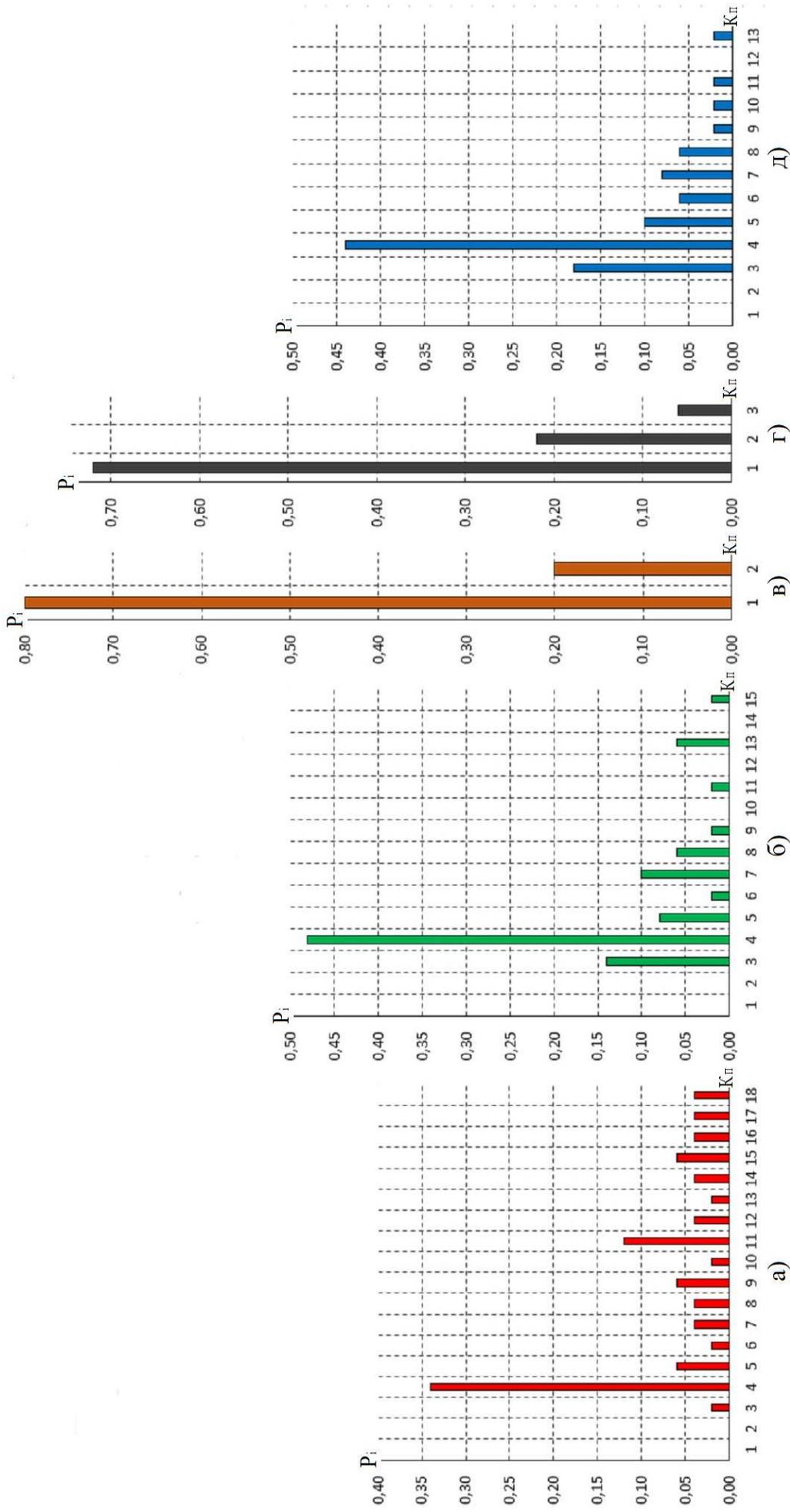


Рисунок 2.10 – Вероятности возникновения амплитуд КП заданной кратности при *отключении* трансформатора *элегазовым* контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном РС-блоке; г), д) соответственно с использованием  $R_{шнн} = 46 \text{ Ом}$  и  $R_{швн} = 16,5 \text{ кОм}$

Таблица 2.9 – Вероятности возникновения благоприятных и неблагоприятных условий коммутации в зависимости от: используемых средств снижения КП, вида коммутации и типа ВКА

Наименование средств снижения КП	Вид коммутации	Вероятность возникновения благоприятных и неблагоприятных условий коммутации в системе «ВКА – трансформатор» $P_i$			
		Вакуумный контактор		Элегазовый контактор	
		$P_{КП \leq 4}$	$P_{КП > 4}$	$P_{КП \leq 4}$	$P_{КП > 4}$
Без средств снижения КП	Вкл.	0,44	0,56	0,84	0,16
	Откл.	0	1,0	0,36	0,64
ОПН	Вкл.	0,4	0,6	0,88	0,12
	Откл.	0	1,0	0,62	0,38
РС-блок	Вкл.	0,66	0,34	0,82	0,18
	Откл.	0,8	0,2	1,0	0
$R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$	Вкл.	0,06	0,94	0,76	0,24
	Откл.	0,88	0,12	1,0	0
$R_{шВН} = 16,5 \text{ кОм}$	Вкл.	0,26	0,74	0,58	0,42
	Откл.	0,24	0,76	0,62	0,38

Данные, представленные в таблице 2.9 указывают, что при отключении *элегазового* контактора с использованием средств снижения КП в виде РС-блока или  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$  всегда наступают благоприятные условия коммутации. Напротив, отключение *вакуумного* контактора без использования средств снижения КП или с применением ОПН, практически всегда приводит к неблагоприятным условиям коммутации. Во всех остальных случаях опасные для изоляции трансформатора КП возникают с различной долей вероятности.

2.5 Обоснование исходных данных для исследования коммутационных процессов в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» методами математического моделирования

Выявленная в ходе экспериментов тенденция в области применения способов снижения КП в комплексе «ВКА – трансформатор» шахтной участковой КТП позволяет конкретизировать подходы, способы и уточнить параметры средств снижения КП методами математического и компьютерного моделирования.

При этом в качестве исходного объекта должна быть рассмотрена расчетная схема КТП, представленная следующими параметрами:

- емкостью между ВКА и трансформатором; входной емкостью трансформатора (с учетом собственной емкости обмоток ВН и НН, а также емкости этих обмоток относительно земли и друг друга);

- формой кривой намагничивания, учитывающей изменяющиеся параметры индуктивностей обмоток ВН и НН, а также их взаимную индуктивность в процессе цикла перемагничивания магнитопровода трансформатора;

- исходным режимом работы трансформатора, предшествующим его коммутации, учитывающим остаточную намагниченность магнитопровода перед подключением к сети; потерями в активных сопротивлениях обмоток ВН и НН, а также потерями в магнитопроводе, учитывающие гистерезис и вихревые токи.

Кроме этого, в расчетной схеме следует предусмотреть компоненты и их физические параметры активных, а также активно-емкостных средств снижения КП, а также алгоритм и параметры устройств коммутации вышеуказанных средств [43].

Результатом теоретического исследования должны стать выявленные параметры КП в различных комбинациях коммутации обмоток ВН силового трансформатора КТП.

При этом принимается величина линейного напряжения первичной обмотки трансформатора 6 кВ, обмотки НН – 1050 В, частота сети 50 Гц.

Для возможности проведения сравнительного анализа данных, полученных при практическом исследовании КП, с данными, полученными в результате теоретического расчета, расчетную модель целесообразно выполнить в соответствии с характеристиками трансформатора той же мощности и типа, что использовались при экспериментах, т.е. силовой трансформатор ТНЕВ 5639  $S_n = 400$  кВА,  $U_n = 6/1,05$  кВ. Воздушные промежутки от внешней изоляции обмоток ВН до внутренних стенок корпуса взрывозащищенной оболочки, целесообразно принять соответствующими КТП ТВПШ-400/6-1,2/0,69 УХЛ5-20.

В общем случае, с целью проверки адекватности теоретических исследований результатам эксперимента, полученные в результате моделирования расчетные осциллограммы КП сопоставляются с экспериментальными осциллограммами, полученными для аналогичных условий коммутации.

## 2.6 Выводы по главе 2

1. При одинаковых условиях коммутации с использованием однотипных средств защит, вероятности возникновения коммутационных перенапряжений более высокой кратности, в обмотках высшего напряжения трансформатора, при коммутации вакуумным контактором выше, чем при коммутации элегазовым контактором.

2. Средства защиты в виде нелинейных ограничителей перенапряжения показали низкую эффективность при возникновении коротких импульсов коммутационных перенапряжений длительностью 100 – 200 нс., когда скорость роста электрической прочности межконтактного промежутка оказывается меньше скорости роста переднего фронта коммутационного импульса.

3. Наиболее эффективными средствами защиты при отключении ненагруженного трансформатора в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» показали активно-емкостные цепи, при шунтировании обмоток высшего напряжения (RC-блок) и активные сопротивления, при шунтировании обмоток низшего напряжения ( $R_{шНН}$ ).

4. Эффективная работа используемых средств защиты при включении ненагруженного трансформатора не выявлена.

5. Установленные экспериментально реальные амплитудные значения перенапряжений при коммутации обмоток высшего напряжения трансформатора при помощи ВКА различных типов, с учетом применения штатных средств (заводского изготовления) защит от коммутационных перенапряжений, позволяют утверждать о непригодности указанных средств к выполнению

функций ограничения выявленных перенапряжений на уровне, меньшем пробивного напряжения электрической изоляции трансформатора КТП, при коммутации последнего в ненагруженном режиме.

6. На основании проведенных исследований в системе автоматического ограничения перенапряжений шахтной участковой КТП представляется целесообразным использование RC-блока, подключаемого к обмотке ВН трансформатора в момент его включения и отключения, а также  $R_{шНН}$ , подключаемого к обмотке НН трансформатора только в момент его отключения.

Дополнительное влияние RC-цепей и  $R_{шНН}$  при включении и отключении трансформатора, а также подбор рациональных параметров указанных средств защиты, может быть осуществлен в результате исследования математической и компьютерной модели комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор».

## ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СПОСОБОВ ПОДАВЛЕНИЯ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В КОМПЛЕКСЕ «ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ  
КОММУТАЦИОННЫЙ АППАРАТ – ТРАНСФОРМАТОР» МЕТОДАМИ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование коммутационных процессов в комплексе «ВКА – трансформатор» на полномасштабной физической модели позволило выявить потенциально благоприятные способы и технические средства воздействия на коммутационные процессы в контексте снижения до допустимого уровня амплитуд коммутационных импульсов.

Дальнейшее исследование процессов коммутации в комплексе «ВКА – трансформатор» в контексте установления оптимальной структуры, рациональных параметров и алгоритмов функционирования технических средств снижения КП предполагает использование метода математического и компьютерного моделирования.

### 3.1 Обоснование структуры и параметров математической и компьютерной модели объекта исследования

Применительно к исследованию параметров эффективности технических средств снижения КП, применительно к комплексу «ВКА – трансформатор» КТП технологического участка шахты, структурные компоненты данной системы представляются соответствующими расчётными схемами и математическими описаниями. На рисунке 3.1 приведена расчётная схема фазы трансформатора, как фрагмент Т-образной схемы его замещения [19, 107]. При её выборе учитывались определяющие факторы, влияющие на амплитуду и форму импульса КП при коммутации первичной обмотки трансформатора посредством ВКА. Этими факторами являются: амплитуда тока среза; ёмкость между ВКА и трансформатором; входная ёмкость, форма кривой намагничивания и мощность

трансформатора; исходный режим трансформатора, предшествующий его отключению; потери (на гистерезис и вихревые токи).

В отличие от известных подходов к вопросам моделирования подобных объектов [23, 31, с.100, 49], когда входная ёмкость трансформатора представлялась упрощенно (учитывались только её параметры, применительно к обмотке ВН), предлагаемая расчётная схема предусматривает учёт входной ёмкости фазы трансформатора  $C_{mp}$ , как объекта, характеризуемого собственными (межвитковыми) ёмкостями обмоток ВН и НН, а также ёмкостями этих обмоток относительно «земли» и друг друга.

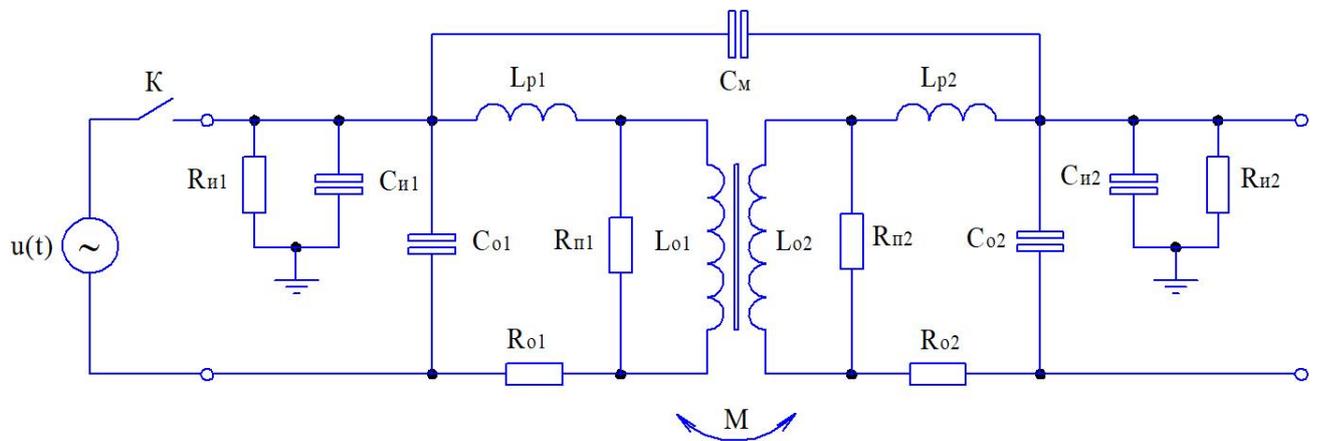


Рисунок 3.1 – Расчётная схема замещения фазы трансформатора

Представленная схема содержит следующие элементы:  $u(t)$  – источник синусоидального напряжения;  $K$  – коммутатор;  $C_{u1}$ ,  $C_{u2}$  – соответственно ёмкости обмоток ВН и НН относительно «земли»;  $R_{u1}$ ,  $R_{u2}$  – соответственно сопротивления изоляции обмоток ВН и НН;  $C_m$  – межобмоточная ёмкость фазы;  $R_{o1}$ ,  $R_{o2}$  – соответственно активные сопротивления обмоток ВН и НН;  $C_{o1}$ ,  $C_{o2}$  – соответственно собственные (межвитковые) ёмкости обмоток ВН и НН;  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$  – соответственно индуктивности обмоток ВН и НН, а также их взаимная индуктивность  $M_{12}$ ;  $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$  – соответственно индуктивности рассеяния обмоток ВН и НН;  $R_{n1}$ ,  $R_{n2}$  – сопротивления, учитывающие потери в магнитопроводе, обусловленные его перемагничиванием и воздействием вихревых токов.

Кроме этого, принципиально важным является учёт индуктивностей рассеяния  $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$  и активных сопротивлений  $R_{o1}$ ,  $R_{o2}$  обмоток трансформатора из

состава колебательного контура, образованного индуктивностями  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$  и емкостями  $C_{o1}$ ,  $C_{o2}$  [97]. Индуктивности рассеяния  $L_p$  в сотни раз меньше собственных индуктивностей обмоток  $L_o$ , однако, без подключенной параллельной ёмкости, даже малая индуктивность в результате коммутационного процесса способна спровоцировать значительные перенапряжения. В то же время, очевидно, что собственные (межвитковые) ёмкости обмоток охватывают как нелинейные индуктивности обмоток, так и их индуктивности рассеяния. Включение в состав параллельного колебательного контура обмоток сопротивлений  $R_{o1}$ ,  $R_{o2}$  учитывает элемент затухания, создаваемый ими во время переходного процесса [27].

В ходе исследований следует также учесть то что, поскольку в процессе цикла перемагничивания проницаемость трансформаторной стали нелинейно изменяется в широких пределах, то индуктивности обмоток  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$  и их взаимная индуктивность  $M_{12}$  также будут нелинейно изменяться в соответствии с выражениями (3.1–3.3) [20, 32]:

$$L_{o1(2)} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N_{1(2)}^2 \cdot A}{l_m} \text{ [Гн]} \quad (3.1)$$

$$M_{12} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot A}{l_m} \text{ [Гн]} \quad (3.2)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода, определяемая из выражений (3.3);  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $N_1$ ,  $N_2$  – количество витков обмотки ВН и НН соответственно;  $A$  – площадь сечения магнитопровода,  $m^2$ ;  $l_m$  – длина средней линии магнитопровода,  $m$ .

$$\mu = \frac{\mu_A}{\mu_0}, \quad \mu_A = f(H) \text{ [Гн/м]} \quad (3.3)$$

где  $\mu_A$  – абсолютная магнитная проницаемость материала магнитопровода, находящаяся в зависимости от напряженности магнитного поля  $H$ , либо от индукции  $B$  в стержнях магнитопровода [83].

Таким образом, замена стационарных индуктивностей обмоток трансформатора их нелинейными моделями, позволит выполнить исследования во всем диапазоне рабочих напряженностей магнитного поля, с учетом изменения магнитной проницаемости стали в цикле перемагничивания и несинусоидальности намагничивающего тока.

В качестве компонента комплекса «ВКА – трансформатор», в соответствии с определениями п.2.5, принят трёхфазный силовой трансформатор Siemens TNEB 5639 номинальной мощностью 400 кВА, технические характеристики которого для частоты напряжения сети 50 Гц, приведены в таблице 3.1 [89]. В качестве базового программного продукта моделирования примем программный комплекс LTspice IV, адаптированный к анализу переходных процессов (transient analysis) в электротехнических установках [85].

Таблица 3.1 – Технические характеристики трансформатора TNEB 5639

№п.п	Наименование параметра	Значение
1	Схема и группа соединения обмоток	Y/Y-0
2	Номинальное напряжение обмоток ВН/НН $U_1/U_2$ , кВ	6/1,05
3	Номинальный ток обмоток ВН/НН $I_1/I_2$ , А	38,5/226
4	Напряжение короткого замыкания при 115 °С $U_k$ , %	4,25
5	Потери короткого замыкания при 115 °С $P_k$ , Вт	2122
6	Сила тока холостого хода $I_{xx}$ , %	2,46
7	потери холостого хода $P_x$ , Вт	1670
8	Материал магнитопровода	Сталь 3405 $\delta=0,35$ мм
9	Активное сечение стержня магнитопровода $A$ , см <sup>2</sup>	493,5
10	Средняя длина магнитной цепи $L_m$ , м	1,82
11	Количество витков обмоток ВН/НН $N_1/N_2$	200/35
12	Активные сопротивления обмоток ВН/НН при 115 °С $R_{01}/R_{02}$ , Ом	0,2594/ 0,005135

Приведенный перечень табличных параметров трансформатора является необходимым, однако, недостаточным для комплексного исследования функциональных возможностей способов подавления амплитуд коммутационных перенапряжений в объекте. Поэтому представляется приемлемым определить, с

последующим использованием в процессе моделирования, величины ряда электрических параметров объекта путём их непосредственного измерения.

В частности, в результате использования аппаратных средств измерения (RLC-метр UTM-1603) определены ёмкости  $C_{u1}$ ,  $C_{u2}$ ,  $C_m$  (измерения проводились при разомкнутой нулевой точке «звезды» обмоток трансформатора). Величины  $C_{u1} = 360$  Пф,  $C_{u2} = 520$  Пф,  $C_m = 720$  Пф соответствуют среднему арифметическому измерений по трем фазам трансформатора.

Нелинейные индуктивности обмоток  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$  в симуляторе LTspice IV задаются моделированием петли гистерезиса по методу Джона Чана [96], в соответствии с которым нарастающая и ниспадающая ветви граничной петли гистерезиса вычисляются на основании выражений (3.4):

$$B_{\uparrow}(H) = B_S \cdot \frac{H + H_C}{|H + H_C| + H_C \cdot \left(\frac{B_S}{B_R} - 1\right)} + \mu_0 \cdot H$$

$$B_{\downarrow}(H) = B_S \cdot \frac{H - H_C}{|H - H_C| + H_C \cdot \left(\frac{B_S}{B_R} - 1\right)} + \mu_0 \cdot H \quad (3.4)$$

где  $B_R$ ,  $B_S$  – соответственно остаточная индукция и индукция насыщения, [Тл];  $H_C$  – коэрцитивная сила.

Начальная кривая намагничивания  $B_0(H)$  моделируется как среднее арифметическое между значениями нарастающей и ниспадающей ветвей:

$$B_0(H) = \frac{B_{\uparrow}(H) + B_{\downarrow}(H)}{2} \quad (3.5)$$

В частном случае перемагничивание осуществляется не по граничной петле, а по внутренним циклам, формируемым в соответствии с изменениями напряженности магнитного поля [51]. Кроме петли гистерезиса при моделировании нелинейной индуктивности данный метод предполагает

необходимость учёта размеров магнитопровода  $A$  и  $L_m$ , ширины немагнитного зазора  $L_g$ , а также количества витков в обмотках  $N$ . В частности, применительно к объекту исследования введены:

- для индуктивности  $L_{o1}$  - ( $H_C= 7,5$   $B_S= 2,05$   $B_R= 1,3$   $L_m= 1,82$   $L_g= 0$   $A= 0,04935$   $N= 200$ );

- для индуктивности  $L_{o2}$  - ( $H_C= 7,5$   $B_S= 2,05$   $B_R= 1,3$   $L_m= 1,82$   $L_g= 0$   $A= 0,04935$   $N= 35$ );

- дополнительные индуктивности, подключенные параллельно  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$ , которые обеспечивают индуктивную связь между обмотками ВН и НН.

Поскольку ток холостого хода трансформатора определяется исключительно нелинейными индуктивностями, то значения вводимых индуктивностей связи для обмоток ВН и НН должны существенно (в 100 и более раз) превышать величины  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$ .

В соответствии со справочными данными [61], максимальным значения индуктивностей  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$ , вычисленных по формуле (3.1), будет при напряжённости магнитного поля  $H= 14$  А/м (при  $\mu_A= 0,072$  Гн/м) и численно составит:

$$L_{o1} = \frac{0,072 \cdot 200^2 \cdot 0,04935}{1,82} = 78,1 \text{ Гн}$$

$$L_{o2} = \frac{0,072 \cdot 35^2 \cdot 0,04935}{1,82} = 2,39 \text{ Гн}$$

Поэтому величина индуктивности связи для обмотки ВН может быть принята равной  $L_{c1}= 10000$  Гн, а индуктивность связи для обмотки НН определяется из выражения (3.6):

$$L_{c2} = \frac{L_{c1}}{k_{mp}^2} = \frac{L_{c1}}{(U_{\phi 1}/U_{\phi 2})^2} = \frac{10000}{(3464/606,2)^2} = 306,3 \text{ Гн} \quad (3.6)$$

В ходе исследований активные сопротивления обмоток  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ , в соответствии с выражениями (3.7), приведены к температуре окружающей среды (+14 °C), при которой проводились эксперименты:

$$R_{01}^{14} = \frac{R_{01}^{115} \cdot (235+14)}{235+115} = \frac{0,2594 \cdot (235+14)}{235+115} = 0,1845 \text{ Ом}$$

$$R_{02}^{14} = \frac{R_{02}^{115} \cdot (235+14)}{235+115} = \frac{0,005135 \cdot (235+14)}{235+115} = 0,003653 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

Собственная ёмкость  $C_o$  обмоток ВН и НН определена с использованием схемы, показанной на рисунке 3.2, исходя из выражений резонансной частоты колебательного контура (3.8):

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_o \cdot C_o}};$$

$$C_o = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L_o} \quad (3.8)$$

где  $T$  и  $f$  – соответственно, период и частота собственных (резонансных) колебаний обмоток трансформатора.

Метод определения параметров обмоток ВН и НН трансформатора состоит в том, что импульсы прямоугольной формы с крутым фронтом, частотой 2 Гц и амплитудой 3 В, с выхода генератора сигналов Г6-34 ( $P1$ ) подаются на обмотку трансформатора, представляющую собой параллельный колебательный контур, образованный индуктивностями  $L_o$ ,  $L_p$  и ёмкостью  $C_o$ . Резисторы  $R_o$ ,  $R_n$  характеризуют процесс затухания колебаний в контуре. После каждого такого импульса в обмотке трансформатора возникают свободные (собственные) колебания, фиксируемые цифровым осциллографом  $P2$ .

Представленные на рисунке 3.3 осциллограммы собственных колебаний обмотки ВН (а) и НН (б) трансформатора ТНЕВ 5639 позволили на основании выражений (3.8) определить значения параметров  $T$  и  $f$ .

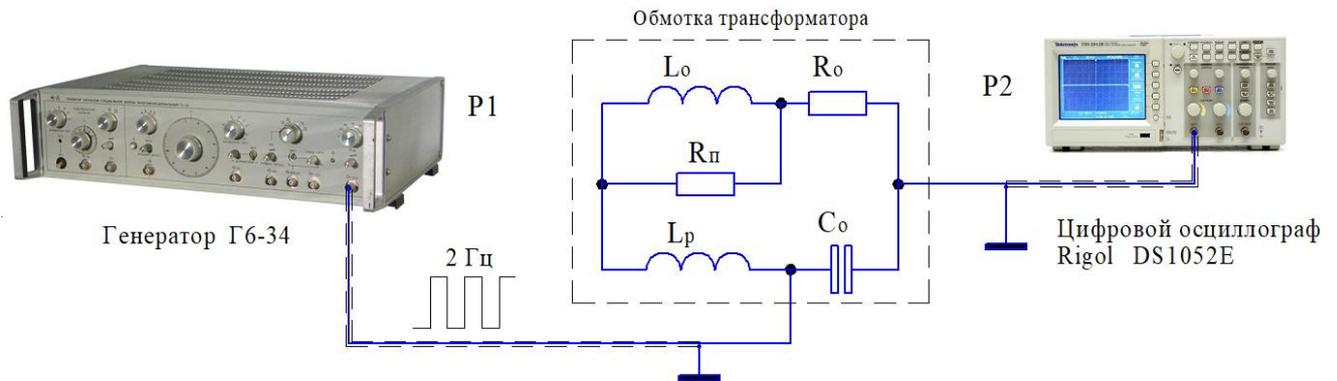


Рисунок 3.2 – Схема определения параметров обмоток ВН и НН трансформатора

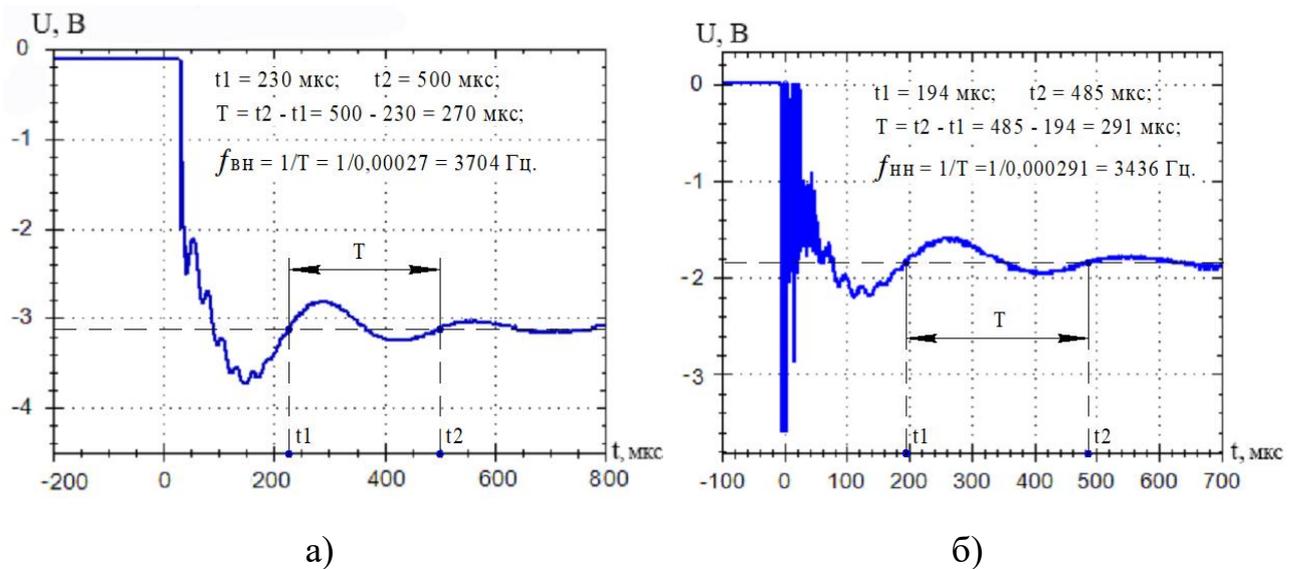


Рисунок 3.3 – Экспериментальные осциллограммы собственных колебаний обмоток ВН (а) и НН (б) трансформатора ТНЕВ 5639

Индуктивности  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$  измерены цифровым RLC-метром. При малой напряжённости магнитного поля, соразмерной с напряженностью, создаваемой выходным сигналом генератора прямоугольных импульсов, их значения составляют: для обмотки ВН –  $L_{o1} = 2,087$  Гн; для обмотки НН –  $L_{o2} = 64$  мГн.

На основании выражений (3.8) вычислены ёмкости применительно к объекту:

$$C_{o1} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 3704^2 \cdot 2,087} = 8,85 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} = 885 \text{ пФ};$$

$$C_{o2} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 3436^2 \cdot 0,064} = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 33,5 \text{ нФ}.$$

Оставшееся неизвестным значение сопротивления  $R_n$  определяется расчётным путем, для чего работа схемы (Рисунок 3.2) моделируется в программной среде LT-Spice IV (для обмотки ВН результат моделирования представлен на рисунке 3.4). Сущность метода моделирования собственных колебаний обмотки ВН трансформатора состоит в применении источника импульсного напряжения V1, который возбуждает колебания в контуре катушки индуктивности L1, модель которой представлена, собственно, индуктивностью  $L_0$  и «паразитными» параметрами  $R_0$ ,  $C_0$ . Резистор  $R_n$  моделируется последовательным сопротивлением источника V1 ( $R_{SER}$ ). Метод предполагает применение экспериментального подбора величины  $R_n$  таким образом, чтобы затухающий колебательный процесс расчётной осциллограммы на рисунке 3.4 визуально совпадал с экспериментальной осциллограммой на рисунке 3.3.

Применительно к объекту исследования, в котором обмотки расположены на одном стержне магнитопровода, параметр  $R_{\Pi} = 120 \text{ кОм}$  при моделировании, как обмотки ВН, так и обмотки НН.

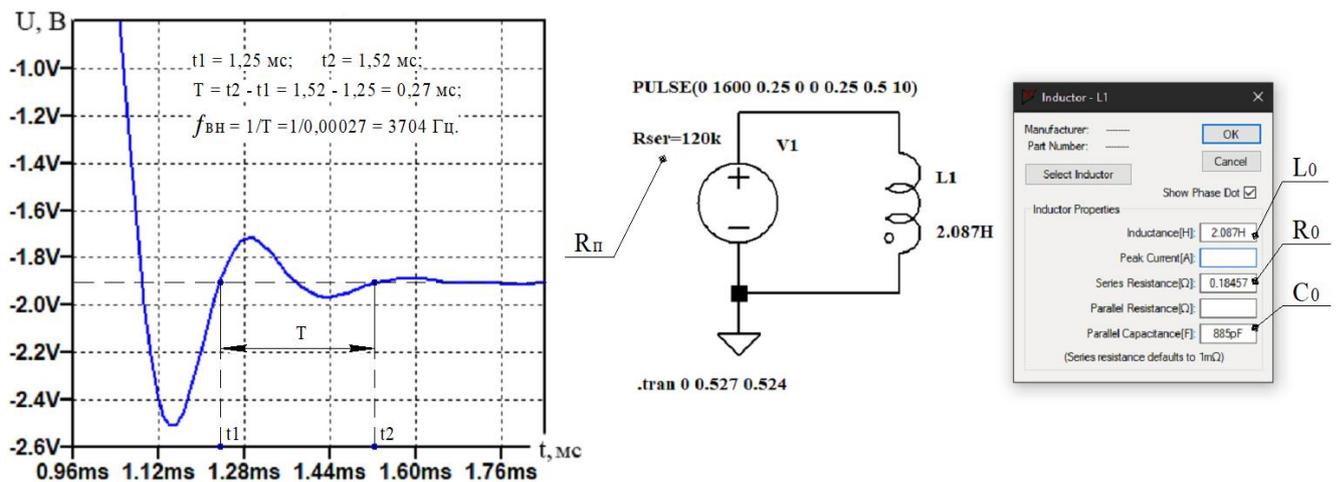


Рисунок 3.4 – Моделирование собственных колебаний обмотки ВН трансформатора ТНЭВ 5639 в симуляторе LT-Spice IV

В отношении индуктивностей рассеяния  $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$  следует учесть, что они характеризуются магнитным потоком, не связанным с магнитопроводом или другой обмоткой трансформатора, и зависят от конфигурации и взаимного расположения обмоток ВН и НН трансформатора, а также от его конструктивных особенностей (материала, формы и расположения конструктивных элементов: ярмовых балок, стягивающих шпилек, хомутов и т.д.). Определение величин индуктивностей рассеяния расчётным способом не даёт необходимой точности [48, 101], поэтому целесообразно их определение инструментальными (измерительными) средствами. В соответствии с методикой [19, с.119], замкнув перемычкой фазную обмотку НН, измеряется индуктивность фазной обмотки ВН. Полученное значение индуктивности  $L_p = 12,06$  мГн соответствует сумме индуктивностей рассеяния обмоток ВН и НН фазы трансформатора. Приняв допущение о равномерном распределении  $L_p$  между этими обмотками, получим:

$$L_{p1} = \frac{L_p}{2} = \frac{12,06}{2} = 6,03 \text{ мГн}$$

$$L_{p2} = \frac{L_{p1}}{k_{mp}^2} = \frac{L_{p1}}{(U_{\phi1}/U_{\phi2})^2} = \frac{6,03}{(3464/606,2)^2} = 0,1847 \text{ мГн}$$

### 3.2 Исследование объекта методами моделирования и анализ полученных результатов

Компьютерная модель исследований переходных процессов в силовом трансформаторе Siemens ТНЕВ 5639 для шахтной участковой КТП с ВКА представлена на рисунке 3.5. Коммутаторы S1 – S3 представлены моделью ключа, управляемого напряжением. В открытом состоянии он имеет сопротивление 100 Мом, а в закрытом – 0,001 Ом. При смене состояния, это сопротивление изменяется линейно в течении 0,1 мкс.

Сопротивления изоляции обмоток ВН и НН учтены в «паразитных» параметрах ёмкостей C1, C3, C5; C6, C8, C10; C11, C13, C15. Сопротивлениями

R2, R3, R5, R6, R8, R9 моделируются шунтирующие резисторы САОП (в состоянии, показанном на рисунке 3.5, моделируется коммутация трансформатора в режиме холостого хода без этих резисторов).

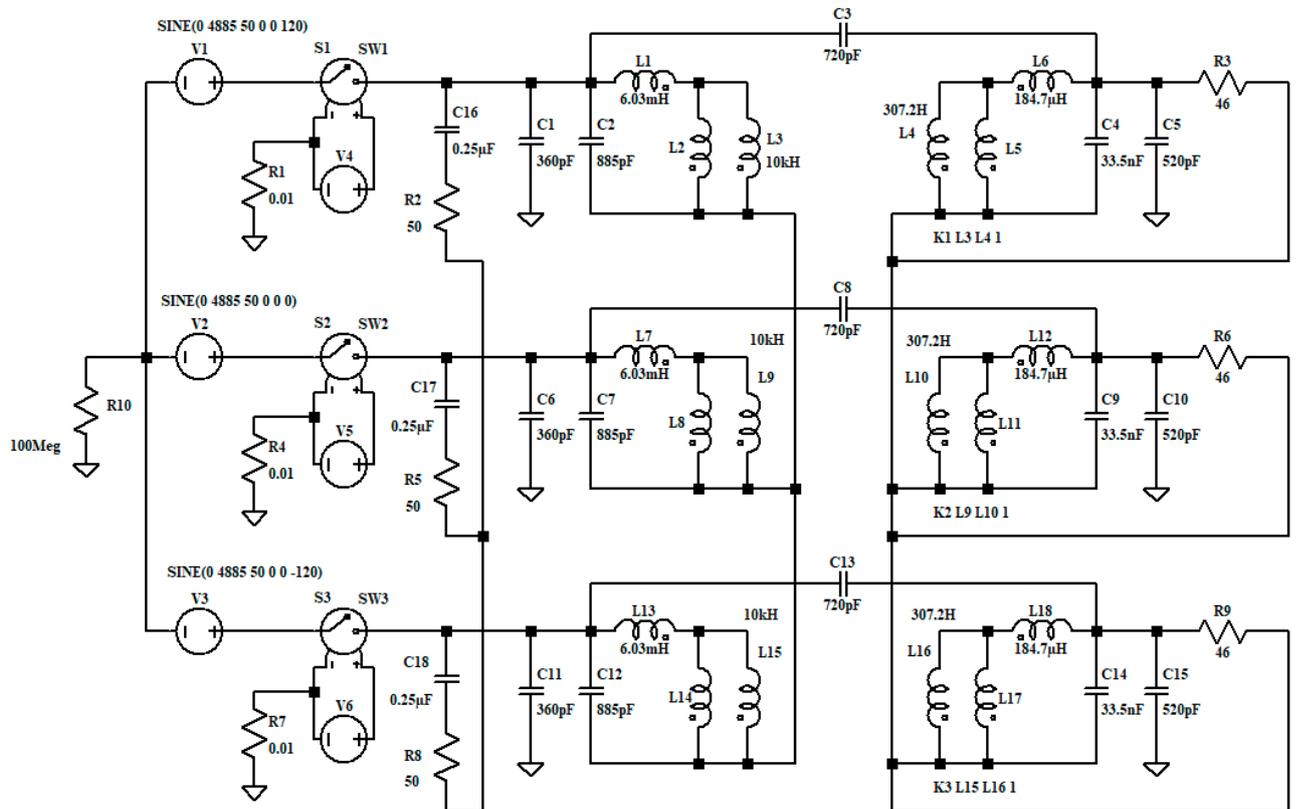


Рисунок 3.5 – Компьютерная модель исследований переходных процессов в силовом трансформаторе Siemens ТНЕВ 5639 шахтной участковой КТП с ВКА

Проверка корректности разработанной модели выполнена путём её тестирования в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) трансформатора и сопоставления данных тока ХХ  $I_{xx}$  и напряжения КЗ  $U_k$ , полученных при моделировании, с экспериментальными значениями, приведенными в таблице 3.1.

На рисунке 3.6 представлены расчётные величины токов ХХ трансформатора, которые имеют явно-выраженную несинусоидальную форму, амплитудой до 2,4 А. Действующие значения токов ХХ по фазам составили:  $I_A = 870$  мА;  $I_B = 1,107$  А;  $I_C = 793$  мА. Среднее значение расчётного тока ХХ трансформатора вычислено в соответствии с выражением (3.9):

$$I_{xx} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{0,87 + 1,107 + 0,793}{3} = 0,923 \text{ A};$$

$$I_{xx} \% = \frac{I_{xx} \cdot 100}{I_{ном}} = \frac{0,923 \cdot 100}{38,5} = 2,4 \% \quad (3.9)$$

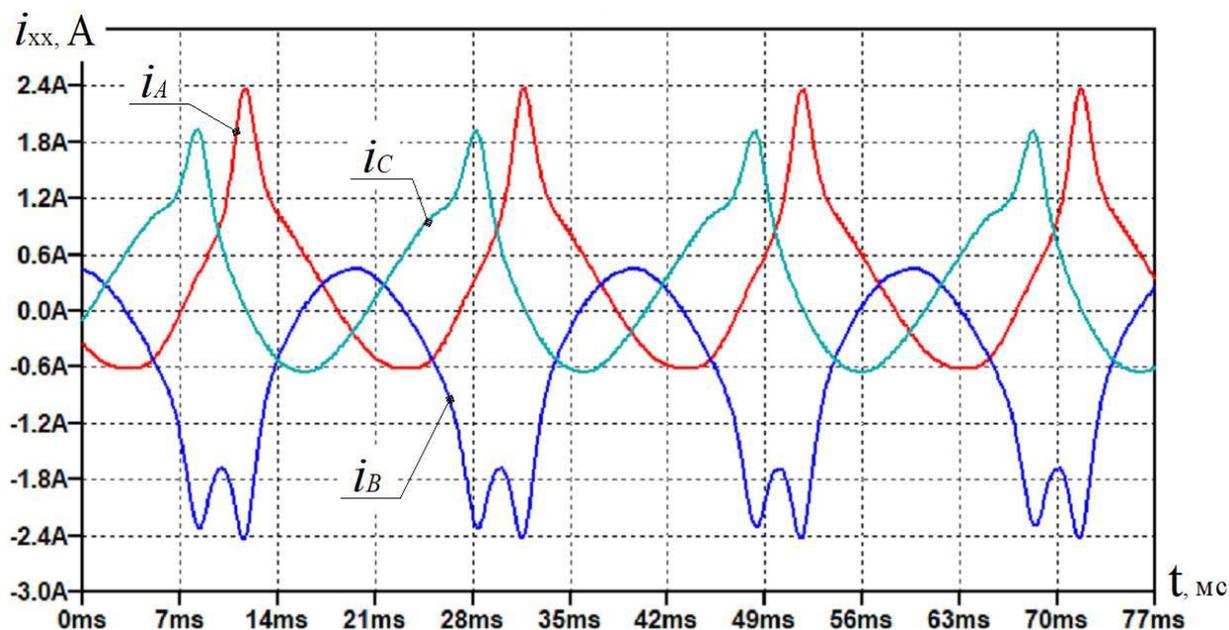


Рисунок 3.6 – Расчётные значения токов XX трансформатора Siemens TNEB 5639 для установившегося режима

Относительная погрешность по сравнению с экспериментальным значением для тока XX составляет  $\delta_{ix} = 2,44\%$ . В опыте короткого замыкания расчётное значение напряжения КЗ составляет  $U_K^{115} = 4,28\%$ , а его относительная погрешность по отношению к экспериментальным данным равна  $\delta_{ук} = 0,71\%$ .

Таким образом, можно сделать вывод о корректности разработанной компьютерной модели и её пригодности к исследованию переходных процессов в комплексе «ВКА – трансформатор».

На рисунках 3.7 – 3.10 представлены результаты моделирования переходных процессов в обмотке ВН фазы «В», при отключении ненагруженного трансформатора на максимальной амплитуде тока среза  $i_B \approx 2,8 \text{ A}$ .

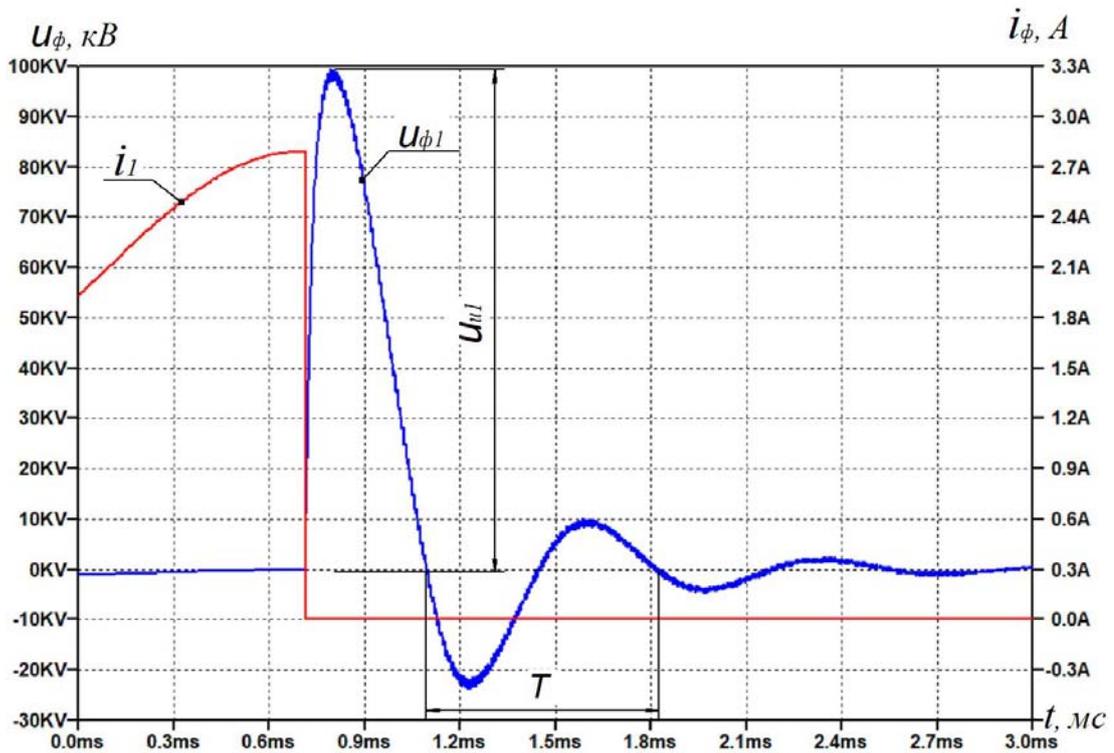


Рисунок 3.7 – Переходной процесс отключения ВКА без использования средств снижения КП

Перенапряжения на рисунке 3.7 характеризуются отсутствием шунтирующих сопротивлений НН и РС-блока, т.е. при расчете, номиналы резисторов R2, R3, R5, R6, R8, R9 составляют 100 Мом (Рисунок 3.5). При этом, отмечается явно-выраженный колебательный процесс с периодом  $T = 0,7$  мс.

Уменьшение частоты собственных колебаний по сравнению с расчетной осциллограммой на рисунке 3.4, очевидно, вызвано увеличением индуктивностей обмоток при увеличении напряжённости магнитного поля в магнитопроводе трансформатора. Кратность КП в данном случае составляет:

$$K_{II} = \frac{U_{ul1}}{U_{m1}} = \frac{100}{4,885} = 20,47$$

Расчетная осциллограмма перенапряжений, представленная на рисунке 3.8, получена в результате шунтирования обмоток НН резисторами  $R3 = R6 = R9 = 46$  Ом. В данном случае, затухание коммутационного импульса

происходит по аperiodической кривой. Кратность перенапряжений при этом составляет:  $K_{II} = 3,68$ .

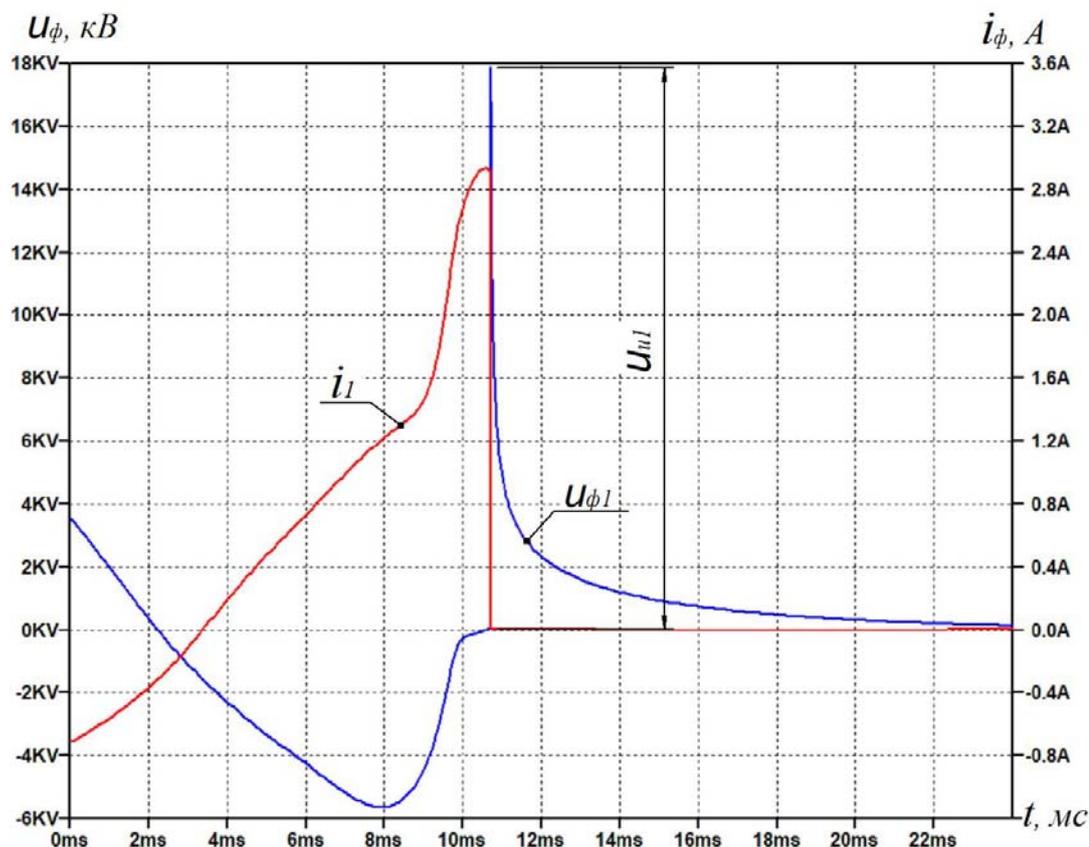


Рисунок 3.8 – Переходной процесс отключения ВКА с подключенными шунтирующими резисторами НН  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$

Расчётный параметр также получен в результате:

- шунтирования обмоток ВН с использованием RC-блока  $R_2=R_5=R_8 = 50 \text{ Ом}$ ,  $C_{16}=C_{17}=C_{18} = 0,25 \text{ мкФ}$  (Рисунок 3.9). Затухание коммутационного импульса происходит в результате колебательного процесса с периодом  $T = 16 \text{ мс}$ , а кратность КП при этом составляет:  $K_{II} = 1,33$ .

- одновременного шунтирования обмоток ВН с использованием RC-блока, а обмоток НН резисторами  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$  (Рисунок 3.10). В данном случае отмечается наиболее эффективное снижение амплитуд КП по аperiodической кривой, при котором амплитудное значение импульса КП не превышает амплитудного значения напряжения питания обмотки, т.е. в данном случае КП отсутствуют.

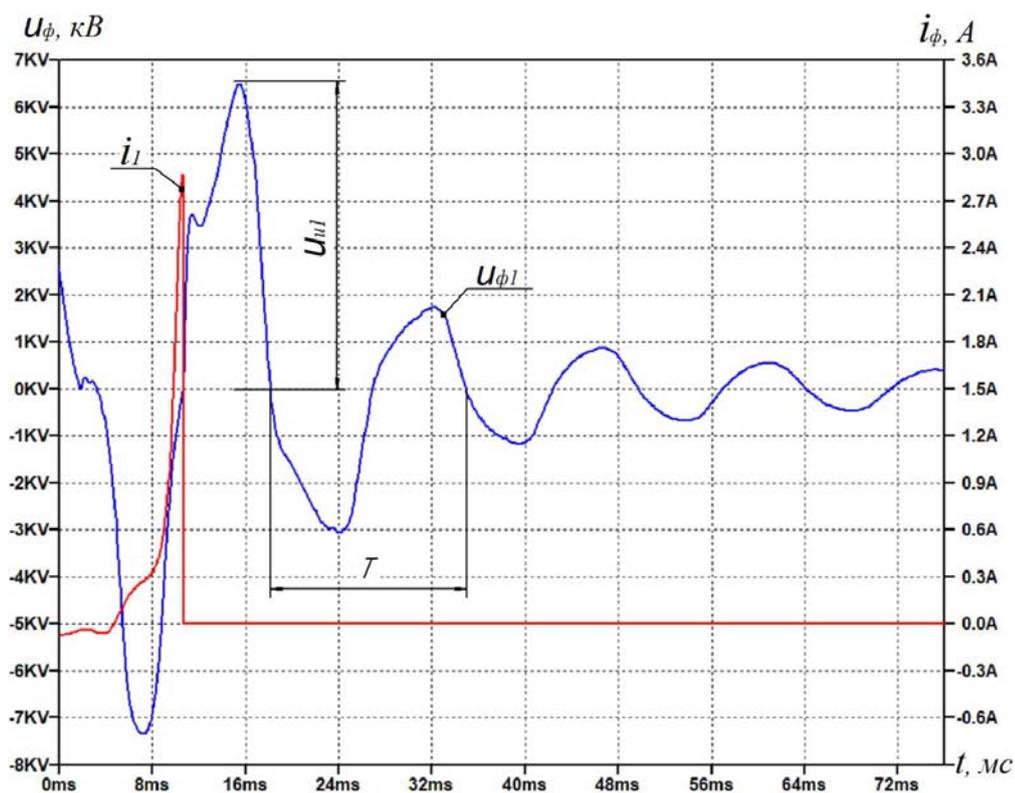


Рисунок 3.9 – Переходной процесс отключения ВКА с применением RC-блока

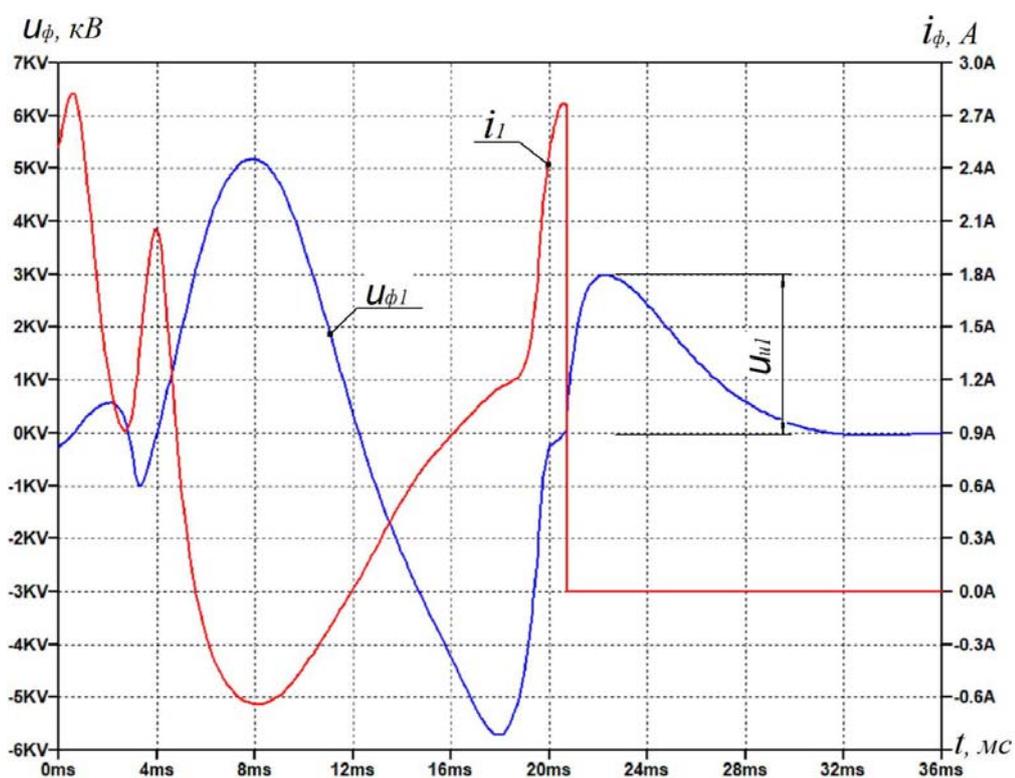


Рисунок 3.10 – Переходной процесс отключения ВКА с использованием RC-блока и шунтирующих резисторов НН  $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$

Представленные на рисунках 3.7 – 3.10 расчётные величины коммутационных перенапряжений, соответствуют отключению трансформатора в установившемся режиме работы (в данном случае через время  $t = 5,5$  с после включения коммутаторов S1 – S3).

3.3 Обоснование способов усовершенствования технических средств подавления коммутационных перенапряжений на основе управляемой коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора подстанции

На основании полученных в предыдущем разделе результатов можно сделать вывод, что эффективность системы автоматического ограничения перенапряжений зависит от номиналов элементов, используемых в средствах снижения КП (RC-блока и  $R_{шНН}$ ). Оставляя неизменными параметры RC-блока, определим рациональные значения номиналов шунтирующих сопротивлений НН. Очевидно, что чем меньшими будут эти сопротивления, тем больший эффект они окажут при подавлении коммутационного импульса. С другой стороны, чрезмерное снижение значений  $R_{шНН}$  приводит к их повышенному нагреву, вследствие увеличения выделяемой на них мощности.

Выбор рационального значения шунтирующих сопротивлений НН производится, исходя из критерия оптимальности коэффициента снижения амплитуды коммутационного импульса  $K_C$ , с учетом тепловой энергии, выделяющейся на этих сопротивлениях. Параметр  $K_C$  определяется как отношение амплитуды коммутационного импульса без шунтирующих сопротивлений  $U_{u0}$  к амплитуде коммутационного импульса с шунтирующими сопротивлениями  $U_{ur}$  (3.10 – 3.11):

$$K_C = \frac{U_{u0}}{U_{ur}} \quad (3.10)$$

На рисунке 3.11 представлена зависимость коэффициента  $K_C$  от номинала шунтирующих сопротивлений обмотки низшего напряжения, полученная при моделировании переходного процесса отключения трансформатора. Эта зависимость позволяет получить приемлемый для практического применения коэффициент снижения  $K_C$  в диапазоне ( $1,5 < K_C < 5,5$ ), выбирая значения шунтирующих сопротивлений  $R_{шНН}$  в диапазоне ( $50 \text{ Ом} < R_{шНН} < 750 \text{ Ом}$ ). Следует отметить, что это соотношение приведено для расчетной схемы, в которой РС-блок отключен от обмоток ВН трансформатора.

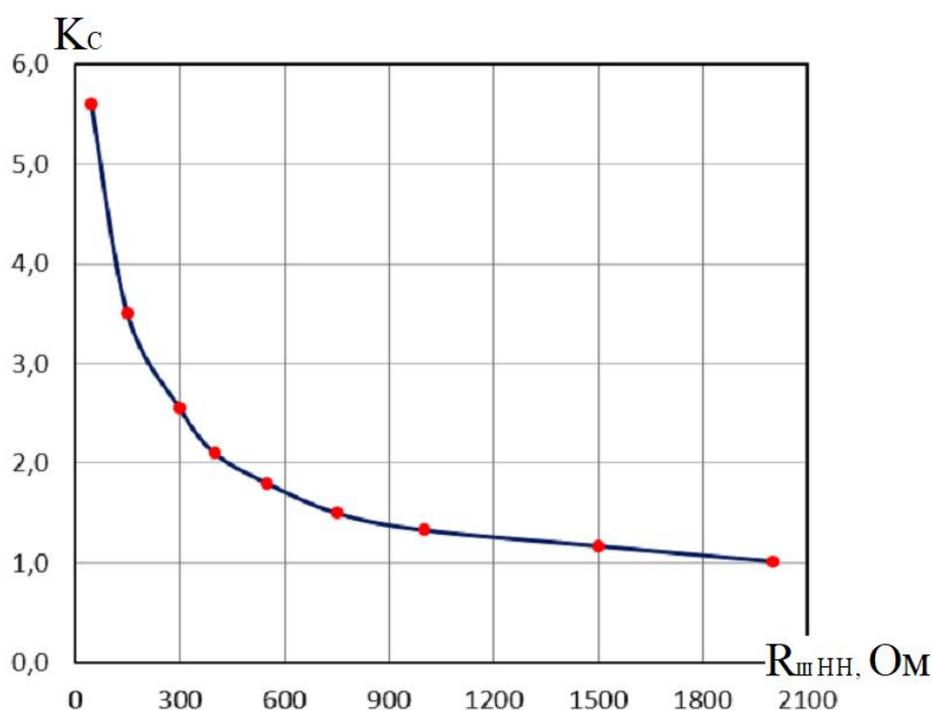


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента подавления коммутационного импульса от номиналов шунтирующих резисторов обмотки НН

Очевидно, что нет необходимости снижать амплитуду коммутационного импульса ниже амплитудного значения напряжения питания, поэтому точкой оптимальности при выборе коэффициента  $K_C$  следует признать такое значение  $R_{шНН}$ , при котором амплитудное значение коммутационного импульса  $U_{ul}$  будет равно амплитудному значению напряжения, питающего обмотку ВН трансформатора  $U_{mf1}$  (3.11):

$$K_C = f(R_{шНН}), \quad \text{при } U_{u1} = U_{m\phi 1} \quad (3.11)$$

Энергия, выделяемая на шунтирующем резисторе за время предварительного шунтирования  $t$ , определяется выражением (3.12):

$$W_r = \int_0^t u_r(t) \cdot i_r(t) dt \quad (3.12)$$

где  $u_r$ ,  $i_r$  – соответственно, напряжение на шунтирующем резисторе и ток в его цепи.

На рисунке 3.12 представлены расчётные осциллограммы потребляемой мощности шунтирующим резистором обмотки НН  $R_{шНН} = 46$  Ом. При графическом интегрировании, за время коммутации  $t = 34$  мс, энергия, выделенная на одном резисторе, составила около  $W_r = 36$  Дж, а потребленная мощность  $P_r = W_r/t = 36/0,034 = 1060$  Вт. Расчётами установлено, что тепловыделение на шунтирующих резисторах НН не зависят от подключения в схему РС-блока, а практические исследования показали, что номинальная рассеиваемая мощность этих резисторов может быть выбрана в 5 – 6 раз меньше интегрированной мощности, вследствие кратковременности процесса нагрева.

Представленный на рисунке 3.12 коммутационный процесс в виде зависимости  $p_R = f(t)$  характеризуется следующими моментами времени:

$t1$  – начало коммутационного процесса (подключение  $R_{шНН}$  к обмотке НН трансформатора);

$t2$  – момент коммутации (момент начала разведения силовых контактов высоковольтного коммутационного аппарата);

$t3$  – завершение коммутационного процесса (отключение  $R_{шНН}$  от обмотки НН трансформатора).

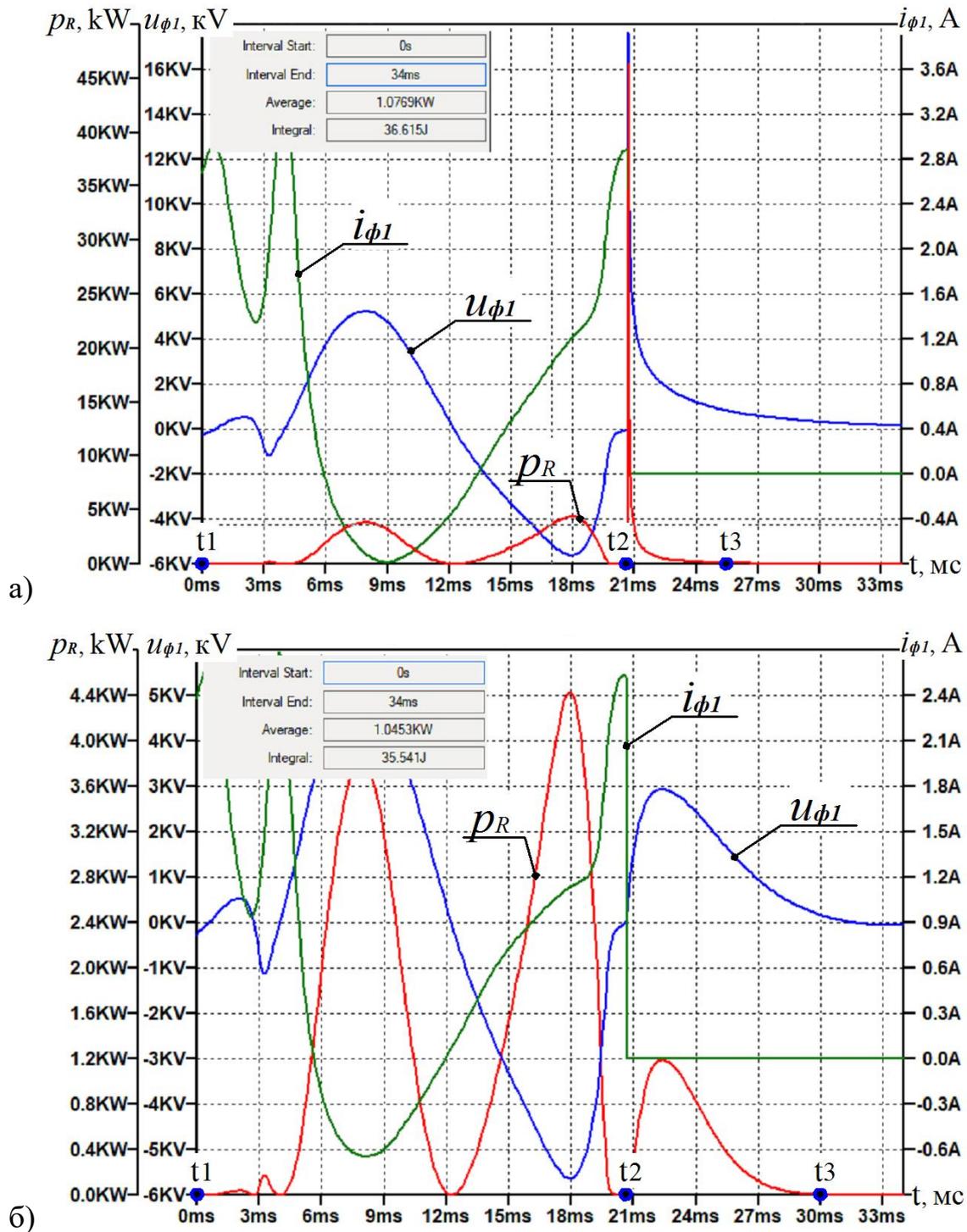


Рисунок 3.12 – Расчётные осциллограммы мощности, выделяемой на шунтирующем сопротивлении обмотки НН номиналом 46 Ом: а) без использования RC-блока; б) с присоединенным RC-блоком

Очевидно, что полезную работу по снижению амплитуды коммутационного импульса шунтирующий резистор выполняет в промежуток времени между моментами  $t_2$  и  $t_3$ , а во временной промежуток между моментами  $t_1$  и  $t_2$

происходит его необоснованный нагрев, влекущий за собой неизбежное увеличение номинальной мощности  $R_{шНН}$ , а следовательно, и его габаритов.

На рисунке 3.13 представлен график зависимости энергии  $W_r$ , рассеиваемой на шунтирующем резисторе  $R_{шНН}$ , от времени предвключения  $t$ , построенный по данным расчетной осциллограммы, приведенной на рисунке 3.12б.

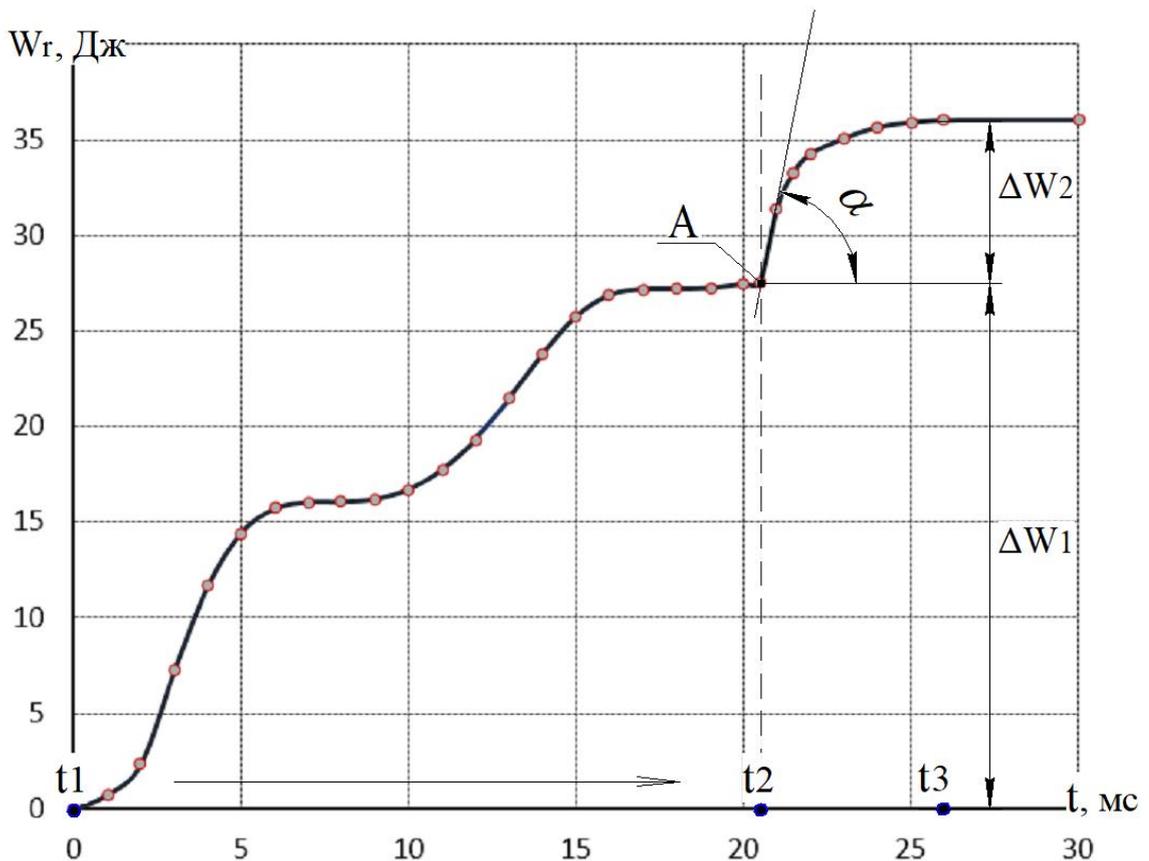


Рисунок 3.13 – Зависимость энергии  $W$ , рассеиваемой шунтирующим резистором  $R_{шНН}$ , от времени предвключения  $t$

Представленная на рисунке 3.13 зависимость  $W_r = f(t)$  характеризуется скоростью роста энергии, рассеиваемой шунтирующим резистором, в момент времени  $t$  после включения коммутатора К2 (3.13):

$$W_r'(t) = \frac{dW_r}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W_r}{\Delta t} \quad (3.13)$$

Характерными показателями также являются: энергия, выделившаяся на  $R_{шНН}$  в промежуток времени между включением коммутатора К2 и отключением ВКА –  $\Delta W_1$  и энергия, выделившаяся на  $R_{шНН}$  после отключения ВКА –  $\Delta W_2$ . Для исследуемого объекта указанные параметры составляют:  $\Delta W_1 = 27,56$  Дж,  $\Delta W_2 = 7,98$  Дж. Время окончания переходного процесса  $t_3$  характеризуется условием, при котором  $W_r'(t) \rightarrow 0$ .

Таким образом, исходя из критерия эффективности использования рассеиваемой мощности шунтирующих сопротивлений  $R_{шНН}$ , оптимальным условием работы системы автоматического ограничения перенапряжений является совмещение моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , т.е. подключение шунтирующего резистора к обмотке НН трансформатора в момент начала размыкания силовых контактов высоковольтного коммутационного аппарата подстанции (3.14):

$$W_r'(t) \rightarrow 0, \text{ при } t_1 \rightarrow t_2 \quad (3.14)$$

Общее условие оптимальности работы САОП представлено системой (3.15):

$$\begin{cases} K_C = f(R_{шНН}), \text{ при } U_{u1} = U_{m\phi 1} \\ W_r'(t) \rightarrow 0, \text{ при } t_1 \rightarrow t_2 \end{cases} \quad (3.15)$$

Исходя из условия (3.15) видно, что для соблюдения условия оптимальности работы САОП недостаточно только лишь скорректировать параметры средств защиты от коммутационных перенапряжений, но также необходимо синхронизировать процессы коммутации ВКА с процессами коммутации средств защиты, формируя общий алгоритм функционирования системы автоматического ограничения перенапряжений в составе КТП. Разработка такого алгоритма представлена в главе 4.

### 3.4 Исследование процесса формирования и ограничения коммутационных перенапряжений комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в условиях применения управляемо-коммутируемых элементов шунтирования обмоток трансформатора

Аналитическое исследование электромагнитных процессов в комплексе «ВКА – трансформатор» выполняется путем компьютерного моделирования объекта с учетом условий оптимальности, обоснованных в предыдущем разделе.

Компьютерная модель объекта исследований, учитывающая общее условие оптимальности функционирования САОП, представлена на рисунке 3.14. По сравнению с исходной компьютерной моделью (Рисунок 3.5), схема, приведенная на рисунке 3.14, снабжена дополнительными коммутаторами S4, S5, S6, включение которых происходит синхронно с отключением коммутаторов S1, S2, S3, моделирующих работу ВКА.

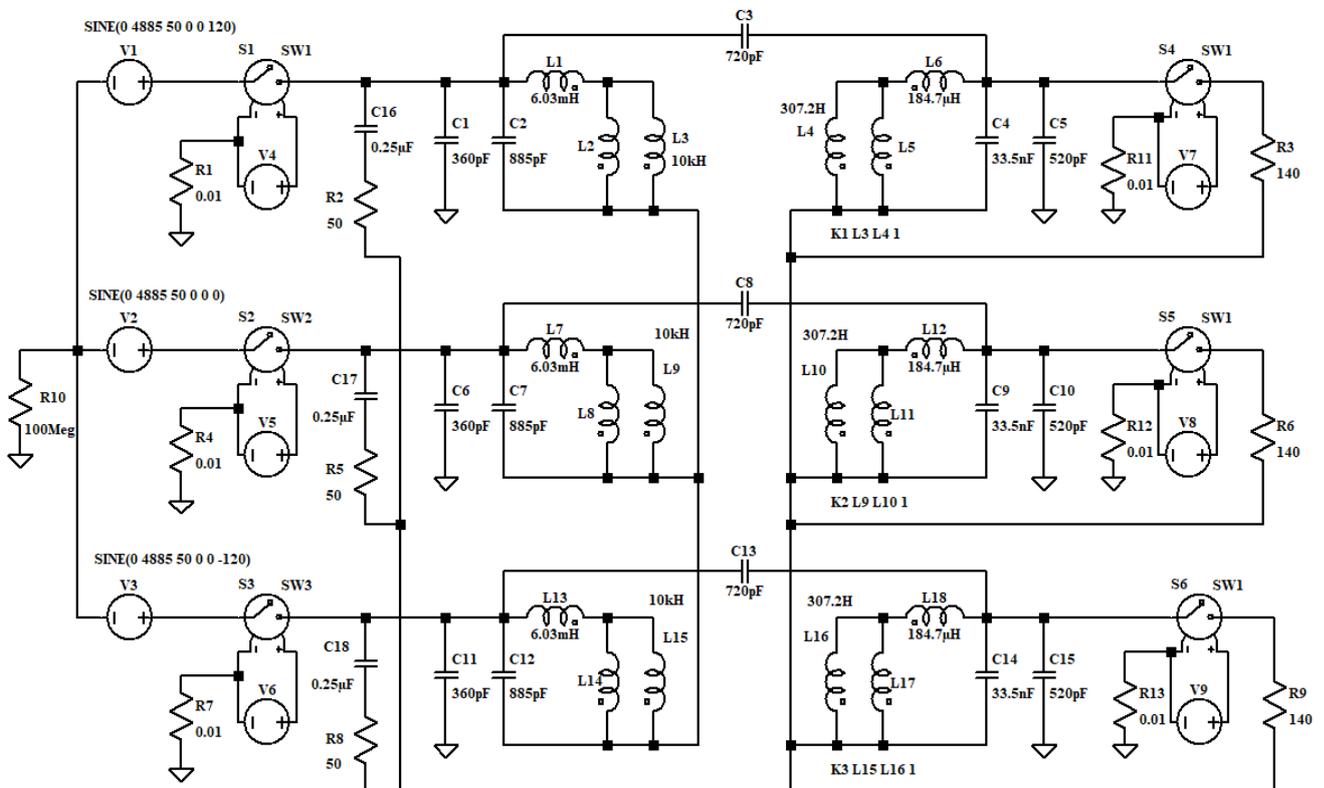


Рисунок 3.14 – Компьютерная модель объекта исследований с учетом общего условия оптимальности функционирования САОП

Отключение коммутаторов S4, S5, S6 происходит после гарантированного завершения переходного процесса в обмотках трансформатора (в данном случае – через 20 мс после отключения ВКА).

Изменением величин шунтирующих резисторов R3, R6, R9, достигается выполнение условия оптимальности по критерию коэффициента  $K_C$  ( $U_{ul} = U_{m\phi 1}$ ) при максимальном, для исследуемого объекта, токе среза ( $i_B \approx 2,8$  А). Равенство амплитудного значения коммутационного импульса  $U_{ul}$  и амплитудного значения фазного напряжения обмотки ВН трансформатора  $U_{m\phi 1}$  произошло при значениях сопротивлений  $R3 = R6 = R9 = 140$  Ом. Коэффициент снижения амплитуды коммутационного импульса, согласно графику (Рисунок 3.11), в данном случае, составил  $K_C = 3,6$ .

Переходной процесс отключения ВКА, учитывающий общее условие оптимальности функционирования САОП, представлен на рисунке 3.15.

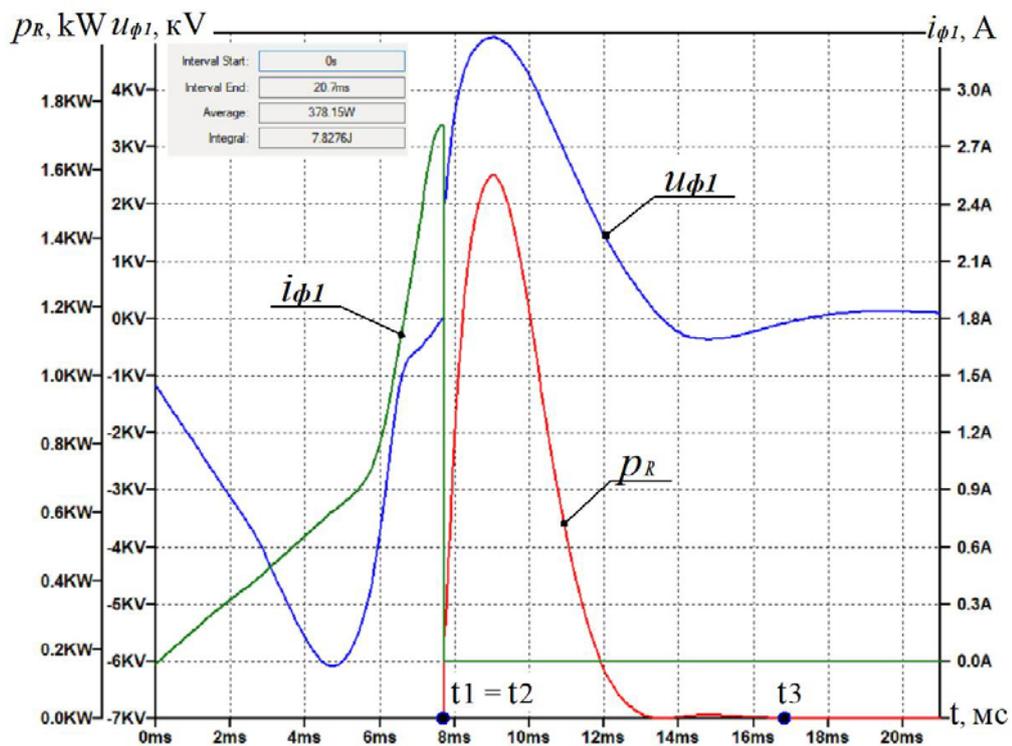


Рисунок 3.15 – Переходной процесс отключения ВКА, учитывающий общее условие оптимальности функционирования САОП

Так как шунтирующие резисторы были задействованы в работе схемы в соответствии с условием оптимальности функционирования САОП (т.е.  $t_1 = t_2$ ),

то на шунтирующем сопротивлении произошло рассеивание всего 7,82 Дж энергии, что в 3,5 раза меньше, чем при 20-ти миллисекундном предвключении (Рисунок 3.12).

Произведя сравнение расчетных осциллограмм, представленных на рисунках 3.12 и 3.15, следует отметить, что при графическом интегрировании кривой  $p_R = f(t)$  в промежутке между моментами времени  $t_2$  и  $t_3$ , энергия, рассеиваемая на шунтирующем резисторе  $W_R$  и средняя величина рассеиваемой мощности  $P_R$  практически не изменяются, в то время, как пиковая мощность  $P_{mR}$  и длительность переходного процесса  $\Delta t$  – различны.

Данные таблицы 3.2, полученные в результате компьютерного моделирования переходного процесса отключения ВКА, учитывающего общее условие оптимальности функционирования САОП при различных значениях величины шунтирующего резистора, с учетом наличия или отсутствия RC-блока, показывают, что в диапазоне значений  $50 \text{ Ом} < R_{шнн} < 1000 \text{ Ом}$  параметры  $W_R$  и  $P_R$  неизменны.

Таблица 3.2 – Сравнительный анализ энергетических показателей переходного коммутационного процесса отключения трансформатора при различных условиях коммутации

Условие коммутации		Значение параметра		
Величина $R_{шнн}$ , Ом	Наличие RC-блока	$W_R$ , Дж	$P_R$ , Вт	$P_{mR}$ , кВт
46 Ом	Отсутствует	7,77	370	46
	Присутствует	7,65	361	1,2
100 Ом	Отсутствует	7,83	380	58
	Присутствует	7,8	375	1,4
140 Ом	Отсутствует	8,0	385	71
	Присутствует	7,82	378	1,5
200 Ом	Отсутствует	7,8	375	84
	Присутствует	7,69	363	1,9
500 Ом	Отсутствует	7,7	364	111
	Присутствует	7,44	355	2,4
1000 Ом	Отсутствует	7,67	362	144
	Присутствует	7,23	340	3,4

Отсюда вывод – мощность шунтирующего резистора не зависит от его номинала при соблюдении условия подключения шунтирующего резистора к обмотке НН трансформатора в момент начала размыкания силовых контактов высоковольтного коммутационного аппарата КТП.

Некоторое снижение величин  $W_R$  и  $P_R$  при значениях  $R_{шНН} = 500$  и  $1000$  Ом можно объяснить перераспределением рассеиваемой энергии, запасенной в реактивных элементах системы, из шунтирующих резисторов  $R_{шНН}$  в магнитопровод трансформатора и резисторы RC-блока.

Параметр  $\operatorname{tg}\alpha$ , указанный на рисунке 3.13, характеризует скорость роста энергии на шунтирующем сопротивлении  $R_{шНН}$  при воздействии на него импульса КП. При помощи компьютерной модели установлено, что  $\operatorname{tg}\alpha$  напрямую зависит от величины емкости RC-блока: чем больше емкость конденсаторов RC-блока, тем меньше  $\operatorname{tg}\alpha$  и тем равномернее происходит нагрев  $R_{шНН}$ . Напротив, при отсутствии RC-цепей  $\alpha \rightarrow 90^\circ$ ,  $\operatorname{tg}\alpha \rightarrow \infty$ , а вся энергия коммутационного импульса выделяется на шунтирующем отмотку НН резисторе за более короткий промежуток времени.

Наличие в схеме RC-блока приводит не только к снижению амплитуды коммутационного импульса и крутизны его переднего фронта, но и к уменьшению пиковой мощности на резисторе, шунтирующем обмотку НН трансформатора.

Сравнение расчетных осциллограмм, полученных в результате моделирования, с результатами эксперимента, представленных на рисунке 3.16, позволяет сделать заключение о визуальном приближении расчетных параметров амплитуды, длительности и крутизны переднего фронта коммутационного импульса к аналогичным соответствующим параметрам, полученным при эксперименте на физической модели.

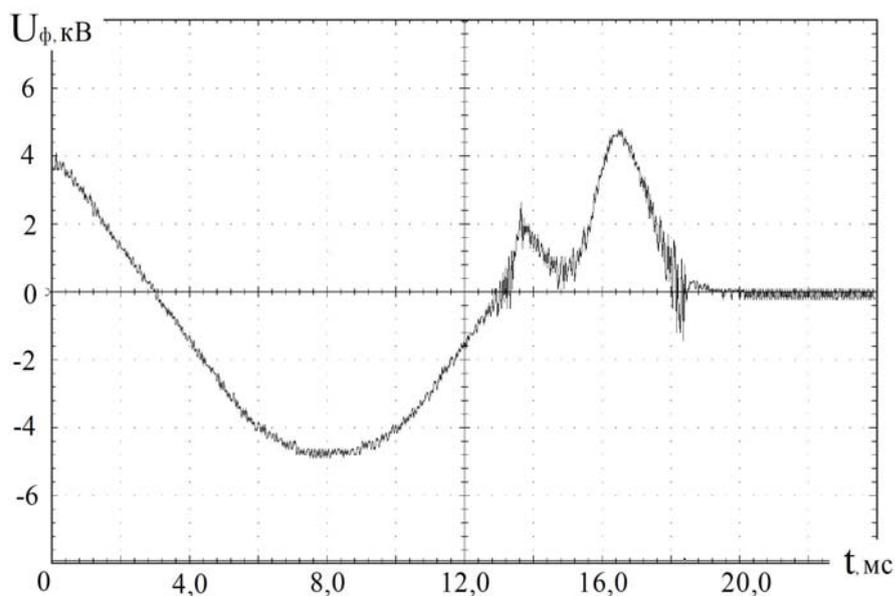


Рисунок 3.16 – Экспериментальная осциллограмма КП (Фаза В) при отключении трансформатора вакуумным контактором с использованием в качестве средств снижения амплитуды КП RC-блока и шунтирующих резисторов  $R_{шНН} = 140 \text{ Ом}$

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана электромагнитная модель комплекса «ВКА – трансформатор» применительно к КТП (перспективных серий) технологического участка энергоёмкого предприятия, адаптированная к исследованию параметров эффективности технических средств снижения КП. Проведенный на её основе анализ переходных процессов, показал высокую эффективность метода предварительного шунтирования обмоток НН силового трансформатора активными сопротивлениями с одновременным подключением RC-блока к обмоткам ВН.

2. При отключении трансформатора с использованием в качестве средств снижения КП только шунтирующих сопротивлений в обмотках НН, возможно получение заданного коэффициента снижения КП в диапазоне  $(1,5 < K_C < 5,5)$ . Совместное использование средств снижения КП в виде RC-блока и  $R_{шНН}$  при отключении трансформатора, в зависимости от номиналов  $R_{шНН}$ , может снизить амплитуду коммутационного импульса ниже амплитудного значения напряжения питания.

3. Мощность шунтирующего резистора не зависит от его номинала при соблюдении условия подключения шунтирующего резистора к обмотке НН трансформатора в момент начала размыкания силовых контактов ВКА.

4. Наличие в схеме RC-блока приводит не только к снижению амплитуды коммутационного импульса и крутизны его переднего фронта, но и к уменьшению пиковой мощности на резисторе, шунтирующем обмотку НН трансформатора.

5. Разработаны критерии оптимальности системы автоматического ограничения перенапряжений, исходя из которых недостаточно только лишь скорректировать параметры средств снижения КП, но также необходимо синхронизировать процессы коммутации ВКА с процессами коммутации средств защиты, формируя общий алгоритм функционирования САОП в составе КТП.

6. Полученные расчётные данные кратностей КП для сухого трансформатора мощностью 400 кВ·А, коммутируемого вакуумным ВКА, визуально совпадают с аналогичными результатами, полученными при экспериментальных исследованиях.

## ГЛАВА 4

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Обоснование схемных и компоновочных решений в области реализации способов управления процессом подавления перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной комплектной трансформаторной подстанции

Техническая реализация результатов исследований может быть выполнена применительно к схеме, структуре и конструкции комплектной трансформаторной подстанции перспективной серии ТВПШ [16]. При этом, в качестве основного объекта привязки технических средств ограничения коммутационных перенапряжений будет выступать силовой трёхфазный трансформатор (6/1,2 кВ) мощностью 1000 кВА, снабжённый высоковольтным вакуумным, либо элегазовым контактором в цепи первичной (6 кВ) обмотки и автоматическим выключателем АЗ792У в цепи вторичной (1,2 кВ) обмотки. Отличительной особенностью схемы этой подстанции является применение универсального микропроцессорного блока защит и управления (БЗУ-ТП), объединившего в себе большинство управляющих функций её электрической схемы. Модернизированный (соответственно результатам диссертационного исследования) БЗУ-ТП имеет три независимых, функционально разделённых исполнительных реле, каждое из которых предназначено для воздействия на соответствующий коммутационный аппарат, расположенный в КТП либо связанный с ним, а именно: автоматический выключатель распределительного устройства низшего напряжения, ВКА распределительного устройства высшего напряжения и высоковольтное КРУ, питающее КТП. Соответственно в электрической схеме КТП выделяются три группы защит силовых цепей: низковольтная, высоковольтная и резервная.

На основании анализа особенностей конструкции и области применения шахтных участковых подстанций перспективных серий практический интерес в

качестве базовых объектов представляют КТП серии ТВПШ 20-го и 22-го исполнений [74].

Электрическая схема подстанции 20-го исполнения представляет собой наиболее универсальный вариант схемного решения. Она содержит как высоковольтный, так и низковольтный коммутационные аппараты, что позволяет наиболее рационально распределить действие защит и блокировок между ними.

Электрическая схема подстанции 22-го типоразмера содержит в своем составе только ВКА, в то время, как низковольтный коммутационный аппарат – отсутствует. Поскольку отечественная промышленность не выпускает коммутационные аппараты на напряжение 1200 и 3300 В и номинальный ток более 1000 А, которые бы удовлетворяли всем требованиям, предъявляемым к их использованию во взрывозащищенных комплектных трансформаторных подстанциях, то данная техническая задача решается одним из двух путей: либо разделением распределительных устройств низшего напряжения на несколько (два и более) независимых фидера, либо использованием в качестве исполнительного коммутационного аппарата ВКА, расположенного в распределительном устройстве высшего напряжения подстанции, где номинальная сила тока существенно ниже. Вторым путем был реализован в конструкции комплектной трансформаторной подстанции серии ТВПШ 22-го типоразмера, которое используется, в основном, для подстанций повышенной мощности (1000 кВ·А и более).

Особенностью данного типоразмера является значительное увеличение количества коммутаций ВКА вследствие перенаправления на него воздействия всей низковольтной группы защит. Кроме того, операции включения – отключения КТП, а также ежедневные проверки аппарата защиты от утечек приведут к тому, что активная часть силового трансформатора 22-го типоразмера будет чаще подвержена влиянию коммутационных перенапряжений, чем 20-го типоразмера.

На основании вышеизложенного, одними из основных требований, предъявляемых к алгоритму функционирования системы автоматического

ограничения перенапряжений (САОП) в структуре шахтной КТП являются: универсальность (САОП должна равноэффективно функционировать при любой схемной конфигурации подстанции), а также нейтральность по отношению к временным параметрам КТП, относящимся к максимальной токовой защите и защите от токов утечки на землю (САОП не должна приводить к увеличению времени срабатывания данных защит).

На рисунке 4.1 представлена структурная схема шахтной участковой КТП серии ТВПШ 20-го типоразмера, дополненная разработанной по результатам диссертационных исследований САОП [53]. Общий алгоритм работы комплектной трансформаторной подстанции изложен в главе 1. В конкретном случае практический интерес представляет непосредственно рассмотрение функционирования САОП.

Схема КТП предусматривает отключение ВКА (QF1) посредством следующих, входящих в ее состав, структурных элементов:

- выключателей местного управления, размещенных на подстанции;
- устройства электромеханической блокировки (ЭМБ);
- поста дистанционного отключения посредством блока дистанционного управления (БДУ-4-2);
- блока защиты и управления трансформаторной подстанцией (БЗУ-ТП), при срабатывании одной из защит высоковольтной группы (для комплектной трансформаторной подстанции 20-го типоразмера);
- блока защиты и управления трансформаторной подстанцией (БЗУ-ТП), при срабатывании одной из защит, как высоковольтной, так и низковольтной группы (для комплектной трансформаторной подстанции 22-го типоразмера), в том числе отключение высоковольтного коммутационного аппарата диспетчером шахты по каналу связи RS-485;
- аппарата защиты от утечки тока на землю (АЗУР.МК для комплектной трансформаторной подстанции 22-го типоразмера);
- нулевого расцепителя (при срабатывании защиты нулевого напряжения).

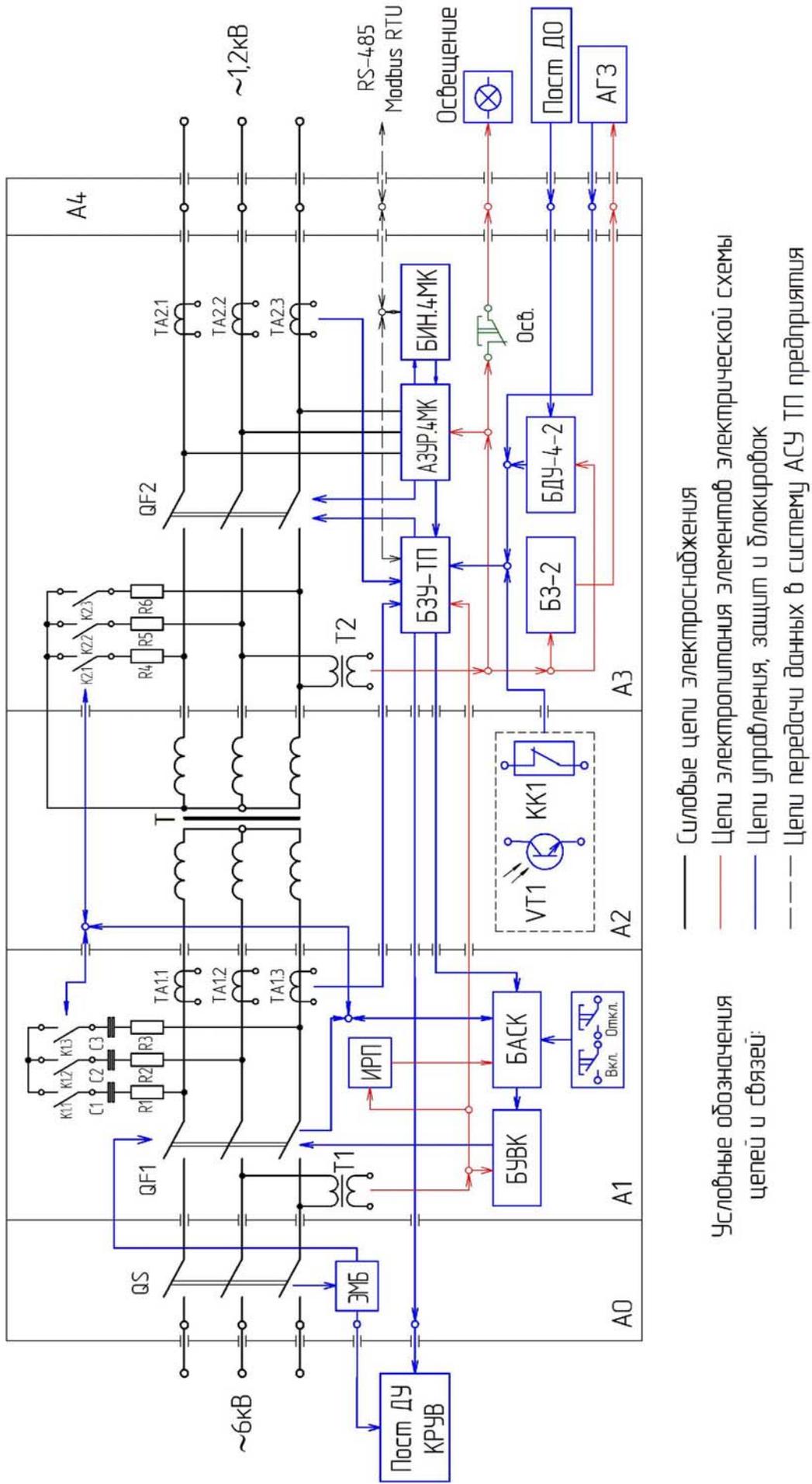


Рисунок 4.1 – Структурная схема шахтной участковой КТП, модернизированной САОП

В соответствии с предъявленным требованием нейтральности по отношению к временным параметрам КТП, команды отключения ВКА условно разделены на две группы (А и Б) в зависимости от причины отключения КТП и её типополнения (Таблица 4.1). При этом, к группе А отнесены причины безусловного отключения (защита от КЗ, защита от утечки тока на землю), при которых САОП функционирует без обратной связи, подтверждающей шунтирование обмоток трансформатора средствами снижения КП.

Соответственно к группе Б относятся причины условного отключения, при которых ВКА отключается только при подтверждении команды шунтирования обмоток трансформатора средствами снижения коммутационных перенапряжений, полученной от САОП.

При подаче команды на включение ВКА, блок автоматической синхронизации коммутаций (БАСК) должен предварительно включить коммутатор К1, в результате чего обмотки высшего напряжения силового трансформатора Т шунтируются РС-блоком, состоящим из резисторов R1 – R3 и конденсаторов С1 – С3. При подтверждении включенного состояния К1 БАСК, воздействуя на блок управления высоковольтным коммутационным аппаратом (БУВК), должен включить высоковольтный коммутационный аппарат. Получив данные о завершении коммутационного процесса, БАСК должен отключить коммутатор К1.

При подаче команды на отключение высоковольтного коммутационного аппарата, блок автоматической синхронизации коммутаций (БАСК) должен предварительно включить коммутаторы К1 и К2, в результате чего обмотки высшего напряжения силового трансформатора Т шунтируются РС-блоком, состоящим из резисторов R1 – R3 и конденсаторов С1 – С3, а обмотки низшего напряжения шунтируются резисторами R4 – R6. При подтверждении включенного состояния коммутаторов К1 и К2 БАСК, воздействуя на блок управления высоковольтным коммутационным аппаратом (БУВК), должен отключить высоковольтный коммутационный аппарат. Получив данные о завершении коммутационного процесса, БАСК должен отключить коммутаторы К1 и К2.

Таблица 4.1 – Группа команды отключения ВКА в зависимости от причины подачи указанной команды и типоисполнения КТП

Причина подачи команды отключения КТП	Функциональный блок, выполняющий отключение	Группа команды отключения при типоисполнении КТП	
		20-е	22-е
МТЗ силового трансформатора	БЗУ-ТП + ТА1	А	А
Проверка функции МТЗ силового трансформатора	БЗУ-ТП	Б	Б
Защита от обрыва фазы (асимметрии линейных токов) в цепях напряжением 6 кВ	БЗУ-ТП + ТА1	Б	Б
Защита от дуговых и искровых явлений в корпусе силового трансформатора	БЗУ-ТП+VT1	Б	Б
Электромеханическая блокировка КТП	ЭМБ	Б	Б
МТЗ отходящего присоединения НН	БЗУ-ТП + ТА2	-	А
Проверка функции МТЗ отходящего присоединения НН	БЗУ-ТП	-	Б
Защита от токов утечки в отходящих присоединениях НН	АЗУР.4МК	-	А
Проверка функции защиты от токов утечки в отходящих присоединениях НН	АЗУР.4МК	-	Б
Защита силового трансформатора от перегрева	БЗУ-ТП+КК1	-	Б
Нулевая защита	БУВК	Б+ИРП	Б+ИРП
Воздействие аппаратуры газовой защиты	БЗУ-ТП+АГЗ	-	Б
Кнопка местного отключения	Кн. Откл.	Б	Б
Дистанционное отключение по каналу связи RS-485 с поста горного диспетчера шахты	БЗУ-ТП	Б	Б
Дистанционное отключение при помощи выносного поста ДО	Пост ДО+БДУ-4-2 +БЗУ-ТП	Б	Б
Защита от обрыва фазы (асимметрии линейных токов) в отходящем присоединении НН	БЗУ-ТП+ТА2	-	Б
Неисправность элементов системы САОП по коду 2	БАСК	Б	Б

Для корректной работы при срабатывании защиты нулевого напряжения, САОП должна иметь источник внешнего питания (ИРП) в виде аккумулятора или накопительного конденсатора, энергии которого должно быть достаточно для однократного срабатывания САОП при отсутствии напряжения в сети 6 кВ.

В момент включения трансформатора в сеть, при определенных неблагоприятных условиях, когда в сердечнике имеется значительная начальная намагниченность, а момент включения совпадает с переходом напряжения через нуль, происходит бросок намагничивающего тока, амплитуда которого может в сотни раз превышать ток холостого хода трансформатора [50, 71].

На рисунке 4.2 приведена расчётная осциллограмма тока холостого хода  $i_{xx}$  фазы «А» трансформатора, при его включении в момент перехода синусоиды напряжения источника питания через нуль.

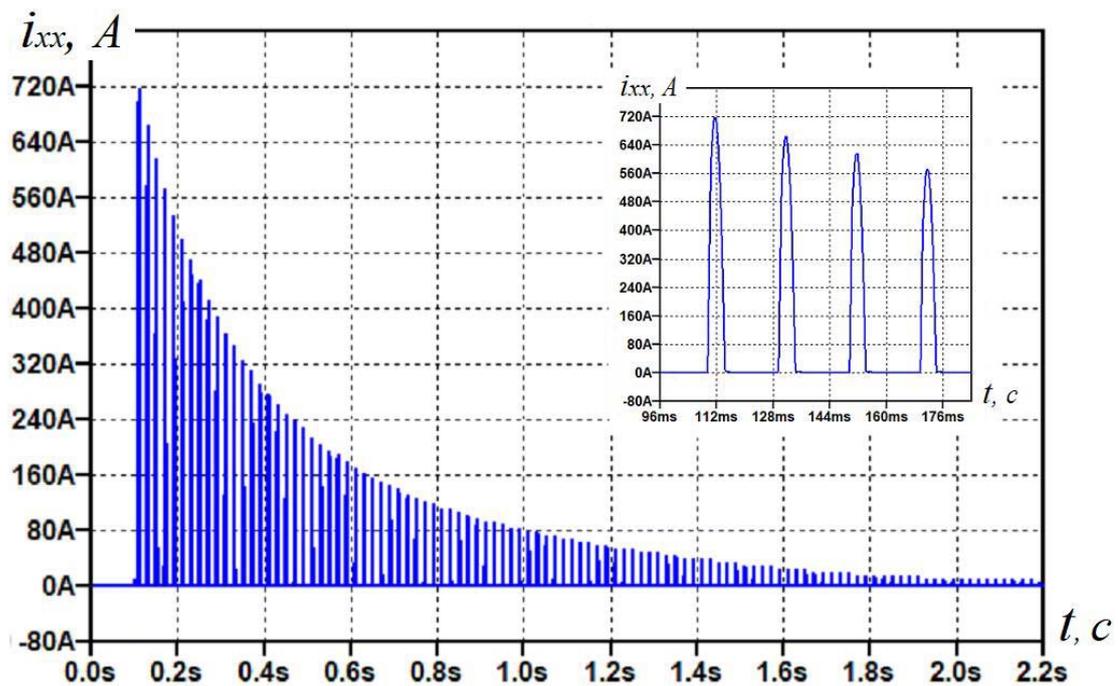


Рисунок 4.2 – Расчётные параметры переходного процесса при включении трансформатора Siemens TNEB 5639 в режиме холостого хода

В случае, если во время этого переходного процесса происходит отключение, момент которого совпадёт с амплитудой намагничивающего тока  $i_{xx}$ , то возможны перенапряжения с кратностью, превышающей 20. Ограничение амплитуды напряжения коммутационного импульса в этом режиме происходит за счёт того, что магнитопровод трансформатора входит в сильное насыщение, вследствие чего снижается его магнитная проницаемость, и значения индуктивностей обмоток высшего и низшего напряжений существенно уменьшаются [77, 84].

Особенность переходного процесса в трансформаторе при его включении, предполагает оснащение САОП функцией задержки времени, запрещающей отключение высоковольтного коммутационного аппарата во время переходного процесса в случае неаварийной коммутации (по группе Б).

Алгоритм функционирования САОП в составе шахтной КТП, оснащенной ВКА, представлен на рисунке 4.3. Этот алгоритм в своей структуре предполагает контроль исправности элементов САОП и включает следующие операции:

- проверку составных элементов RC-блока и резисторов  $R_{шнн}$  на обрыв и короткое замыкание перед включением высоковольтном коммутационном аппарате;

- непрерывный тепловой контроль RC-блока и резисторов  $R_{шнн}$  при включенном высоковольтном коммутационном аппарате;

- контроль состояния коммутаторов К1 и К2 в период коммутации ВКА.

Подача команды на отключение питающей КРУВ, при отказе коммутационных аппаратов КТП производится либо реле резервной группы защит БЗУ-ТП, либо системой автоматического ограничения перенапряжений в результате возникновения ошибки код 3 или код 4.

Перечень кодов ошибок САОП представлен в таблице 4.2.

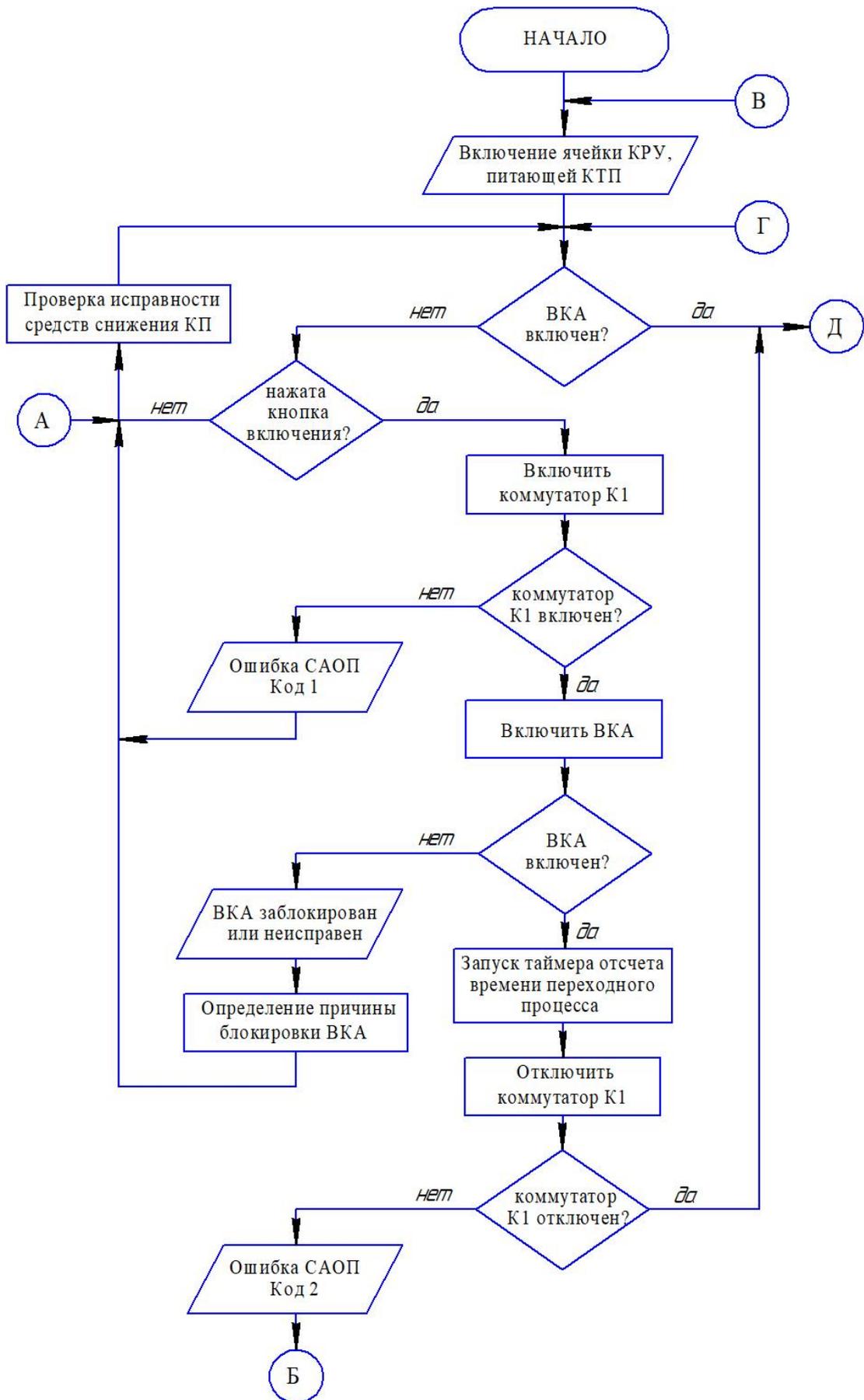
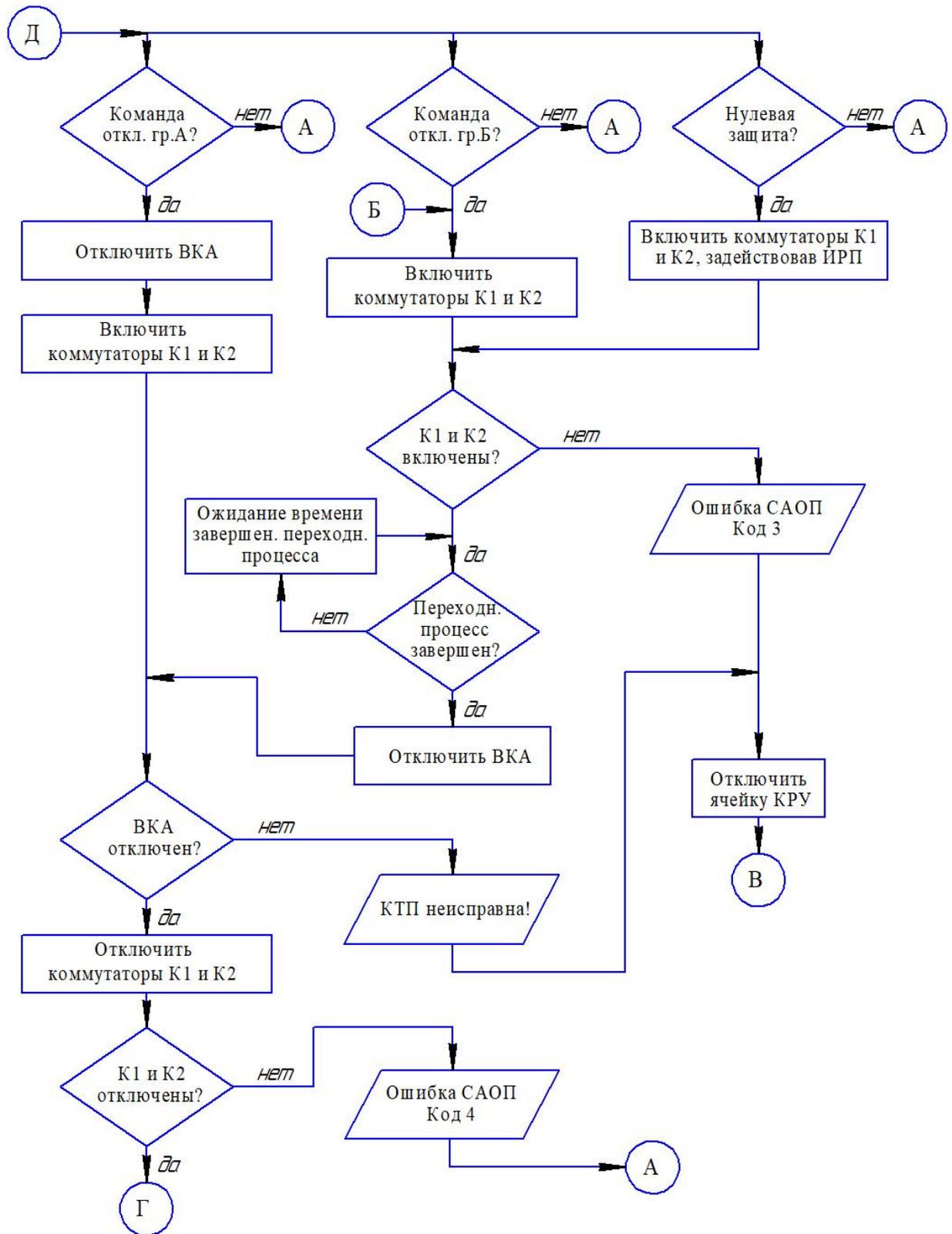


Рисунок 4.3 – Алгоритм функционирования САОП в составе шахтной КТП, оснащенной ВКА



Продолжение рисунка 4.3

Таблица 4.2 – Коды ошибок САОП

Наименование кода ошибки	Обозначение (расшифровка)	Реакция системы
Код 1	При подаче команды включения ВКА, шунтирования обмотки ВН РС-блоком не выполняется	Запрет на включение ВКА
Код 2	При включении ВКА, дешунтирования обмотки ВН по окончании переходного процесса не выполняется	Отключение ВКА по алгоритму команды группы Б
Код 3	При подаче команды отключения ВКА (по группе Б), шунтирования обмоток ВН и НН средствами снижения амплитуд КП не выполняется	Отключение питающей ячейки КРУ
Код 4	После отключения ВКА, средства снижения амплитуд КП, по окончании переходного процесса, не дешунтируют обмотки трансформатора	Запрет на последующее включение ВКА

Представленный выше алгоритм работы САОП не учитывает соблюдение критериев оптимальности, отмеченных условием (3.14). Поэтому, не смотря на достоинство простоты технической реализации, указанный алгоритм обладает следующими недостатками:

- повышенная номинальная мощность шунтирующих сопротивлений обмотки НН трансформатора, обусловленная их дополнительным нагревом в течение времени собственного отключения высоковольтного коммутационного аппарата, которое, в зависимости от типа последнего, может составлять от 24 до 70 мс [62].

- возможная вероятность отключения высоковольтного коммутационного аппарата без использования средств снижения коммутационных перенапряжений, в случае прихода команды отключения группы А и собственном времени включения коммутатора К2 бóльшем, чем собственное время отключения высоковольтного коммутационного аппарата подстанции.

Устранение указанных недостатков может быть достигнуто реализацией функции автоматической синхронизации коммутаций, основанной на следящем принципе управления временными промежутками коммутационных процессов высоковольтного коммутационного аппарата и коммутатора К2.

## 4.2 Техническая реализация функции автоматической синхронизации коммутаций

Как было отмечено выше, к функциям автоматической синхронизации коммутаций относятся:

- синхронное шунтирование обмоток низшего напряжения силового трансформатора КТП активными сопротивлениями при отключении ВКА;
- синхронное шунтирование обмоток высшего напряжения силового трансформатора трансформаторной подстанции активно-емкостными цепями при включении и отключении высоковольтного коммутационного аппарата.

Процесс шунтирования обмоток низшего напряжения силового трансформатора КТП активными сопротивлениями, выполняемого коммутатором К2, осуществляется исходя из критериев оптимальности работы САОП и синхронизирован с процессом размыкания силовых контактов ВКА. А процесс шунтирования обмоток высшего напряжения силового трансформатора КТП активно-емкостными цепями, выполняемого коммутатором К1, осуществляется исходя из критерия коммутационной способности коммутатора К1 и синхронизирован с моментом перехода кривой сетевого напряжения через нуль.

На основании того, что работа коммутаторов К1 и К2 в процессе функционирования САОП организована на различных принципах, то разработку устройств управления данными коммутаторами также целесообразно проводить отдельно.

### 4.2.1 Разработка структуры и алгоритма функционирования устройства управления коммутатором шунтирующих сопротивлений обмоток низшего напряжения трансформатора подстанции

Функциональная схема устройства управления коммутатором К2, учитывающая соблюдение критериев оптимальности работы САОП, представлена на рисунке 4.4.

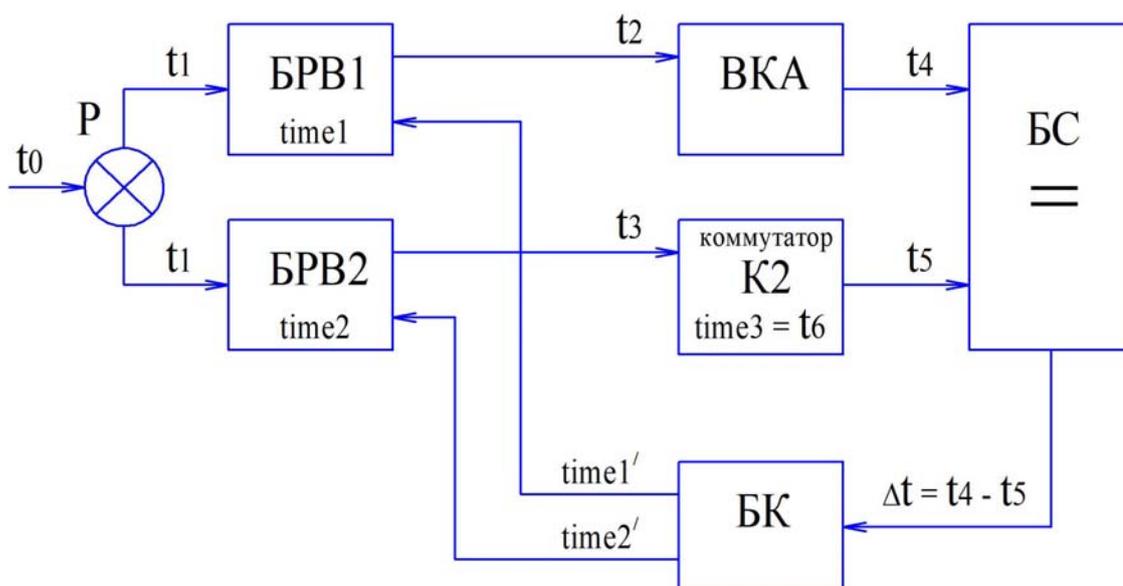


Рисунок 4.4 – Функциональная схема устройства управления коммутатором К2

Принцип работы схемы, представленной на рисунке 4.4, заключается в следующем. В момент времени  $t_0$  команда на отключение ВКА поступает на вход разветвителя Р, предназначенного для формирования синхронных сигналов исходной коммутации, характеризуемых моментом времени  $t_1$ . Эти сигналы подаются на входы блоков реле времени (БРВ1 и БРВ2), которые характеризуются соответствующими временными задержками  $time1$  и  $time2$ , представляющими собой переменные, способные изменять свои значения в процессе работы САОП. Блок БРВ1 на выходе формирует команду отключения ВКА, характеризуемую моментом времени  $t_2$ . Блок БРВ2 на выходе формирует команду включения коммутатора К2, характеризуемую моментом времени  $t_3$ . При этом должно соблюдаться соотношение (4.1):

$$\begin{aligned} time1 &= t2 - t1 \\ time2 &= t3 - t1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Моменты времени  $t_4$  и  $t_5$  соответственно характеризуются началом разведения силовых контактных групп высоковольтного коммутационного аппарата ( $t_4$ ) и завершением процесса включения коммутатора К2 ( $t_5$ ).

В блоке сравнения БС происходит измерение и сравнение моментов времени  $t_4$  и  $t_5$ , а на его выходе формируется разность  $\Delta t = t_4 - t_5$ . Численное значение параметра  $\Delta t$  поступает на вход блока коррекции (БК), который в зависимости от его величины и знака формирует данные по коррекции переменных  $time1$  и (или)  $time2$  в блоках БРВ1 и БРВ2.

На рисунке 4.5 представлена временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1, отображающая общий принцип формирования временных параметров управления ВКА и коммутатора К2. Приведенная диаграмма отображает случай, когда собственное время отключения ВКА, характеризуемое периодом  $T_2 = t_4 - t_2$ , больше собственного времени включения коммутатора К2, характеризуемое периодом  $T_3 = t_5 - t_3$ . Время, когда коммутатор К2 находится во включенном положении характеризуется периодом  $T_4 = t_6 - t_5$ . Также из диаграммы видно, что периоды времени  $T_2$  и  $T_4$  пересекаются, при этом время пересечения соответствует параметру  $\Delta t = t_4 - t_5$ . Фактически,  $\Delta t$  – это период времени когда высоковольтный коммутационный аппарат и коммутатор К2 одновременно находятся во включенном состоянии.

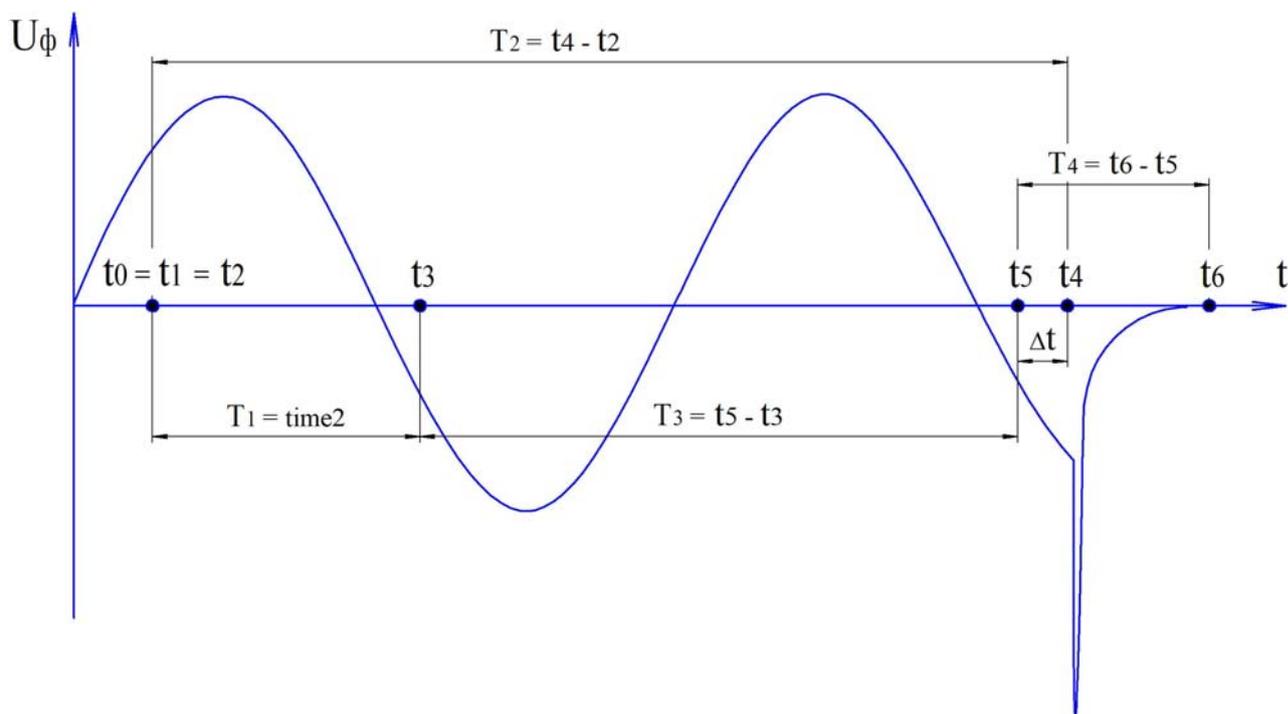


Рисунок 4.5 – Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К2

Очевидно, что одним из условий оптимальности работы САОП является условие, когда параметр  $\Delta t \rightarrow 0$ . Однако в реальном физическом объекте присутствуют факторы погрешности системы управления, возникающие вследствие дребезга контактных групп коммутационных аппаратов, разброса времен их собственного срабатывания и т.д.

Поскольку позволить параметру  $\Delta t$  перейти в область отрицательных значений недопустимо, поэтому устанавливается некоторый запас времени, характеризуемый константой  $\xi$ , которая позволяет учесть несовершенство физического объекта. Следовательно, условием оптимальности функционирования САОП для реального физического объекта является (4.2):

$$\Delta t \rightarrow \xi \quad (4.2)$$

Соблюдение условия (4.2) входит в функциональное назначение блока коррекции (БК), алгоритм работы которого представлен на рисунке 4.6.

Представленный на рисунке 4.6 алгоритм функционирования блока БК позволяет скорректировать работу САОП при первом же цикле «включение – отключение» ВКА, которое целесообразно выполнить без подачи сетевого напряжения на обмотки трансформатора. Первая коррекция должна проводиться в заводских условиях, при помощи внешнего источника питания цепей управления, или задействовать ИРП (Рисунок 4.1).

Входной информацией блока коррекции БК являются 4 типа исходных данных:  $\Delta t$  – период времени одновременного состояния во включенном положении ВКА и коммутатора К2;  $\xi$  – константа запаса времени, обусловленная дребезгом контактов ВКА и коммутатора К2;  $time1$  и  $time2$  – переменные, характеризующие задержками времени блоков реле времени БВР1 и БВР2 соответственно. Указанные переменные поступают на вход блока коррекции исходя из условий предшествующего процесса отключения ВКА. После сравнения параметра  $\Delta t$  с константой  $\xi$ , блок коррекции вычисляет новые

значения переменных  $time1$  и  $time2$  таким образом, чтобы выполнялось условие оптимальности функционирования САОП для реального объекта (4.2).

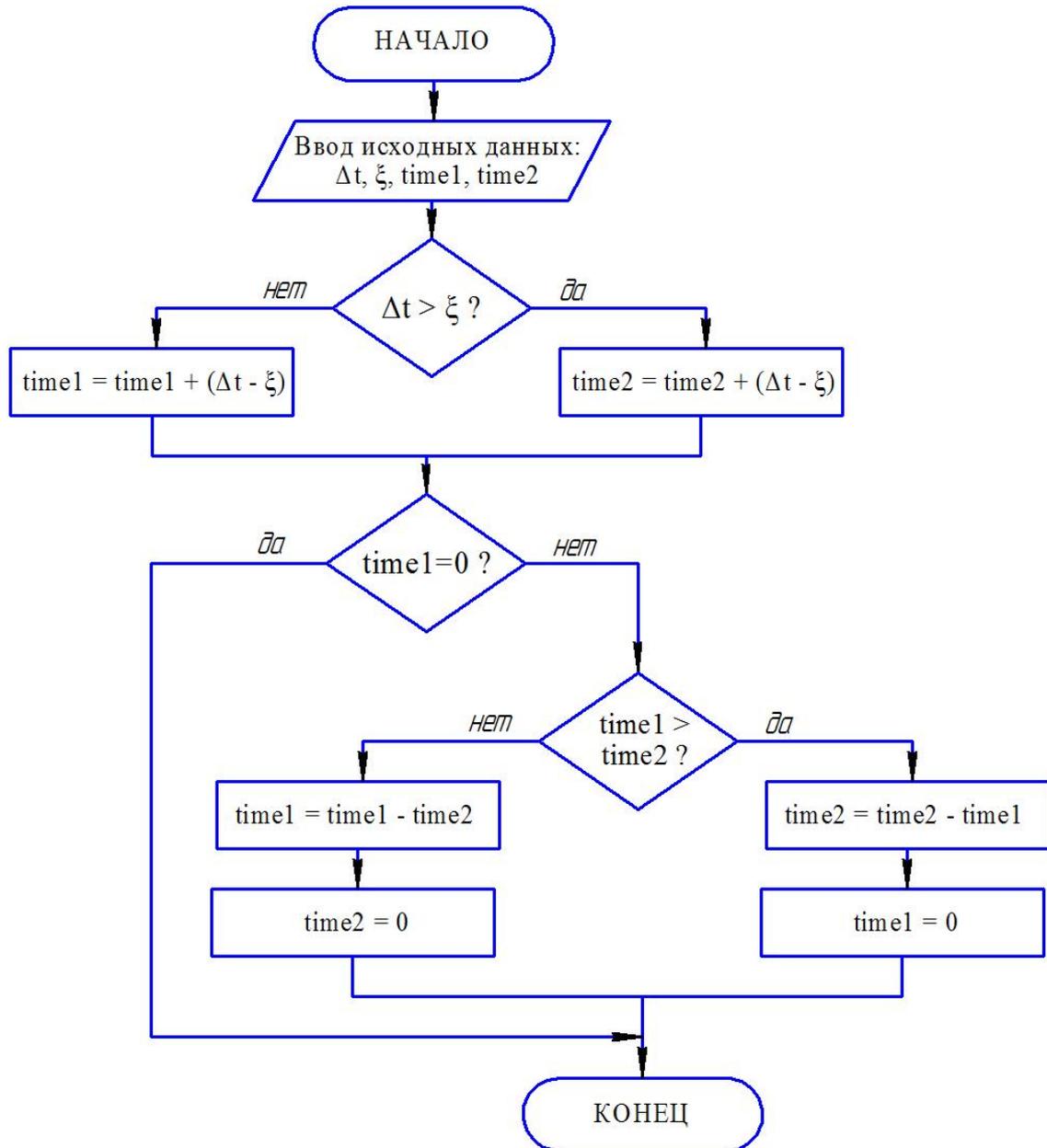


Рисунок 4.6 – Алгоритм функционирования блока коррекции БК

Если собственное время отключения ВКА  $T_2$  составит меньше суммы собственного времени включения коммутатора К2  $T_4$  и константы  $\xi$ , то блок коррекции увеличит значение переменной  $time1$ , что соответственно приведет к увеличению общего времени отключения ВКА. Очевидно, что крайняя мера увеличения значения переменной  $time1$  может быть оправдана только тогда, когда

переменная  $time2 = 0$ . И наоборот, нет необходимости увеличивать временную задержку  $time2$ , если  $time1 \neq 0$ . Поэтому алгоритм функционирования блока коррекции содержит проверку вышеупомянутых условий, приравнивая к нулю значение одной из переменных  $time1$  или  $time2$ , корректируя оставшуюся переменную  $time$  с учетом нулевого значения смежной переменной  $time$ .

Таким образом, одним из важнейших условий выбора коммутатора К2 при проектировании САОП, будет условие (4.3):

$$T_2 \geq T_3 + \xi \quad (4.3)$$

Алгоритм функционирования блока коррекции предусматривает обработку ситуации, когда условие (4.3) не выполняется. Однако такой режим уже не будет оптимальным режимом работы САОП. Поэтому система должна оповестить персонал о необходимости внеочередной ревизии коммутационных аппаратов.

4.2.2 Разработка структуры и алгоритма функционирования устройства управления коммутатором активно-реактивных цепей обмоток высшего напряжения трансформатора подстанции

К коммутатору К1, предназначенному для подключения активно-емкостных цепей к обмоткам ВН силового трансформатора предъявляются следующие требования:

- номинальное напряжение коммутации – не менее 5000 В;
- номинальный ток коммутации – не менее 1А;
- коммутационная способность – не менее 3500 В·А;
- собственное время срабатывания коммутатора К1 должно быть, как минимум, на 30% меньше собственного времени срабатывания ВКА.

Существующие коммутационные аппараты, удовлетворяющие вышеуказанным требованиям, обладают значительными массогабаритными показателями, сопоставимыми с массогабаритными показателями ВКА, из-за чего их использование в конструкции рудничных КТП нецелесообразно.

В то же время, для заявленных целей могут быть использованы высоковольтные вакуумные герконы типа МКА-40142 с Mo-Ti геттерирующим покрытием [2]. Технические характеристики таких герконов представлены в таблице 4.3. Данные таблицы 4.3 показывают, что при прочих удовлетворительных параметрах (в т.ч. и массогабаритных), данные герконы имеют очень низкую коммутационную способность.

Таблица 4.3 – Технические характеристики геркона типа МКА-40142

Максимальная коммутируемая мощность	50 Вт при коммутируемом напряжении до 1000 В 10 Вт при коммутируемом напряжении выше 1000 В
Напряжение, В	5000
Ток (ком.), А	3,0
МДС срабатывания, А	80...180
МДС отпускания, А, не менее	30
Контактное сопротивление, Ом, не более	0,1
Электрическая прочность изоляции постоянного тока, В, не менее	5000 – 10000
Сопротивление изоляции, Ом, не менее	$1 \cdot 10^{11}$
Время срабатывания, мс, не более	3,0
Время отпускания, мс, не более	2,0
Емкость, пФ, не более	1,0
Резонансная частота, Гц, не менее	1000
Диапазон рабочих температур, °С	-60...+125
Повышенная влажность при 35 °С, %, не более	98

Однако, если в процессе коммутации такого геркона выполнить синхронизацию момента переключения его контактов с моментом перехода кривой сетевого напряжения (или тока) через нуль, то коммутируемая мощность также будет околонулевой.

Таким образом, необходимым условием применения высоковольтных герконов типа МКА-40142 для управления активно-емкостными цепями

подавления КП, является использование специального алгоритма коммутации, при котором подключение и отключение средств подавления КП происходит в момент перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль.

Функциональная схема устройства управления коммутатором К1, учитывающая синхронизацию момента включения его контактов с моментом перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль в режиме отключения ВКА, представлена на рисунке 4.7. Управление процессом коммутации выполняется отдельно для каждой фазы коммутатора К1.

При поступлении команды отключения ВКА, характеризуемого случайным моментом времени  $t_0$ , происходит моментальная безусловная подача команды на его отключение. Собственное время отключения ВКА  $T_{02}$ , характеризуется разностью времен между моментом начала разведения силовых контактов ВКА  $t_{04}$  и моментом подачи команды отключения на его блок управления  $t_0$ . Время  $T_{02}$  является паспортной характеристикой для каждого конкретного типа высоковольтного коммутационного аппарата и обычно составляет несколько десятков миллисекунд.

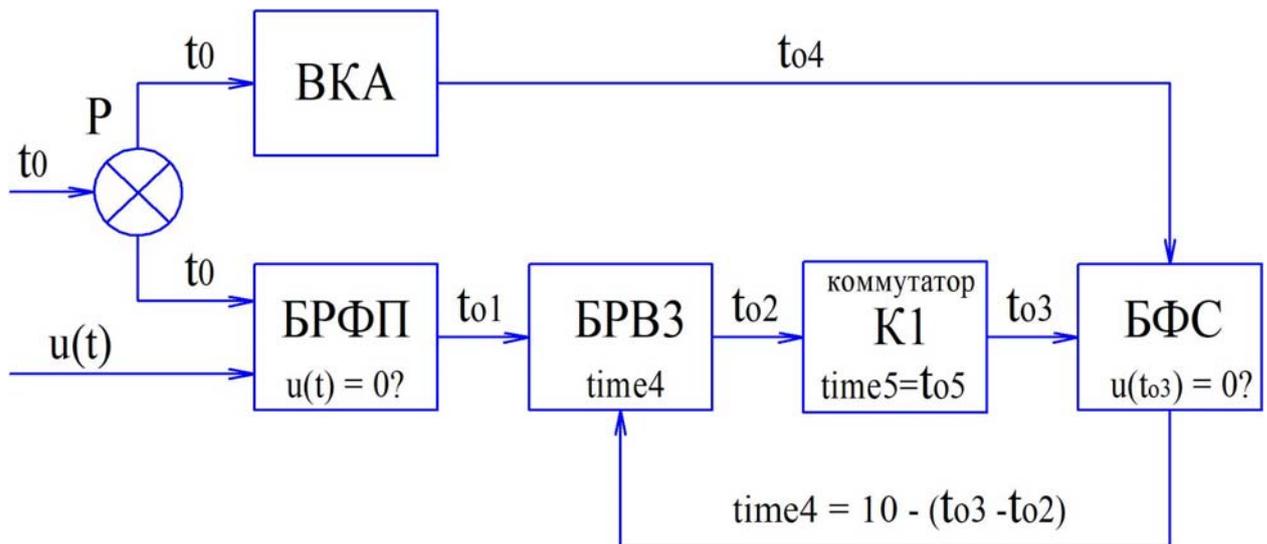


Рисунок 4.7 – Функциональная схема устройства управления коммутатором К1 при отключении ВКА

Одновременно с этим, в момент времени  $t_0$ , блок регистрации фазового перехода (БРФП) запускает процесс отслеживания мгновенных значений фазного напряжения  $u(t)$ . Как только будет выполнено условие  $u(t) = 0$ , характеризующее моментом времени  $t_{01}$ , блок реле времени (БРВЗ) после временной паузы длительностью  $T_{03} = \text{time4}$ , подаст команду на включение коммутатора К1. Величина выдержки времени  $\text{time4}$  выбирается таким образом, чтобы момент замыкания контактов коммутатора К1 произошел в момент перехода кривой сетевого напряжения через нуль (момент времени  $t_{03}$ ).

Блок фазовой синхронизации (БФС) выполняет двоякую функцию: во первых, осуществляется контроль того, что отключение высоковольтного коммутационного аппарата происходит при включенном коммутаторе К1 ( $t_{04} > t_{03}$ ), а во вторых, выполняется проверка того, что замыкание контактов коммутатора К1 произошло при нулевом мгновенном значении фазного напряжения  $u(t_{03}) = 0$ .

При этом, контроль условия  $t_{04} > t_{03}$  выполняется при помощи сравнения моментов времени срабатывания блок-контактов высоковольтного коммутационного аппарата и коммутатора К1. А проверка условия  $u(t_{03}) = 0$  выполняется косвенно, исходя из принятого допущения, что длительность полупериода сетевого напряжения стабильна и составляет 10 мс, т.е. момент замыкания контактов коммутатора К1 будет происходить в момент перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль, если будет выполняться равенство (4.4):

$$T_{\text{КВ}} + T_{03} = T/2 \text{ мс} \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{КВ}}$  – собственное время включения коммутатора К1;  $T_{03} = \text{time4}$  – временная задержка блока БРВЗ;  $T = 20$  мс - период сетевого напряжения.

Если равенство (4.4) не выполняется, то блок БФС осуществляет коррекцию величины временной задержки  $\text{time4}$ .

Отключение коммутатора К1 происходит после завершения переходного процесса в момент времени  $t_{05}$ , который определяется в соответствии с

экспериментальными данными с учетом гарантированного «запаса». Время нахождения коммутатора К1 во включенном состоянии составляет  $T_{04} = t_{05} - t_{03}$ .

Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1, отображающая общий принцип формирования его временных параметров управления для режима отключения ВКА, представлена на рисунке 4.8.

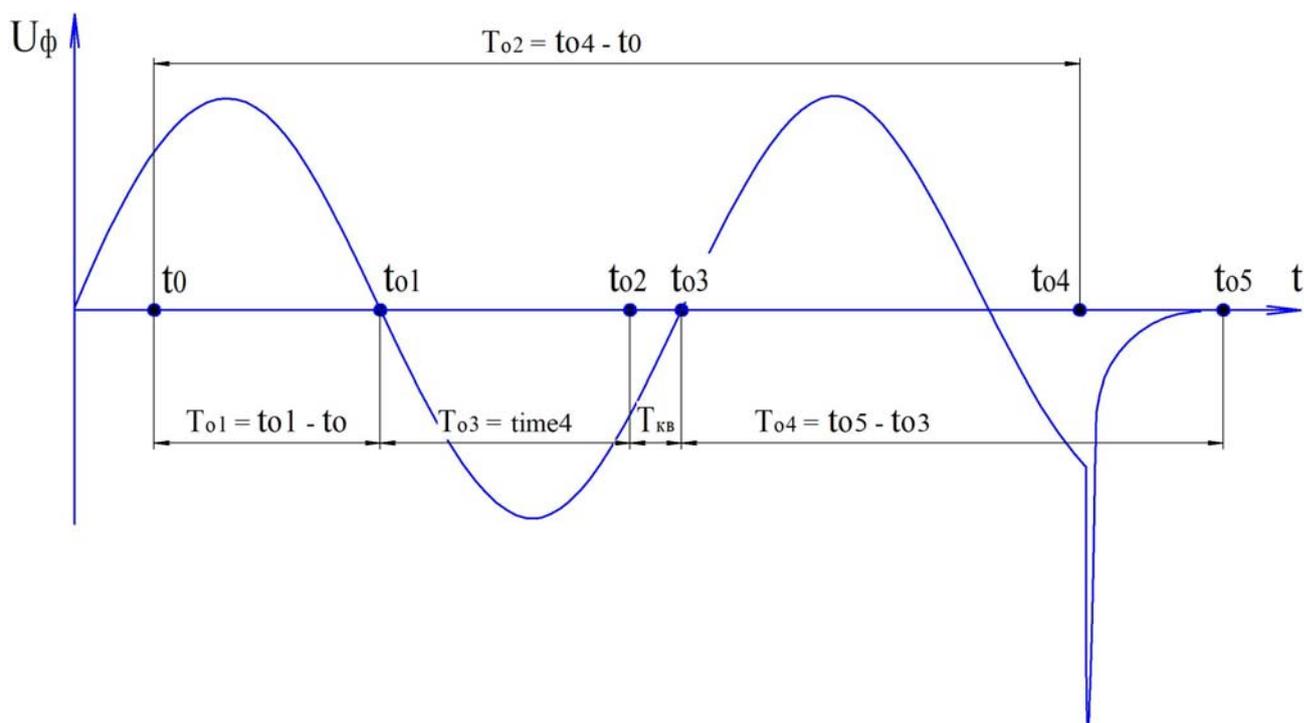


Рисунок 4.8 – Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1 при отключении ВКА

Принцип управления коммутатором К1 при включении высоковольтного коммутационного аппарата остается таким же, как и при его отключении. Различия состоят лишь в последовательности выполняемых операций. Управление также выполняется отдельно для каждой фазы коммутатора К1.

Функциональная схема устройства управления коммутатором К1, учитывающая синхронизацию момента отключения его контактов с моментом перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль в режиме включения высоковольтного коммутационного аппарата, представлена на рисунке 4.9.

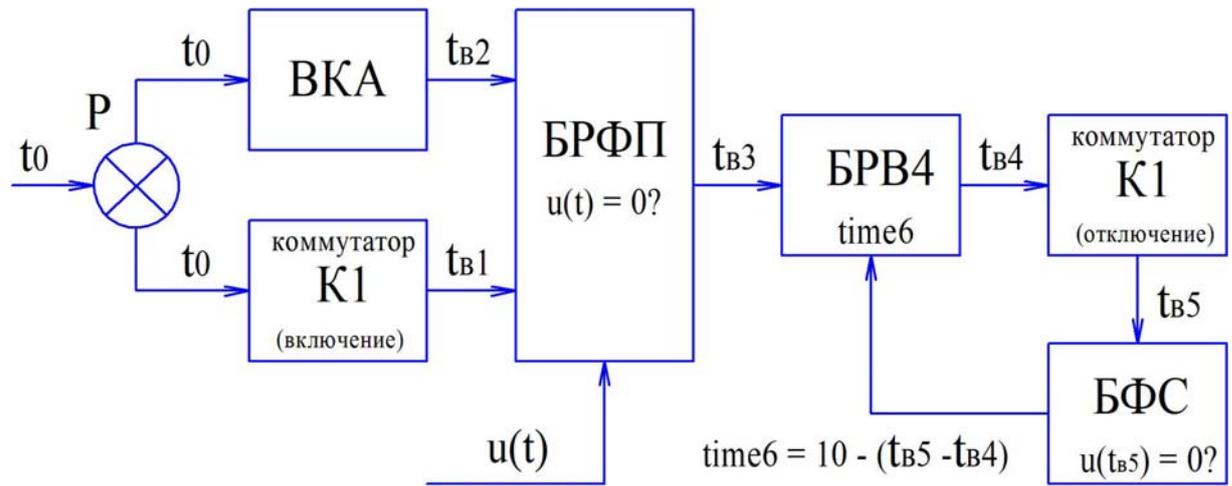


Рисунок 4.9 – Функциональная схема устройства управления коммутатором К1 при включении ВКА

При поступлении команды включения высоковольтного коммутационного аппарата, характеризуемого моментом времени  $t_0$ , происходит безусловная подача команды на включение, непосредственно, ВКА и коммутатора К1. Так как собственное время включения коммутатора К1 гораздо меньше собственного времени включения высоковольтного коммутационного аппарата, то К1 включится раньше, а его включение обозначится моментом времени  $t_{в1}$ . Через некоторое время, характеризуемое моментом  $t_{в2}$ , произойдет включение ВКА.

При подтверждении того, что ВКА и коммутатор К1 одновременно находятся во включенном состоянии, блок регистрации фазового перехода (БРФП) запускает процесс отслеживания мгновенных значений фазного напряжения  $u(t)$ . Как только будет выполнено условие  $u(t) = 0$ , характеризуемое моментом времени  $t_{в3}$ , блок реле времени (БРВ4) после временной паузы длительностью  $T_{в4} = time6$ , подаст команду на отключение коммутатора К1. Значение временной выдержки  $time6$  выбирается таким образом, чтобы момент размыкания контактов коммутатора К1 произошел в момент перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль (момент времени  $t_{в5}$ ).

Блок фазовой синхронизации (БФС) выполняет проверку размыкания контактов коммутатора К1 при нулевом мгновенном значении фазного напряжения  $u(t_{B5}) = 0$ , исходя из условия соблюдения равенства (4.5):

$$T_{\text{ко}} + T_{\text{B4}} = T/2 \text{ мс} \quad (4.5)$$

где  $T_{\text{ко}}$  – собственное время отключения коммутатора К1;  $T_{\text{B4}} = \text{time6}$  – временная задержка блока БРВ4;  $T = 20 \text{ мс}$  - период сетевого напряжения.

Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1, отображающая общий принцип формирования его временных параметров управления при включении ВКА представлена на рисунке 4.10.

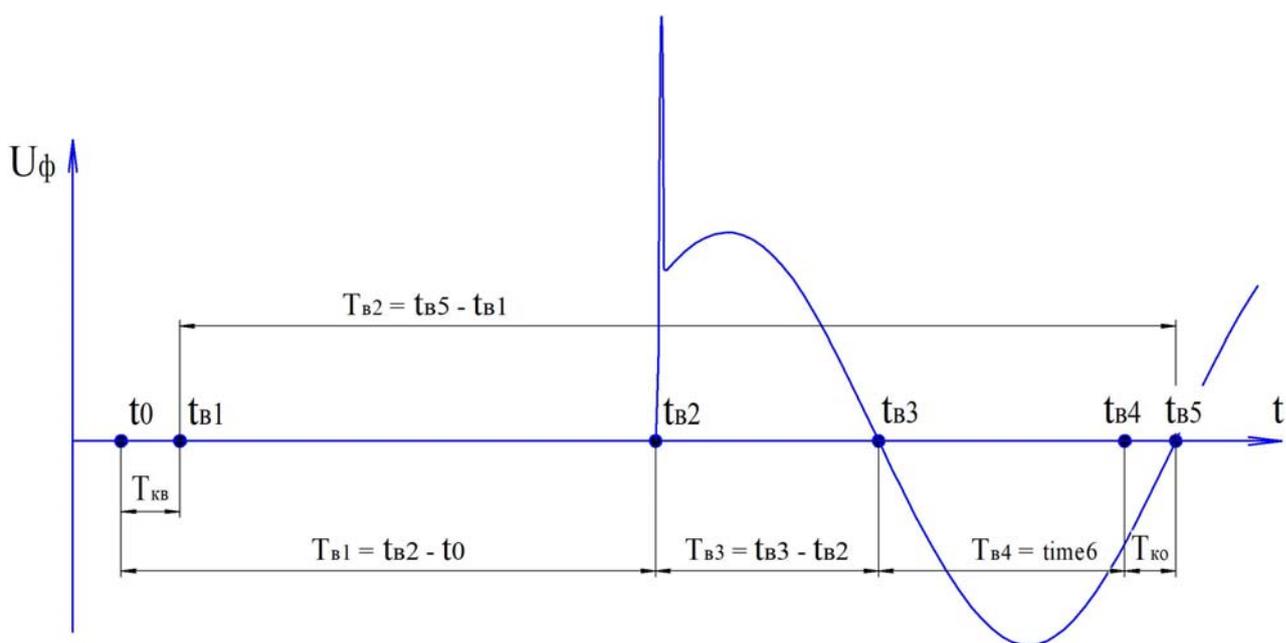


Рисунок 4.10 – Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1 при включении ВКА

Если равенство (4.5) не выполняется, то блок БФС осуществляет коррекцию величины временной задержки  $\text{time6}$ . Время нахождения коммутатора К1 во включенном состоянии составляет  $T_{\text{B2}} = t_{\text{B5}} - t_{\text{B1}}$ .

Таким образом, разработанные принципы, алгоритмы и схемные решения автоматического синхронного управления подключением средств снижения коммутационных перенапряжений к обмоткам высшего и низшего напряжений трансформатора рудничной комплектной трансформаторной подстанции, позволяют выполнить их комплексную практическую реализацию в качестве подсистемы САОП, интегрированной в общую структуру подстанции.

#### 4.3 Обоснование и разработка общей электрической схемы системы автоматического ограничения коммутационных перенапряжений трансформаторной подстанции

Концепция представленных в п.4.1 – п.4.2 принципов и алгоритмов работы системы автоматического ограничения перенапряжений, может быть реализована в структуре, электрическая схема которой, приведена на рисунке 4.11.

Схема состоит из следующих элементов: Т1 – силовой трансформатор КТП; QF1 – высоковольтный коммутационный аппарат; QS – разъединитель с короткозамыкателем; Т2 – трансформатор собственных нужд; Т3 – трехфазный понижающий трансформатор; К1 – коммутатор активно-емкостных цепей обмотки высшего напряжения трансформатора Т1; К2 – коммутатор шунтирующих резисторов обмотки низшего напряжения трансформатора Т1; А1 – центральный блок управления системы автоматического ограничения перенапряжений, представляющий собой микропроцессорное устройство, реализующее функционирование основных алгоритмов управления коммутаторами К1 и К2; А2 – блок регистрации фазового перехода, выполняющий фиксацию момента времени перехода синусоиды напряжения каждой из фаз через нуль; А3 – блок питания схемы; А4 – источник резервного питания, обеспечивающий работу схемы при отключении ВКА в результате срабатывания защиты нулевого напряжения; А5 – блок активно-емкостных цепей; R4 – R6 – шунтирующие резисторы обмоток низшего напряжения трансформатора Т1.

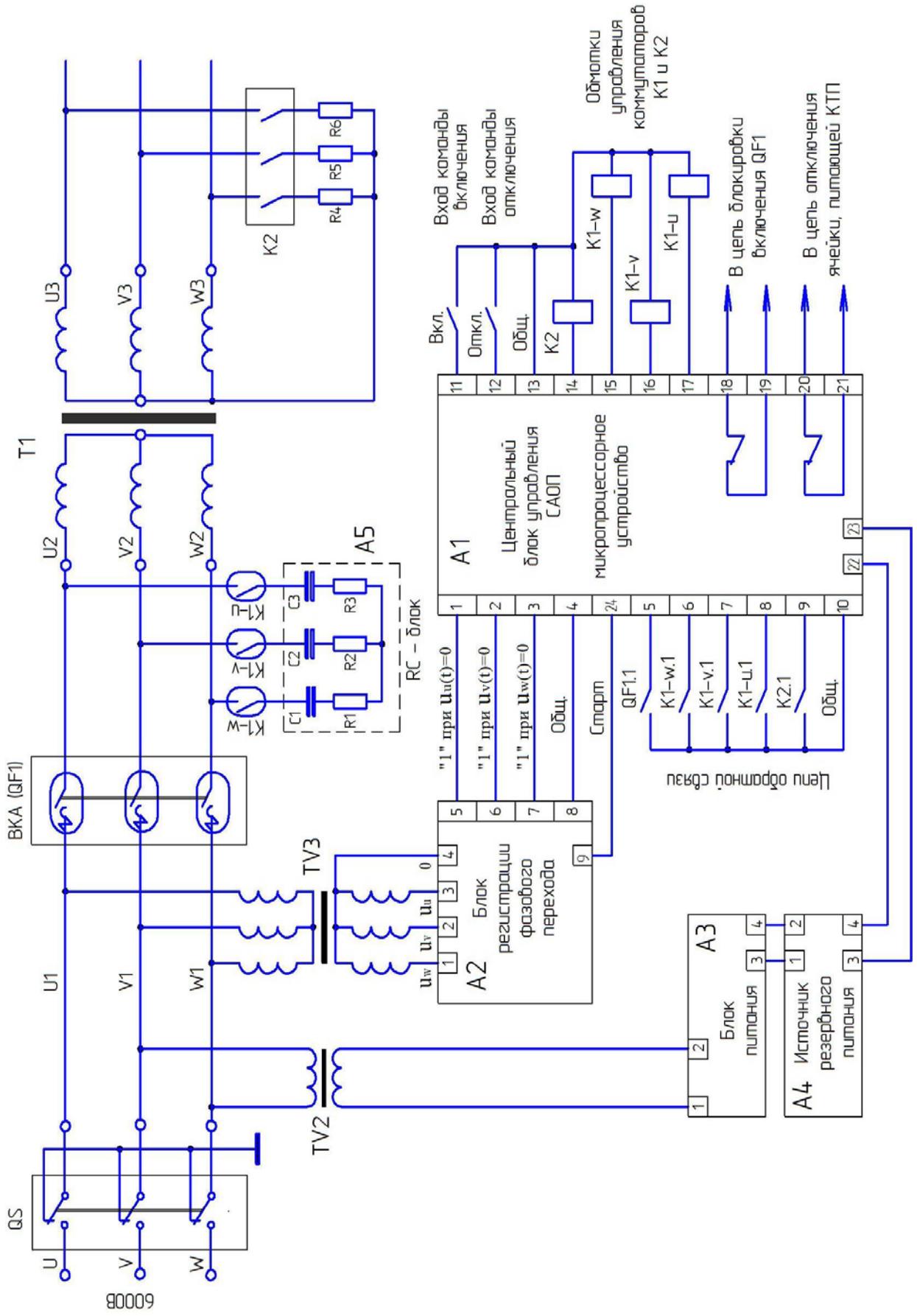


Рисунок 4.11 – Электрическая схема системы автоматического ограничения перенапряжений

Схема работает следующим образом. Команда на выполнение коммутации высоковольтного коммутационного аппарата, формируемая одним из устройств КТП (Таблица 4.1), одновременно поступает на блок управления ВКА, инициализируя процесс смены состояния его контактных групп, а также на вход 11 или 12 центрального микропроцессорного блока управления САОП – А1, который, в свою очередь, формирует команду «Старт» (выход 24), являющуюся исходным сигналом для запуска процесса фиксации перехода синусоиды фазных напряжений через нуль блоком регистрации фазового перехода А2.

Сетевые фазные напряжения  $u_w$ ,  $u_v$ ,  $u_u$ , через трехфазный понижающий трансформатор гальванической развязки TV3 поступают на входы 1 – 4 блока А2, который на выходах 5 – 8 формирует сигналы «единичного» логического уровня в моменты времени, когда мгновенные значения указанных напряжений будут равны нулю. Вышеупомянутые данные, поступая на входы 1 – 4 блока А1, служат исходными параметрами для формирования задержек времени в алгоритме управления коммутатором активно-емкостных цепей К1. Исходным параметром для переключения коммутатора К2 является входной сигнал включения или отключения, поступающий на входы, соответственно, 11 или 12 блока А1.

Цепи обратной связи, предоставляющие данные о моментах времени коммутации ВКА и коммутаторов К1 и К2, выполнены посредством соответствующих блок-контактов, подключенных к входам 5 – 10 блока А1. Во избежание помех от «дребезга» контактных групп, эти цепи подключены к входу микропроцессора посредством стандартных электронных устройств, выполненных на базе триггера Шмидта.

Обмотки управления коммутаторами К1 и К2 подключены к выходам 13 – 17 блока А1. В отличие от коммутатора К2, переключение коммутатора К1 выполняется индивидуально для каждой фазы.

В соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.3, центральный блок управления САОП А1 снабжен двумя выходами, которые задействуются в случае аварийных ситуаций в работе САОП (Таблица 4.2). Для этого выход 18, 19

блока А1 подключается в цепь блокировки включения ВКА, а выход 20, 21 – в цепь отключения высоковольтной ячейки, питающей подстанцию.

Схема получает питание от источника, состоящего из трансформатора собственных нужд TV2 и блока питания А3. Для реализации защитной функции от коммутационных перенапряжений в случае отключения ВКА по причине срабатывания защиты нулевого напряжения, в схеме предусмотрен источник резервного питания А4, выполненный на базе электролитического конденсатора или ионистора, запасенной энергии которого должно быть достаточно для однократного срабатывания системы.

Таким образом, разработанная схема (Рисунок 4.11) является комплексным техническим решением, обеспечивающим функционирование средств ограничения перенапряжений в структуре шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции, оснащенной высоковольтным коммутационным аппаратом.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Результаты обоснования принципов управления коммутационными процессами в силовой структуре шахтной участковой трансформаторной подстанции, оснащённой высоковольтным коммутационным аппаратом, удовлетворяющих критерию снижения до допустимого уровня амплитуд перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», реализованы алгоритмами функционирования, структурными и функциональными схемами системы автоматического подавления перенапряжений в общей структуре функционирования защит рудничной КТП, а также функциональными схемами отдельных составляющих узлов и блоков, входящих в состав САОП.

2. Обоснован и схемно реализован способ синхронизации времени срабатывания высоковольтного коммутационного аппарата и коммутатора шунтирующих сопротивлений обмотки низшего напряжения трансформатора

трансформаторной подстанции. Он представлен в структуре разработанного алгоритма функционирования САОП и состоит в формировании временного интервала (корректируемого для каждой коммутации) между включением коммутатора шунтирующих сопротивлений обмотки низшего напряжения трансформатора КТП и отключением ВКА, численно стремящегося к параметру  $\xi$ , характеризующемуся временем дребезга контактных групп указанных коммутационных аппаратов.

3. Обоснован критерий корректного функционирования технического средства автоматической синхронизации управления коммутационным процессом, в соответствии с которым собственное время отключения высоковольтного коммутационного аппарата должно превышать продолжительность включения коммутатора шунтирующих сопротивлений обмотки низшего напряжения трансформатора КТП не менее, чем на интервал времени, определяемый константой  $\xi$  состояния комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» КТП.

4. Разработан и схемно реализован способ управления коммутатором активно-емкостных цепей обмотки высшего напряжения трансформатора КТП, основанный на использовании специального алгоритма коммутации, при котором подключение и отключение средств подавления КП происходит в момент перехода кривой сетевого напряжения через нуль.

5. Разработанный принцип функционирования системы автоматического ограничения перенапряжений в обмотках силового трансформатора рудничной комплектной трансформаторной подстанции принят к использованию в научно-исследовательской работе Государственным учреждением «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ») по теме: «Проведение исследований коммутационных перенапряжений во взрывозащищенных комплектных трансформаторных подстанциях с высоковольтными коммутационными аппаратами и разработка технических предложений по их снижению» НИР №0120D000073 от 02.07.2020 г.,

выполняемой в соответствии с планом научно-исследовательских работ ГУ «НИИВЭ» на 2020 – 2021 гг.

Указанный принцип работы САОП также признан актуальным на ГП «Донецкий энергозавод» и принят к внедрению при проектировании и производстве шахтных комплектных трансформаторных подстанций перспективных серий (Приложение А).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие горной технологии, тенденция к применению электромеханического технологического оборудования высоких уровней мощности предопределяет усложнение структуры шахтных участковых электротехнических комплексов и связанных с ними распределительных и защитных устройств высокого напряжения, необходимость применения участковых комплектных трансформаторных подстанций всё более высоких номинальных мощностей, функционирование силовой коммутационной аппаратуры в условиях всё более высоких мощностей коммутации электрических присоединений в номинальных и аварийных режимах.

В этих условиях применение высоковольтных коммутационных аппаратов в цепи первичной обмотки трансформатора КТП позволяет существенно повысить быстродействие защитного отключения силового присоединения при возникновении аварийных (опасных) состояний, расширить функциональность подстанции, рационализировать применение и структуру схем присоединений высоковольтных комплектных распределительных устройств.

Однако, в ходе опытно-промышленной эксплуатации образцов таких подстанций был выявлен повторяющийся негативный фактор – множественный пробой изоляции первичной обмотки трансформатора с последующим повышением интенсивности её повреждения электрической дугой воздушном промежутке на корпус КТП, что явилось следствием возникновения коммутационных перенапряжений в процессе эксплуатации высоковольтных коммутационных аппаратов и позволило сделать вывод о функциональной недостаточности штатных средств подавления коммутационных перенапряжений (поставляемых совместно с ВКА) при их размещении в непосредственной близости от силового трансформатора высокой мощности, обмотки которого обладают значительной нелинейной индуктивностью и малой собственной ёмкостью.

Данная проблематика и отсутствие технических решений, обеспечивающих эффективное подавление коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции обусловили актуальность тематики диссертационного исследования.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача по совершенствованию системы управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты посредством научного обоснования структур, алгоритмов функционирования и практической реализации технических средств, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор».

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель коммутационного процесса в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», отличающаяся учётом электродинамических свойств трансформатора в условиях коммутации его обмоток, а также учётом свойств технических средств воздействия на амплитуды коммутационных импульсов, основанных на коммутации активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора.

2. Установлено, что фактором, нарушающим функциональные свойства штатных средств ограничения перенапряжений, входящих в комплектацию высоковольтных коммутационных аппаратов, в случае применения их в структуре шахтных участковых трансформаторных подстанций являются высокая скорость роста переднего фронта коммутационного импульса, обусловленная малой входной емкостью комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор».

3. Получила дальнейшее развитие методика управления процессами коммутации в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», что обусловило возможность его безаварийного применения в структуре шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции.

4. Обоснованы структура и алгоритм функционирования технического средства подавления коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», основанные на применении управляемой коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора, синхронизированной с состояниями силовых коммутационных устройств и адаптированной к функциональным параметрам средств управления и защиты подстанции, что позволило исключить воздействие коммутационных перенапряжений на ресурс её электрической изоляции.

5. Результаты диссертационных исследований в области развития теории и совершенствования технических средств ограничения коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» комплектной трансформаторной подстанции использованы в научно-исследовательской работе ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ», г. Донецк) по теме: «Проведение исследований коммутационных перенапряжений во взрывозащищённых комплектных трансформаторных подстанциях с высоковольтными коммутационными аппаратами и разработка технических предложений по их снижению» НИР №0120D000073 от 02.07.2020 г., выполняемой в соответствии с планом научно-исследовательских работ ГУ «НИИВЭ» на 2020 – 2021 гг. (Справка об использовании результатов исследований №1/452 от 19.11.2020 г. представлена в приложении А).

Полученные результаты признаны актуальными на ГП «Донецкий энергозавод» и приняты к внедрению при проектировании и производстве шахтных комплектных трансформаторных подстанций перспективных серий. (Справка о внедрении №485 от 23.11.2020 г. представлена в приложении А).

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

РУВН	– распределительное устройство высшего напряжения;
РУНН	– распределительное устройство низшего напряжения;
КТП	– комплектная трансформаторная подстанция;
ВКА	– встроенный (в РУВН КТП) коммутационный аппарат;
МТЗ	– максимальная токовая защита;
ВН	– высшее напряжение;
НН	– низшее напряжение;
КП	– коммутационное перенапряжение;
ХХ	– холостой ход;
КЗ	– короткое замыкание
САОП	– система автоматического ограничения перенапряжений
ПБ	– правила безопасности

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6 – 35 кВ / Б.Н. Абрамович, С. Кабанов, А. Сергеев // Новости электротехники. – 2002. - №5(17). – С. 22–24.
2. Арушанов, К.А. Высоковольтный вакуумный геркон [Электронный ресурс] / К.А. Арушанов, И.А. Зельцер, В.М. Ермаков, Е.Б. Трунин. – Режим доступа: <http://www.rmcip.ru/files/rus/pdf/articles/2011/cf2c025db6f852ab622517e2c6f23975.pdf>. – Загл. с экрана.
3. Астафьева, О.В. Исследование перенапряжений и разработка системы защиты от них в сетях среднего и высокого классов напряжения металлургических заводов и комбинатов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12 / О.В. Астафьева. – СПбГТУ. – СПб, 2007. – 17 с.
4. Афонин, В.В. Элегазовые выключатели распределительных устройств высокого напряжения: учебное пособие / В.В. Афонин, К.А. Набатов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. Техн. ун-та, 2009. – 96 с.
5. Базавлук, А.А. Исследование перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей / А.А. Базавлук, А.Р. Бакиров, Д.А. Шкитов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 265–279.
6. Базуткин, В.В. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях индуктивных цепей вакуумными выключателями / В.В. Базуткин, Г.А. Евдокунин, Ф.Х. Халилов // Электричество. – 1994. - №2. – С. 9–13.
7. Барышников, Д.В. Экспресс-методы оценки прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Д.В. Барышников: ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2010. – 19 с.
8. Басманов, В.Г. Изоляция и перенапряжение: Учебное пособие / В.Г. Басманов. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005. – 152 с.

9. Башков, Е.А. К построению систем управления процессами и мониторинга состояния оборудования угольных шахт / Е.А. Башков, Е.А. Вареник, Ан.А. Дубинский, К.Н. Маренич, А.Б. Кац // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 2007. – С. 305–314.
10. Бочаров, Ю.Н. Техника высоких напряжений: Учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 265 с.
11. Бржезицкий, В.А. Методические указания по выбору ограничителей перенапряжений нелинейных производства предприятия «Таврида Электрик» для электрических сетей 6–35 кВ / В.А. Бржезицкий, В.К. Беляев, О.С. Ильенко, С.А. Соколовский. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003. – 40 с.
12. Бржезицкий, В.О. Техніка і електрофізика високих напруг. Навч. Посібник / В.О. Бржезицкий, І.В. Ісаков, В.В. Рудаков / За ред. В.О. Бржезицкого та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. – 930 с.
13. Брилинский, А.С. Исследование причин нарушения электрической прочности изоляции устройства РПН сухого трансформатора / А.С. Брилинский, Г.А. Евдокунин, Н.Н. Магдеев, Т.А. Пономарев // Сборник: «Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады». – 2018. – С. 32–36.
14. Бьюлей, Л.В. Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах. Перевод с англ. А.К. Богданова и П.В. Борисоглебского / Л.В. Бьюлей. – М: ОНТИ, 1938. – 288 с.
15. Вакуумные контакторы HYUNDAI UVC. Руководство по эксплуатации / Heavy Industries Co., LTD, 2010. – 20 с.
16. Вареник, Е.А. Идеология построения электрических защит взрывобезопасных трансформаторных подстанций серии ТВПШ / Е.А. Вареник, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий // Взрывозащищённое электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк: ООО «Типография Восток Пресс», 2017. – №1(52). – С. 14–24.
17. Вареник, Е.А. Подстанция комплектная трансформаторная взрывобезопасная нового поколения. Концепция создания и описание новых потребительских

- свойств / Е.А. Вареник, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев и др. // Техническое предложение ПИЖЦ.670062.013. – Донецк: УкрНИИВЭ, 2008. – 10 с.
18. Вареник, Е.А. Взрывобезопасная комплектная трансформаторная подстанция ТВПШ-630,6-069/0,4-20 / Е.А. Вареник, В.Е. Налбатов, В.Н. Савицкий и др. // Взрывозащищённое электрооборудование: сб. научн. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк: ООО «Восток.Пресс Плюс», 2016. – С.27–33.
  19. Володин, В.Я. LTspice. Компьютерное моделирование электронных схем / В.Я. Володин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.
  20. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб. / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
  21. Гаврилова, Е.В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Е.В. Гаврилова: Сибирский федеральн. ун-т. – Красноярск, 2011. – 21 с.
  22. Гандулин, Ф.А. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ / Ф.А. Гандулин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 192 с.
  23. Гарганеев, А.Г. Ограничение перенапряжений при коммутациях шахтного электрооборудования / А.Г. Гарганеев, Н.А. Михневич, Д.В. Нестеров, А.В. Федоров // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2012. – №4 – С. 51–56.
  24. Гарганеев, А.Г. Исследование коммутационных перенапряжений шахтного электрооборудования / А.Г. Гарганеев, А.В. Федоров, Н.А. Михневич // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов международной научно-практической конференции. – Томск: ТУСУР, 2012. – С. 88–94.
  25. Грушко, В.М. Применение взрывозащищенных трансформаторных подстанций различной мощности при их питании от одного комплектного распределительного устройства / В.М. Грушко, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, А.И. Лужнев // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр.

- УкрНИИВЭ / Под общей редакцией академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – С. 236–242.
26. Дегтярев, И.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12 / И.Л. Дегтярев: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2006. – 24 с.
  27. Дмитриев, М.В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы [Электронный ресурс] / М.В. Дмитриев, Г.А. Евдокунин. – Режим доступа: <https://opnzeu.ru/files/publikacii/uchet-konfiguracii-magnit2.pdf>. – Загл. с экрана.
  28. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6–750 кВ [Электронный ресурс] / М.В. Дмитриев. – Режим доступа: <https://opnzeu.ru/files/publikacii/opn-v-setyah.pdf>. – Загл. с экрана.
  29. Евдокунин, Г.А. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков. – СПб.: Изд-во Терция, 2004. – 188 с.
  30. Евдокунин, Г.А. Перенапряжения при коммутации цепей вакуумными выключателями и их ограничение / Г.А. Евдокунин, А.А. Корепанов. – Электричество. – 1998. – №4. – С. 2–14.
  31. Евдокунин, Г.А. Современная вакуумная техника для сетей среднего напряжения / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2000. – 114 с.
  32. Евдокунин, Г.А. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы / Г.А. Евдокунин, М.В. Дмитриев // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 5(53). – С. 2–7.
  33. Еремич, Я.Э. Градиентные перенапряжения в обмотках трансформаторов и электрических машин / Я.Э. Еремич, С.А. Пашичева, Ф.Х. Халилов, Б.В. Ефимов // Труды Кольского Научного Центра РАН. – 2017. – №15(8). – С. 87–92.

34. Золотарев, Е.В. Встроенный электроэнергетический комплекс шахтного очистного комбайна – инновационное решение в области разработки и эксплуатации горных машин / Е.В. Золотарев, К.Н. Маренич // Наука, техника, инновации: IX междунар. науч.- практ. конф., 25 апр. 2019 г., материалы конф. – Усинск, УФ УГТУ, 2019. – С 120–123.
35. Золотарев, Е.В. Исследование коммутационных перенапряжений в трансформаторе шахтной участковой подстанции / Е.В. Золотарев // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2019): сборник трудов XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – т. 2. – С. 142–147.
36. Золотарев, Е.В. Применение системы автоматического ограничения перенапряжений в схеме управления коммутационными аппаратами шахтной участковой трансформаторной подстанции / Е.В. Золотарев, К.Н. Маренич. // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XX международной научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 26–28 мая 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 124–128.
37. Кадомская, К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А. Рейхердт. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 319 с.
38. Каждан, А.Э. Выбор ограничителей перенапряжений для защиты от коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении индуктивных нагрузок / А.Э. Каждан, А.И. Кривенко // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. «Технические науки». – 2004. – №3. – С. 63–67.
39. Колосюк, В.П. Электробезопасность в горной промышленности: монография / В.П. Колосюк, Ю.В. Товстик; Под ред. В.П. Колосюка. – Донецк, Ноулидж (донецкое отделение), 2014. – 475 с.

40. Контактор Rollarc R400 – R400D 1–12 кВ. Руководство по эксплуатации / Merlin Gerin Telemecanique. – Schneider Electric, 2007. – 24 с.
41. Кротенко, Е.А. Исследование перенапряжений в сетях среднего напряжения / Е.А. Кротенко // Омский научный вестник. – 2019. – №1 (163) – С. 34–37.
42. Кукляев, С.П. Проблема эксплуатации высоковольтных вакуумных выключателей / С.П. Кукляев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 8. – С.111–113.
43. Куликовский, В.С. Моделирование коммутационных перенапряжений при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями / В.С. Куликовский, О.А. Ковалёва // Вестник КрасГАУ. – 2012. – №5. – С. 337–343.
44. Курганов, В.В. Изоляция и перенапряжение в электроэнергетических системах: курс лекций по одноим. дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / В.В. Курганов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2010. – 93 с.
45. Лавринович, В.А. Коммутационные испытания экспериментального вакуумного выключателя / В.А. Лавринович, Б.И. Убиенных, А.А. Кладько // Известия Томского политехн. ун-та. – 2016. – Т.327. - №10. – С. 69–77.
46. Лебедев, И.А. Исследование процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки и разработка технических требований к синхронным вакуумным выключателям: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12 / И.А. Лебедев: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2012. – 20 с.
47. Лейбов Р.М. Электрификация подземных горных работ / Р.М. Лейбов, М.И. Озерной: учебник для высш. учебн. заведений: М. – Недра, 1972. – 464 с.
48. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
49. Лейтес, Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: «Энергия», 1974. – 192 с.

50. Лурье, А.И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание / А.И. Лурье. – М: Электротехника, 2008. - №2. – С. 2–18.
51. Лутчин, М.М. Математичні моделі гістерезису / М.М. Лутчин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – №50 (1222). – С. 8–13.
52. Майнгашев, Р.А. Коммутационные перенапряжения в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников и способ их эффективного ограничения: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Р.А. Майнгашев.; Сибирский федеральн. ун-т. – Красноярск, 2011. – 145 с.
53. Маренич, К.Н. Исследование модели управляемого подавления коммутационных перенапряжений в трансформаторной подстанции / К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – 2020. – №57. – С. 15–30.
54. Маренич, К.Н. Моделирование процессов теплообмена внутри оболочки взрывобезопасной трансформаторной подстанции типа КТПВ-1000 методом конечных элементов / К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4 (14). – С. 41–46.
55. Маренич, К.Н. Проблемные вопросы применения высоковольтного вакуумного выключателя в конструкции шахтной участковой трансформаторной подстанции / К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 4 (18). – С. 53–61.
56. Маренич, О.К. Применение средств дополнительного автоматического разрыва цепи тока короткого замыкания как средство повышения ресурса автоматического выключателя шахтной участковой трансформаторной подстанции. Постановка и результаты эксперимента / О.К. Маренич, Е.В. Золотарев // Вестник Донецкого национального технического университета. - Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 3(17). – С. 69–77.

57. Маренич, О.К. Управляемая коммутация трансформатора подстанции как фактор эффективности эксплуатации электротехнического комплекса участка шахты: монография / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва. – Донецк: Издательство «Донецкая политехника», ГОУ ВПО «ДонНТУ» 2020. – 120 с.
58. Меньшиков, В.А. Методология исследования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6(10) кВ и разработка мероприятий и средств по их ограничению: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / В.А. Меньшиков: Государственный университет цветных металлов и золота – Красноярск, 2006. – 24 с.
59. Мнухин, А.Г. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений / А.Г. Мнухин, Б.И. Коневский. – М: Недра, 1987. – 143 с.
60. Мнухин, А.Г. Пути развития конструкций рудничных высоковольтных распределительных устройств / А.Г. Мнухин, А.В. Антипин, В.А. Гаврилко, А.П. Лихван // Уголь Украины. – 2013. - №1. – С. 20–24.
61. Молотилов, Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали: спр. изд. / Б.В. Молотилов, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
62. Набатов, К.А. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств: учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.
63. Нагорный, М.А. Снижение перенапряжений в рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанциях с высоковольтными вакуумными аппаратами. Применение напряжения 10 кВ на горных предприятиях / М.А. Нагорный, В.М. Грушко, Г.А. Кутелев // Сб. науч. тр. ВНИИВЭ. – Донецк, 1985. – С. 82–87.
64. Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. ГОСТ Р 52725-2007. – [Введен в действие 2008-07-18] – М.: Стандартинформ, 2007. – 32 с.

65. Пат. RU 152786 U1 (РФ), МПК H02B 7/06 (2006.01). Распределительное устройство высшего напряжения трансформаторной подстанции / В.Л. Кузнецов, Т.И. Губин, С.В. Подолян. - №2014127227/07; заявл. 03.07.2014; опубл. 20.06.2015, Бюл. №17.
66. Пат. RU 2706637 C1 (РФ), МПК H02H 3/20 (2006.01) H02H 9/04 (2006.01). Устройство для защиты вакуумнокоммутлируемого оборудования от перенапряжений / И.Н. Джус. – №2019108676; заявл. 26.03.2019; опубл. 19.11.2019, Бюл. №32.
67. Пат. RU 44008 U1 (РФ), МПК H02H 9/04 (2000.01) H01C 7/12 (2000.01). Устройство для защиты электрооборудования от перенапряжений / С.В. Кузьмин, В.В. Береснев, Р.С. Кузьмин, А.А. Струков. – №2004116997/22; заявл. 07.06.2004; опубл. 10.02.2005, Бюл. №4.
68. Пат. RU 2414032 C1 (РФ) МПК H02H 9/04 (2006.01). Устройство для защиты электрооборудования от коммутационных перенапряжений / И.А. Лебедев, Т.В. Барячина. – №2009138412/07; заявл. 19.10.2009; опубл. 10.03.2011, Бюл. №7.
69. Пат. RU 194140 U1 (РФ) МПК H02H 9/06 (2006.01). Устройство защиты оборудования от импульсных перенапряжений / Н.М. Лепехин, О.В. Ловенецкая, А.В. Мельников и др. – №2018143717; заявл. 11.12.2018; опубл. 29.11.2019, Бюл. №34.
70. Пат. SU 1427468 A1 (СССР) МПК H02H 9/04. Система питания трансформатора с изолированной нейтралью с блоком защиты от перенапряжений / М.А. Нагорный, В.М. Грушко, Г.А. Кутелев. – №4026938/24-07; заявл. 26.02.86; опубл. 30.09.88, Бюл. №36.
71. Петров, Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы: Учебник для вузов / Г.Н. Петров. – М: Энергия, 1974. – 240 с.
72. Півняк, Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт. Національний гірничий університет / Г.Г. Півняк [и др.]; За ред. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – 206 с.

73. Подстанции рудничные комплектные трансформаторные взрывобезопасные передвижные. Общие технические условия: ГОСТ16837-79. – [Введен в действие 1982-01-01]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 11 с.
74. Подстанции трансформаторные взрывобезопасные передвижные шахтные типа ТВПШ. Технические условия: ТУ У 31.1-00217159-103 2012. – Донецк: НИИВЭ, 2016. – 49 с.
75. Правила безопасности в угольных шахтах НПАОТ 10.0-1.01-16: утверждён совместным приказом Государственного Комитета горного и технического надзора ДНР и Министерства угля и энергетики ДНР от 18.04.2016 №36/208, рег. №1284 от 17.05.2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mintek-dnr.ru/zue/pravila\\_bezopasnosti\\_na\\_ugolnykh\\_shakhtakh.pdf](http://mintek-dnr.ru/zue/pravila_bezopasnosti_na_ugolnykh_shakhtakh.pdf). – Загл. с экрана.
76. Правила безпеки у вугільних шахтах НПАОП 10.0-1.01-10: затверджено наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 №62 / Держ. ком. України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. – Київ, 2010. – 430 с.
77. Пустоветов, М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора / М.Ю. Пустоветов // Известия Томского политехн. ун-та. – 2012. – Т.321. – №4. – С. 97–100.
78. Пушница, К.А. Снижение уровней коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения кислородно-конвертерных производств посредством схемы защиты: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / К.А. Пушница.; Липецкий государственный технический университет. – Липецк, 2012. – 19 с.
79. Риман, Я.С. Защита шахтных участковых сетей от токов короткого замыкания / Я.С.Риман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1985. – 88 с.
80. Рывкин, А.М. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой / А.М. Рывкин, И.А. Лукацкая, А.Л. Буйнов // Электрические станции. – 1990. – № 5. – С. 62–67.

81. Савицкий, А.В. Управление и защита современных взрывозащищенных комплектных трансформаторных подстанций / А.В. Савицкий // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ» – Донецк: ООО «Восток Пресс Плюс», 2016. – С. 76–82.
82. Сельменова, Д.С. Исследование переходных процессов при управляемом включении силового трансформатора / Д.С. Сельменова, Е.Г. Лиске, Д.Е. Шевцов // Вестник ПНИПУ. – 2017. – №24. – С. 161–177.
83. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
84. Славутский, А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов / А.Л. Славутский. – Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 122–130.
85. Сохор, Ю.Н. Моделирование устройств в LTSpice. Учебно-методическое пособие. Псковск. гос. политехн. ин-т / Ю.Н. Сохор. – Псков: Изд-во ППИ, 2008. – 165 с.
86. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т.: Т. 1. / В.С. Дзюбан, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев и др.; под общ. ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., доп. и перераб. – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001. – 447 с.
87. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т.: Т. 2. / В.С. Дзюбан, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев и др.; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – 2-е изд., доп. и перераб. – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001. – 440 с.
88. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента: учеб. пособие / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – Донецк: ДПИ, 1984. – 60 с.
89. Трансформатор типа ТНЕВ 5639 фирмы Siemens мощностью 400 кВА на напряжение 6000 В. Техническая информация / А.И. Плетнев, Э.П. Михайленко, Е.А. Сорока и др. – Донецк: ВНИИВЭ, 1986 г. – 91 с.
90. Устройства защиты от коммутационных перенапряжений подземных электрических сетей угольных шахт: ГОСТ 27863-88 (Ст. СЭВ 6041-87). – [Введен в действие 1989-07-01] – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1988. – 8 с.

91. Хатанова, И.А. Выбор устройств для ограничения коммутационных перенапряжений в сетях промышленного электроснабжения 6–10 кВ / И.А. Хатанова, Д.В. Бакрин // Известия высших учебных заведений. Проблемы электроэнергетики. – 2003. – №3-4. – С. 97–101.
92. Чернов, И.Я. Повышение технического уровня взрывобезопасных передвижных комплектных трансформаторных подстанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / И.Я. Чернов.; ДонНТУ. – Донецк, 2009. – 263 с.
93. Чернов, И.Я. Система автоматического ограничения перенапряжений как структура управления коммутационными процессами в силовом трансформаторе шахтной участковой трансформаторной подстанции / И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, И.В. Ковалева. - Информатика и кибернетика №1 (19). – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С.52–62.
94. Шевцов, Д.Е. Модели и методы управляемой коммутации в электрических сетях 6(10) кВ систем электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Д.Е. Шевцов: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2017. – 151 с.
95. Эрнст, А.Д. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: курс лекций / А.Д. Эрнст. – Нижневартовск: Изд-во НГГУ, 2012. – 199 с.
96. Chan, J. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation / J. Chan, A. Vladimirescu, Xiao-Chun Gao, P. Liebmann, J. Valainis // IEEE Transactions on computer-aided design, 1991. – Vol. 10, No. 4. – P. 476–482.
97. Cho, Sung Don. Parameter estimation for transformer modeling: dissertation, doctor of philosophy electrical engineering [Electronic resource] / Sung D. Cho. – Michigan Technological University, 2002. – Mode of access: <https://digitalcommons.mtu.edu/etds/60>. – Title from the screen.
98. Das, J.C. Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation. / J.C. Das. – US: McGraw-Hill Professional, 2010. – 737 p.
99. Devgan, M. Investigation of High Frequency Switching Transients on Wind Turbine Step Up Transformers [Electronic resource] / Mantosh Devgan. – UWSpace, 2015. – Mode of access: <http://hdl.handle.net/10012/9732>. - Title from the screen.

100. Diseko, N.L. Resonant overvoltage phenomena associated with transformer feeders: a thesis submitted to the University of Strathclyde for the Degree of Doctor of Philosophy [Electronic resource] / N.L. Diseko. – Department of Electrical Engineering University of Strathclyde, 1977. – Mode of access: <http://ethos.bl.uk/ProcessSearch.do?query=453684>. – Title from the screen.
101. Ghezzi, L. and Balestrero A. Modeling and Simulation of Low Voltage Arcs [Electronic resource] / L. Ghezzi, A. Balestrero. - University of Milan, 2010. – Mode of access: [http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:ddf219d8-5572-45c5-9249-aacbb68683cd/Modeling\\_and\\_Simulation\\_of\\_Low\\_Voltage\\_Arcs.pdf](http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:ddf219d8-5572-45c5-9249-aacbb68683cd/Modeling_and_Simulation_of_Low_Voltage_Arcs.pdf). - Title from the screen.
102. Greenwood, A. Electrical Transients in Power Systems, 2-nd Edition / Greenwood A. – Wiley-Interscience, 1991. – 764 p.
103. Hasse, P. Overvoltage protection of low voltage systems. Second edition. / Peter Hasse. – Power and energy series no.33. – Published by The Institution of Engineering and Technology, London, 2008. – 370 p.
104. Jianming, Li. Measurement and analysis of overvoltages in power systems / Li Jianming. – John Wiley & Sons, Singapore Pte Ltd, 2018. – 370 p.
105. Lin, Xiangning Electromagnetic transient analysis and novel protective relaying techniques for power transformer / Xiangning Lin, Jing Ma, Qian Tian, Hanli Weng. – Wiley, 2015. – 326 p.
106. Lou van der Sluis. Transients in Power Systems / Lou van der Sluis. – Wiley, 2001. – 224 p.
107. Oliveira, L. M. R. Three-phase, three-limb, steady-state transformer model: the case of a YnZn connection / L. M. R. Oliveira, A. J. M. Cardoso // Proceedings of the IASTED International Conference "Power and Energy Systems". – Marbella, Spain, 2000. – P. 467–472.
108. Popov, M. Switching three-phase distribution transformers with a vacuum circuit breaker. Analysis of overvoltages and the protection of the equipment: doctoral thesis [Electronic resource] / Marjan Popov. – Delft University of Technology, 2002. –

Mode of access: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:6163457a-697f-4d42-be87-9519a6427827>. – Title from the screen.

109. Sima, W.X. Field Experiments on 10 kV Switching Shunt Capacitor Banks Using Ordinary and Phase-Controlled Vacuum Circuit Breakers [Electronic resource] / Wenxia Sima, Mi Zou, Qing Yang, Ming Yang, Licheng Li. – *Energies*, 2016. – №9(88). – Mode of access: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/2/88/pdf>. – Title from the screen.
110. Smeets, R. Switching in electrical transmission and distribution systems / Rene Smeets. – John Wiley & Sons, 2015. – 443 p.
111. Lin, Xiangning Electromagnetic transient analysis and novel protective relaying techniques for power transformer / Xiangning Lin, Jing Ma, Qian Tian, Hanli Weng. - Wiley, 2015. – 326 p.
112. Xue, H. Analysis of Switching Transient Overvoltage in the Power System of Floating Production Storage and Offloading Vessel / Haoyan Xue // Master of Science Thesis. - Delft University of Technology, 2012. – 88 p.

## Приложение А

Копии документов о внедрении результатов исследований



ГУ «НИИВЭ»

Государственное учреждение  
 «Научно-исследовательский,  
 проектно-конструкторский и технологический  
 институт взрывозащищенного  
 и рудничного электрооборудования»

ДНР  
 83052 г. Донецк  
 ул. 50-й Гвардейской дивизии, 17

ИКЮЛ - 00217159  
 Счет - 40105810020000021001  
 Центральный Республиканский Банк  
 Донецкой Народной Республики  
 Л/с 03011024170 в Республиканском казначействе  
 Донецкой Народной Республики  
 БИК Банка - 310101001

Тел.: (062) 382-93-53  
 Факс: (062) 382-93-52  
 Моб.: (071) 326-83-66  
 e-mail: niive@iist.ru

№ 1/452 от 19.11.2020  
 на Ваш \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Проректору по научной работе  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный  
 технический университет»  
 д.т.н., профессору С.В. Борщевскому

## СПРАВКА

об использовании результатов исследований диссертационной работы аспиранта ДонНТУ заочной формы обучения Золотарева Евгения Владимировича на тему: «Обоснование структуры и алгоритмов функционирования технических средств управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки), в профильной научно-исследовательской работе ГУ «НИИВЭ»

Результаты диссертационных исследований Золотарева Е.В. в области развития структуры и алгоритмов функционирования технических средств управления процессом подавления перенапряжений в системе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» комплектной трансформаторной подстанции в полном объеме использованы в НИР ГУ «НИИВЭ» по теме: «Проведение исследований коммутационных перенапряжений во взрывозащищенных комплектных трансформаторных подстанциях с высоковольтными коммутационными аппаратами и разработка технических предложений по их снижению» №госрегистрации 0120D000073 от 02.07.2020 г., выполняемой в соответствии с приказом Государственного Комитета по Науке и Технологиям №61 от 28.12.2019 г.

Директор ГУ «НИИВЭ» \_\_\_\_\_  
 Ученый секретарь \_\_\_\_\_

Вареник Е.А.  
 Кужель А.К.



Сотвествует оригиналу

Ученый секретарь Д 01.024.04

Т.В. Завадская

**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ**



**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ**

**«ДОНЕЦКИЙ ЭНЕРГОЗАВОД»**

83049 г. Донецк, ул. Профессоров Богословских, 15

Идентификационный код 51017462

р/с 26001645000100 в ЦРБ ДНР, МФО 400019

тел.: (062) 3440798, 3440981, 3440754, 3440777

email: sekretar-dez@mail.ru, omto-dez@mail.ru, сайт: zavoddez.com

23.11.2020г № 485  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Проректору по научной работе  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный  
технический университет»  
д.т.н., профессору С.В. Борщевскому

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы аспиранта ДонНТУ заочной формы обучения Золотарева Евгения Владимировича на тему: «Обоснование структуры и алгоритмов функционирования технических средств управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки), в производственный процесс по изготовлению трансформаторных подстанций на ГП «Донецкий Энергозавод»

Государственное предприятие «Донецкий Энергозавод» на протяжении последних лет выпускает шахтные комплектные трансформаторные подстанции, оснащенные высоковольтными коммутационными аппаратами, применение которых позволило существенно повысить потребительские свойства выпускаемых подстанций.

Однако, объективно установлено, что эксплуатация системы «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в составе вышеупомянутых изделий сопровождается значительными перенапряжениями, что существенно снижает ресурс изоляции обмоток трансформатора.

В связи с выявленной функциональной недостаточностью существующих средств ограничения перенапряжений нами предложено проведение в профильном НИИ ГУ «НИИВЭ» научно-исследовательской работы по изучению коммутационных процессов в подстанции, определению параметров возникающих перенапряжений и разработке приемлемых технических решений по их снижению (письмо №386 от 15.10.19 г. НИР № 0120D000073 от 05.07.2020г). Проведение исследований коммутационных перенапряжений во взрывозащищенных комплектных



Сотв. ответствует оригиналу

Уд. секретарь Д 01.024.04

Т.В. Завадская

трансформаторных подстанциях с высоковольтными коммутационными аппаратами и разработка технических предложений по их снижению»).

Настоящим письмом доводим до Вашего сведения, что диссертационные исследования, выполненные аспирантом ДонНТУ (штатным сотрудником ГУ «НИИВЭ») Золотаревым Е.В. ведутся в рамках данной научно-исследовательской работы. Их результаты являются актуальными и планируются к использованию при проектировании и производстве шахтных участковых комплектных трансформаторных подстанций перспективных серий.

Промежуточные результаты выполнения указанной НИР представлены Золотаревым Е.В. в соответствии с календарным планом выполнения НИР и приняты нашим предприятием.

И. о. директора  
ГП «Донецкий энергозавод»

Главный инженер



Пешко В.П.

Вербицкий М.В.

## Приложение Б

**АКТ**  
**обследования трансформаторной подстанции**  
**ТВКП-1000/6-1,2 зав. № 001**

г. Донецк

20 сентября 2010 г.

При обследовании присутствовали:

от ОАО «Донецкий энергозавод»

Кузнецов В.Л. - главный конструктор

Свеженцев А.Н. - главный метролог

Кустов А.В. - начальник ОТК

от УкрНИИВЭ

Чернов И.Я. - заведующий КНИОТ и ТП

Шилов В.В. - заведующий сектором проектирования трансформаторов и КТП

Грушко В.М. - заведующий лабораторией трансформаторов

от ОАО Шахта «Комсомолец Донбасса»

Таран Е.А. - и.о. начальника участка энергообеспечения и автоматизации

Прищеп Ю.В. - зам механика участка №6

Установлено, что трансформаторная подстанция ТВКП-1000/6-1,2 подключена под нагрузку 12.07.2010 г. Общая установленная мощность на подстанцию составила 1080 кВт. Напряжение высоковольтной сети – 6000 В.

28.08.2010 г. произошло отключение питающей ячейки КРУВ-6 из-за срабатывания защиты от короткого замыкания.

При обследовании подстанции обнаружено:

1. Следы копоти на высоковольтных обмотках фазы А и Б.
2. Имеются местные нарушения изоляции в нижней части дисков высоковольтной обмотки фаз А и Б в результате электрического пробоя.
3. При подаче напряжения на обмотку НН произошло срабатывание максимальной токовой защиты источника питания при достижении напряжения на стороне ВН 2000-2500 В.
4. Состояние активной части хорошее. Следов сдвига блоков обмоток, разрушения изоляторов, изменения цвета изоляционных материалов не обнаружено.



Соответствует оригиналу

Исполнительный секретарь Д 01.024.04

*Т.В. Завадская* Т.В. Завадская

5. Распределительные устройства РУВН и РУНН находятся в рабочем состоянии.

#### Выводы и рекомендации.

1. Предположительно причинами выхода из строя активной части могут быть: коммутационные перенапряжения, недостаточная электрическая прочность изоляции активной части, выход из строя ограничителей перенапряжения.

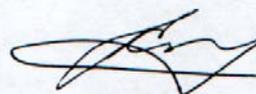
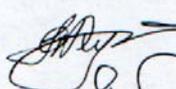
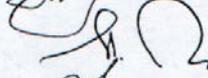
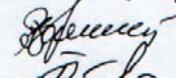
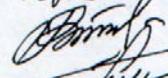
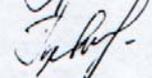
2. Окончательный вывод о причинах выхода из строя активной части может быть сделан после разборки блоков обмоток фаз А и Б и испытания ограничителей перенапряжения.

3. Подстанция подлежит ремонту без замены блоков высоковольтных обмоток с частичной заменой дисков.

4. Ограничители перенапряжений передать заводу изготовителю для проверки их работоспособности.

5. После восстановления активной части подстанцию подвергнуть тщательным испытаниям на перенапряжения с привлечением завода изготовителя вакуумного выключателя.

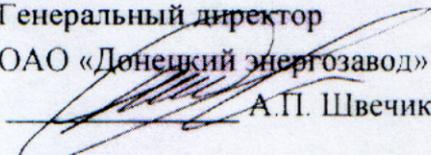
6. После восстановления и проведения испытаний подстанция может быть передана в эксплуатацию.

 В.Л. Кузнецов  
А.Н. Свеженцев  
 А.В. Кустов  
 И.Я. Чернов  
 В.В. Шилов  
 В.М. Грушко  
 С.В. Таран  
 Ю.В. Прищеп

## Приложение В

СОГЛАСОВАНО  
Директор УкрНИИВЭ

 Е.А. Вареник

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ОАО «Донецкий энергозавод»  
 А.П. Швечиков

## АКТ

обследования трансформаторной подстанции  
ТВКП-1000/6-1,2 (зав. № 001) вышедшей из строя  
во время проведения промышленных испытаний  
на ОАО Шахта «Комсомолец Донбасса»

г. Донецк

08 октября 2010 г.

Комиссия в составе:  
от ОАО «Донецкий энергозавод»:

Волков Н.А. - главный инженер,  
Кузнецов В.Л. - главный конструктор,  
Свеженцев А.Н. - главный метролог,  
Кустов А.В. - начальник ОТК,  
Воловик В.Д. - главный технолог;

от УкрНИИВЭ:

Савицкий В.Н. - заместитель директора по научной работе,  
Чернов И.Я. - заведующий КНИОТ и ТП,  
Шилов В.В. - заведующий сектором проектирования трансформаторов  
и КТП,  
Грушко В.М. - заведующий лабораторией трансформаторов и КТП,  
Никитин О.Е. - заведующий расчетно-теоретическим сектором транс-  
форматоров и КТП,  
Цололо В.В. - ГКП КНИОТ и ТП,

констатирует нижеследующее.

В соответствии с актом обследования трансформаторной подстанции  
ТВКП-1000/6-1,2 зав. № 001 от 20 сентября 2010 г. установлено, что трансфор-  
маторная подстанция была подключена под нагрузку 12.07.2010 г. Общая уста-  
новленная мощность токоприемников составила 1080 кВт. После полутораме-



сячной эксплуатации подстанции 28.08.2010 г. произошло отключение питающей ячейки КРУВ-6 из-за срабатывания защиты от короткого замыкания.

Установлено, что ограничители перенапряжения ОПН РТ 6/6,9, установленные на подстанции в соответствии с рекомендациями изготовителя, исправны.

После разборки активной части установлено, что произошел пробой изоляции обмотки трансформатора вследствие образования дуги между крайними витками первой катушки обмотки ВН фазы В и консолью магнитопровода по воздуху (расстояние 62 мм) с последующим развитием дуги на катушки фаз В и А.

При анализе причин выхода из строя трансформаторной подстанции ТВКП-100/6-1,2 зав. № 001 и, принимая во внимание опыт эксплуатации подстанций подобных конструкций в России и Казахстане, было отмечено, что в последние годы участились случаи выхода из строя подстанций, в которых использовалась вакуумная техника либо имеет место совместная эксплуатация с аппаратами, в которых она применяется.

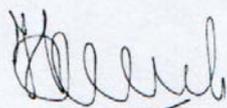
По результатам разборки активной части подстанции и тщательного ее обследования было отмечено, что наиболее вероятной причиной образования дуги и разрушения изоляции высоковольтной обмотки могли послужить: имеющиеся коммутационные перенапряжения при отключении ненагруженного трансформатора вакуумным выключателем подстанции, а также перенапряжения, которые могли возникнуть в шахтной сети, низкого качества пропитки катушек трансформатора или других причин.

Комиссией также сделан вывод о том, что для принятия мер по устранению подобных выходов их строя трансформаторных подстанций, необходимо проведение исследовательской работы по определению реальной картины фактических перенапряжений в шахтной сети, в том числе, с использованием вакуумной техники в трансформаторных подстанциях и другой аппаратуре.

**Только при наличии достоверных результатов исследований раскрывающих характер протекающих процессов и величины реальных перенапряжений можно дать обоснованные рекомендации по устранению разрушения обмоток активной части трансформатора.**

Учитывая имеющиеся наработки в части снижения возможных перенапряжений и увеличения электрической прочности изоляции активной части, предварительно, до получения результатов упомянутых исследований можно рекомендовать следующие мероприятия: максимально усилить (учитывая резервы имеющейся конструкции) электрическую прочность главной и продольной изоляции обмоток ВН до 24 кВ, для чего:

- изменить схему и группу соединения обмоток ВН с треугольника в звезду;
- установить дополнительные электроизоляционные барьеры между обмотками ВН и консолями;
- дополнительно изолировать витки первых и последних (крайних) двух катушек ВН;
- дополнительно пропитать обмотку ВН под вакуумом;
- учитывая специфику работы подстанции в шахтных условиях рассмотреть возможность замены ограничителей перенапряжения ОПН РТ 6-6,3 на ОПН РТ 3-3,3.



Н.А. Волков



В.Л. Кузнецов



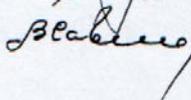
А.Н. Свеженцев



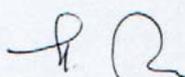
А.В. Кустов



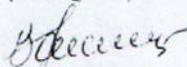
В.Д. Воловик



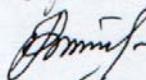
В.Н. Савицкий



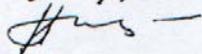
И.Я. Чернов



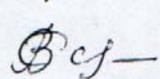
В.В. Шилов



В.М. Грушко



О.Е. Никитин



В.В. Цололо

## Приложение Г

Таблица Г.1 – Результаты измерения амплитуд КП для режима включения вакуумного контактора

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
1	34684	7,10	14329	2,93	6313	1,29	27243	5,58	18997	3,89
2	22797	4,67	12213	2,50	16834	3,45	25364	5,19	11941	2,44
3	21168	4,33	27193	5,57	18676	3,82	26304	5,38	15198	3,11
4	17749	3,63	32078	6,57	10785	2,21	28558	5,85	30938	6,33
5	22797	4,67	22797	4,67	18338	3,75	28558	5,85	14655	3,00
6	21983	4,50	17586	3,60	14467	2,96	33068	6,77	16826	3,44
7	26216	5,37	37452	7,67	8680	1,78	37201	7,62	33652	6,89
8	36800	7,53	21494	4,40	18262	3,74	29310	6,00	28767	5,89
9	12701	2,60	25076	5,13	9732	1,99	34947	7,15	33109	6,78
10	18563	3,80	21494	4,40	22546	4,62	22170	4,54	20626	4,22
11	21983	4,50	26542	5,43	22358	4,58	26304	5,38	19540	4,00
12	20354	4,17	30938	6,33	10597	2,17	30813	6,31	18997	3,89
13	14167	2,90	18563	3,80	14655	3,00	32128	6,58	27139	5,56
14	22960	4,70	14850	3,04	25928	5,31	31189	6,38	32567	6,67
15	20191	4,13	15632	3,20	18976	3,88	42086	8,62	26053	5,33
16	21494	4,40	21983	4,50	27431	5,62	25177	5,15	20083	4,11
17	22797	4,67	25728	5,27	19164	3,92	24425	5,00	18454	3,78
18	23122	4,73	35009	7,17	15933	3,26	25552	5,23	41794	8,56
19	17260	3,53	27030	5,53	20667	4,23	30813	6,31	28224	5,78
20	29961	6,13	23448	4,80	16834	3,45	22922	4,69	21711	4,44
21	15241	3,12	23122	4,73	14730	3,02	21795	4,46	38537	7,89
22	20517	4,20	16283	3,33	19916	4,08	25928	5,31	36909	7,56
23	19377	3,97	15632	3,20	11423	2,34	21043	4,31	35281	7,22
24	18726	3,83	17260	3,53	19540	4,00	29686	6,08	24425	5,00
25	21657	4,43	15632	3,20	24989	5,12	28183	5,77	20083	4,11

Продолжение таблицы Г.1

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		RC-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
26	15306	3,13	9119	1,87	33068	6,77	32692	6,69	29310	6,00
27	21331	4,37	15958	3,27	18976	3,88	28558	5,85	23339	4,78
28	22145	4,53	14655	3,00	12626	2,58	41335	8,46	18454	3,78
29	28659	5,87	11887	2,43	20104	4,12	43213	8,85	17839	3,65
30	27193	5,57	27845	5,70	10221	2,09	33068	6,77	32024	6,56
31	16935	3,47	32567	6,67	14730	3,02	21419	4,38	29491	6,04
32	16121	3,30	22960	4,70	34571	7,08	22546	4,62	17188	3,52
33	38266	7,83	17749	3,63	14430	2,95	40207	8,23	26415	5,41
34	13776	2,82	37126	7,60	12025	2,46	41523	8,50	30215	6,19
35	12310	2,52	21494	4,40	33068	6,77	34007	6,96	16609	3,40
36	16283	3,33	25402	5,20	15031	3,08	38328	7,85	27139	5,56
37	19703	4,03	22145	4,53	31377	6,42	42650	8,73	22797	4,67
38	14948	3,06	26542	5,43	18638	3,82	43589	8,92	22073	4,52
39	12050	2,47	30776	6,30	25364	5,19	40019	8,19	24063	4,93
40	21331	4,37	18726	3,83	23673	4,85	47911	9,81	17640	3,61
41	18889	3,87	14948	3,06	19352	3,96	45844	9,38	33833	6,93
42	20680	4,23	15632	3,20	12626	2,58	30062	6,15	29491	6,04
43	14394	2,95	21983	4,50	15237	3,12	23673	4,85	26777	5,48
44	20191	4,13	25891	5,30	7816	1,60	17887	3,66	22254	4,56
45	18563	3,80	33218	6,80	21607	4,42	36074	7,38	25872	5,30
46	13548	2,77	27356	5,60	21231	4,35	28934	5,92	30215	6,19
47	24588	5,03	23448	4,80	8079	1,65	23110	4,73	27682	5,67
48	16088	3,29	23285	4,77	8305	1,70	25740	5,27	33833	6,93
49	18563	3,80	16739	3,43	32504	6,65	15782	3,23	34557	7,07
50	31590	6,47	15827	3,24	6707	1,37	18112	3,71	30757	6,30

Таблица Г.2 – Результаты измерения амплитуд КП для режима отключения вакуумного контактора

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
1	49990	10,23	37452	7,67	8154	1,67	8680	1,78	48307	9,89
2	53409	10,93	56178	11,50	4885	1,00	7196	1,47	6513	1,33
3	66925	13,70	60411	12,37	4885	1,00	11912	2,44	37994	7,78
4	71158	14,57	32892	6,73	4885	1,00	8925	1,83	34195	7,00
5	49990	10,23	66273	13,57	12363	2,53	5204	1,07	48488	9,93
6	60086	12,30	63179	12,93	16834	3,45	4885	1,00	14112	2,89
7	60900	12,47	59923	12,27	12100	2,48	16985	3,48	58620	12,00
8	55038	11,27	72298	14,80	16647	3,41	5261	1,08	46136	9,44
9	93141	19,07	65948	13,50	4885	1,00	5655	1,16	17369	3,56
10	64319	13,17	56666	11,60	19728	4,04	6313	1,29	43965	9,00
11	56666	11,60	63017	12,90	16910	3,46	6012	1,23	11941	2,44
12	72787	14,90	82394	16,87	23298	4,77	17285	3,54	9770	2,00
13	64319	13,17	78811	16,13	22358	4,58	5374	1,10	42879	8,78
14	87279	17,87	64808	13,27	4885	1,00	4885	1,00	4885	1,00
15	56666	11,60	77346	15,83	15688	3,21	16534	3,38	37994	7,78
16	82068	16,80	80440	16,47	6839	1,40	6764	1,38	51021	10,44
17	71158	14,57	82882	16,97	4885	1,00	4885	1,00	56992	11,67
18	77020	15,77	97212	19,90	14730	3,02	4885	1,00	43965	9,00
19	62691	12,83	76695	15,70	33068	6,77	17379	3,56	59706	12,22
20	47547	9,73	60900	12,47	8117	1,66	6877	1,41	39623	8,11
21	52107	10,67	57643	11,80	4885	1,00	34007	6,96	11398	2,33
22	74252	15,20	51130	10,47	8718	1,78	8643	1,77	54821	11,22
23	81254	16,63	79788	16,33	18037	3,69	7891	1,62	32024	6,56
24	94769	19,40	84836	17,37	6914	1,42	6163	1,26	12303	2,52
25	74578	15,27	36638	7,50	13828	2,83	4885	1,00	58077	11,89

Продолжение таблицы Г.2

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
26	51618	10,57	58457	11,97	23110	4,73	27243	5,58	62419	12,78
27	58294	11,93	76043	15,57	18976	3,88	8342	1,71	46679	9,56
28	63505	13,00	41197	8,43	8117	1,66	5561	1,14	33290	6,81
29	43151	8,83	54549	11,17	16534	3,38	4885	1,00	45593	9,33
30	41685	8,53	60737	12,43	13227	2,71	26116	5,35	47403	9,70
31	36475	7,47	29473	6,03	13828	2,83	21983	4,50	33833	6,93
32	64808	13,27	71158	14,57	12626	2,58	17530	3,59	48669	9,96
33	69041	14,13	63505	13,00	23110	4,73	4885	1,00	8612	1,76
34	71321	14,60	59760	12,23	19258	3,94	20292	4,15	35642	7,30
35	34684	7,10	72461	14,83	12325	2,52	5411	1,11	60610	12,41
36	41523	8,50	65459	13,40	14430	2,95	5787	1,18	58982	12,07
37	60248	12,33	56992	11,67	9620	1,97	6689	1,37	40527	8,30
38	62691	12,83	62854	12,87	20479	4,19	37953	7,77	36547	7,48
39	78323	16,03	82719	16,93	5110	1,05	16308	3,34	43060	8,81
40	48524	9,93	78160	16,00	17436	3,57	4885	1,00	35642	7,30
41	86790	17,77	64808	13,27	21419	4,38	4885	1,00	11579	2,37
42	59271	12,13	77346	15,83	7515	1,54	5298	1,08	13533	2,77
43	72298	14,80	80765	16,53	4885	1,00	5355	1,10	11688	2,39
44	84348	17,27	77020	15,77	5712	1,17	4885	1,00	67124	13,74
45	55363	11,33	60900	12,47	4885	1,00	5430	1,11	39442	8,07
46	32567	6,67	57969	11,87	17135	3,51	4885	1,00	64048	13,11
47	26705	5,47	50804	10,40	4885	1,00	10522	2,15	70018	14,33
48	44942	9,20	79626	16,30	21043	4,31	12626	2,58	55906	11,44
49	79626	16,30	85488	17,50	5806	1,19	11048	2,26	48669	9,96
50	66273	13,57	36475	7,47	27619	5,65	4885	1,00	32024	6,56

Таблица Г.3 – Результаты измерения амплитуд КП для режима включения элегазового контактора

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
1	12476	2,55	15256	3,12	9055	1,85	11649	2,38	11311	2,32
2	9620	1,97	13678	2,80	10167	2,08	18788	3,85	13941	2,85
3	6764	1,38	14204	2,91	15251	3,12	10522	2,15	13302	2,72
4	12325	2,52	15576	3,19	10008	2,05	12025	2,46	14260	2,92
5	17285	3,54	18525	3,79	8420	1,72	15031	3,08	16421	3,36
6	11273	2,31	15369	3,15	9532	1,95	15933	3,26	8605	1,76
7	11499	2,35	13678	2,80	11120	2,28	12926	2,65	15820	3,24
8	12175	2,49	13039	2,67	15727	3,22	7215	1,48	11912	2,44
9	14204	2,91	14523	2,97	10108	2,07	9920	2,03	15820	3,24
10	13077	2,68	19164	3,92	16780	3,43	11423	2,34	20292	4,15
11	13077	2,68	17041	3,49	12590	2,58	8117	1,66	17041	3,49
12	19916	4,08	10315	2,11	12769	2,61	7816	1,60	17887	3,66
13	11273	2,31	11160	2,28	21049	4,31	8117	1,66	12213	2,50
14	17586	3,60	14523	2,97	12769	2,61	18638	3,82	22546	4,62
15	18150	3,72	15782	3,23	12590	2,58	15331	3,14	21043	4,31
16	15782	3,23	14937	3,06	17733	3,63	24425	5,00	17736	3,63
17	12851	2,63	8831	1,81	21049	4,31	18150	3,72	18676	3,82
18	16910	3,46	14937	3,06	14020	2,87	9995	2,05	19164	3,92
19	13077	2,68	15782	3,23	18468	3,78	9206	1,88	24989	5,12
20	24049	4,92	14523	2,97	17793	3,64	9732	1,99	13678	2,80
21	15256	3,12	16421	3,36	16680	3,41	11311	2,32	23110	4,73
22	13152	2,69	15782	3,23	24425	5,00	24989	5,12	23861	4,88
23	16834	3,45	13471	2,76	15787	3,23	16834	3,45	22358	4,58
24	17887	3,66	15144	3,10	15350	3,14	18150	3,72	19089	3,91
25	17361	3,55	8417	1,72	15132	3,10	18638	3,82	19540	4,00

Продолжение таблицы Г.3

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
26	14993	3,07	16628	3,40	17356	3,55	18413	3,77	20479	4,19
27	14467	2,96	15576	3,19	16680	3,41	19540	4,00	23110	4,73
28	16045	3,28	11160	2,28	20851	4,27	21795	4,46	20292	4,15
29	15256	3,12	21231	4,35	14238	2,91	17361	3,55	22170	4,54
30	17887	3,66	25928	5,31	20255	4,15	19728	4,04	21043	4,31
31	17361	3,55	13471	2,76	24822	5,08	21795	4,46	21607	4,42
32	24989	5,12	14091	2,88	14675	3,00	17361	3,55	23486	4,81
33	20855	4,27	16196	3,32	19341	3,96	21795	4,46	16834	3,45
34	16308	3,34	20479	4,19	22836	4,67	20855	4,27	24801	5,08
35	16045	3,28	10108	2,07	23631	4,84	21795	4,46	18695	3,83
36	17624	3,61	27055	5,54	17117	3,50	17887	3,66	21607	4,42
37	17361	3,55	10728	2,20	14456	2,96	19916	4,08	24989	5,12
38	15519	3,18	14091	2,88	17117	3,50	19540	4,00	18976	3,88
39	23486	4,81	14730	3,02	12014	2,46	19728	4,04	19916	4,08
40	20855	4,27	11780	2,41	18229	3,73	18150	3,72	27055	5,54
41	16571	3,39	20667	4,23	5997	1,23	17887	3,66	23673	4,85
42	15782	3,23	19728	4,04	10683	2,19	20479	4,19	24425	5,00
43	19916	4,08	13678	2,80	10902	2,23	21231	4,35	17041	3,49
44	18150	3,72	15989	3,27	25418	5,20	18676	3,82	15820	3,24
45	14993	3,07	15576	3,19	7566	1,55	17098	3,50	14974	3,07
46	19540	4,00	11574	2,37	10902	2,23	19916	4,08	19164	3,92
47	20479	4,19	9056	1,85	12014	2,46	18676	3,82	17624	3,61
48	13415	2,75	10315	2,11	16680	3,41	18976	3,88	18150	3,72
49	9995	2,05	13678	2,80	12908	2,64	13903	2,85	8943	1,83
50	11048	2,26	7158	1,47	11339	2,32	11837	2,42	17624	3,61

Таблица Г.4 – Результаты измерения амплитуд КП для режима отключения элегазового контактора

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
1	41335	8,46	23110	4,73	4885	1,00	11048	2,26	15031	3,08
2	16947	3,47	15933	3,26	4885	1,00	4885	1,00	16158	3,31
3	47535	9,73	15632	3,20	4885	1,00	4885	1,00	15463	3,17
4	18976	3,88	14129	2,89	4885	1,00	4885	1,00	15632	3,20
5	18037	3,69	12025	2,46	6553	1,34	4885	1,00	16233	3,32
6	37013	7,58	33068	6,77	4885	1,00	4885	1,00	29122	5,96
7	18037	3,69	34571	7,08	4885	1,00	4885	1,00	16834	3,45
8	24425	5,00	34571	7,08	4885	1,00	4885	1,00	32504	6,65
9	51856	10,62	15632	3,20	4885	1,00	4885	1,00	52232	10,69
10	49602	10,15	11423	2,34	4885	1,00	5862	1,20	43213	8,85
11	51856	10,62	15256	3,12	4885	1,00	4885	1,00	16233	3,32
12	20292	4,15	34195	7,00	4885	1,00	4885	1,00	13227	2,71
13	20292	4,15	17887	3,66	4885	1,00	4885	1,00	11574	2,37
14	55238	11,31	16308	3,34	9174	1,88	11499	2,35	22170	4,54
15	18601	3,81	22546	4,62	6076	1,24	4885	1,00	16834	3,45
16	34571	7,08	17361	3,55	4885	1,00	4885	1,00	15256	3,12
17	17736	3,63	11574	2,37	4885	1,00	4885	1,00	28371	5,81
18	49602	10,15	22170	4,54	6791	1,39	6219	1,27	11423	2,34
19	18488	3,78	16834	3,45	4885	1,00	4885	1,00	15256	3,12
20	16684	3,42	15256	3,12	4885	1,00	4885	1,00	24237	4,96
21	16910	3,46	60499	12,38	4885	1,00	5054	1,03	17924	3,67
22	18037	3,69	18037	3,69	4885	1,00	4885	1,00	15707	3,22
23	17473	3,58	23486	4,81	4885	1,00	4885	1,00	15632	3,20
24	64820	13,27	15632	3,20	4885	1,00	6087	1,25	14167	2,90
25	63505	13,00	15632	3,20	4885	1,00	4885	1,00	11987	2,45

Продолжение таблицы Г.4

№ оп.	Средство снижения КП									
	Без средств		ОПН		РС-блок		R <sub>шНН</sub> = 46 Ом		R <sub>шВН</sub> = 16,5 кОм	
	U <sub>1м</sub> , В	K <sub>1п</sub>	U <sub>2м</sub> , В	K <sub>2п</sub>	U <sub>3м</sub> , В	K <sub>3п</sub>	U <sub>4м</sub> , В	K <sub>4п</sub>	U <sub>5м</sub> , В	K <sub>5п</sub>
26	55426	11,35	15632	3,20	5719	1,17	4885	1,00	23486	4,81
27	74402	15,23	59559	12,19	4885	1,00	6219	1,27	33256	6,81
28	31189	6,38	16834	3,45	5838	1,20	5035	1,03	35510	7,27
29	18037	3,69	16834	3,45	4885	1,00	4885	1,00	34571	7,08
30	83421	17,08	32504	6,65	6076	1,24	4885	1,00	13152	2,69
31	69893	14,31	52232	10,69	4885	1,00	4885	1,00	16308	3,34
32	43589	8,92	43213	8,85	4885	1,00	4885	1,00	22546	4,62
33	42086	8,62	16233	3,32	5362	1,10	12213	2,50	17361	3,55
34	49602	10,15	13227	2,71	4885	1,00	4885	1,00	18112	3,71
35	27055	5,54	31189	6,38	4885	1,00	4885	1,00	23486	4,81
36	64632	13,23	16233	3,32	4885	1,00	4885	1,00	13828	2,83
37	18037	3,69	13227	2,71	4885	1,00	4885	1,00	15632	3,20
38	82669	16,92	38516	7,88	9174	1,88	5411	1,11	15745	3,22
39	72899	14,92	33631	6,88	4885	1,00	4885	1,00	26680	5,46
40	14279	2,92	15031	3,08	4885	1,00	4885	1,00	16647	3,41
41	72148	14,77	15031	3,08	4885	1,00	6614	1,35	47723	9,77
42	33068	6,77	16158	3,31	4885	1,00	5261	1,08	16102	3,30
43	82669	16,92	15031	3,08	4885	1,00	4885	1,00	60499	12,38
44	78160	16,00	15632	3,20	4885	1,00	4885	1,00	13227	2,71
45	50729	10,38	16233	3,32	4885	1,00	5261	1,08	31189	6,38
46	18563	3,80	29122	5,96	4885	1,00	7140	1,46	16233	3,32
47	18563	3,80	72711	14,88	6315	1,29	4885	1,00	13227	2,71
48	17586	3,60	15632	3,20	4885	1,00	4885	1,00	38516	7,88
49	18563	3,80	62002	12,69	4885	1,00	4885	1,00	33631	6,88
50	86991	17,81	13227	2,71	4885	1,00	4885	1,00	15125	3,10