

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

На правах рукописи

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Донецк – 2020

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Маренич Константин Николаевич**, ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк), заведующий кафедрой «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова»

Официальные оппоненты: **Гайдук Анатолий Романович** доктор технических наук, профессор ФГАОУ «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСУ) (г. Таганрог), профессор кафедры «Системы автоматического управления»

Шевцов Дмитрий Валерьевич кандидат технических наук, доцент ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк), заведующий кафедрой «Прикладная математика и теория систем управления»

Ведущее предприятие: **Государственное учреждение «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш» им. В.А. Антипова»** (г. Донецк)

Защита состоится « 16 » марта 2021 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 в ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensoviet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 2.
Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Комплектная трансформаторная подстанция (КТП) – важнейший функциональный узел электротехнического комплекса участка шахты, в значительной степени определяющий эффективность функционирования технологического оборудования, а также безопасность персонала. Высокими эксплуатационными характеристиками современных высоковольтных коммутационных аппаратов (ВКА) обусловлены прецеденты их применения в структуре КТП для коммутации обмоток высшего напряжения трансформатора. Такой подход позволяет существенно повысить быстродействие защитного отключения силового присоединения КТП при возникновении аварийных (опасных) состояний, расширить функциональность подстанции, рационализировать применение и структуру схем присоединений высоковольтных комплектных распределительных устройств.

Однако, в ходе опытно-промышленной эксплуатации таких подстанций выявлен повторяющийся негативный фактор – множественный пробой изоляции обмотки высшего напряжения трансформатора с последующим повышением интенсивности её повреждения электрической дугой в воздушном промежутке на корпус КТП, что явилось следствием возникновения коммутационных перенапряжений в процессе эксплуатации высоковольтных коммутационных аппаратов. Массовый, повторяющийся характер такого вида повреждения свидетельствует о функциональной недостаточности штатных средств подавления коммутационных напряжений (поставляемых совместно с ВКА) при их размещении в конструкции рудничной оболочки КТП, 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 высоковольтным коммутационным аппаратом в цепи обмотки высшего напряжения трансформатора является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Современные шахтные участковые электротехнические комплексы содержат в своей структуре различные по назначению компоненты, 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 трансформаторных подстанций 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 обмотки высшего напряжения 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. Поров, R. Smeets, К.П. Кадомской. В исследованиях И.А. Лебедева, Р.А. Майнгашиева, Е.В. Гавриловой, M. Devgan выявлены условия и области эксплуатации, где имеет место недостаточная функциональная эффективность нелинейных ограничителей напряжения (ОПН).

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

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 исследований – 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».

Задачи исследований:

- 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, 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 и разработке способа ограничения коммутационных перенапряжений в данной системе на основании 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 натурных 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» 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 взрывозащищенных 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 натурных 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, АСТПП 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. Работа иллюстрирована 57 рисунками, содержит 16 таблиц. Список литературы включает 112 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, определяющие научное и практическое значения результатов исследований.

В первом разделе рассмотрены особенности работы рудничной комплектной трансформаторной подстанции в составе электротехнического комплекса участка шахты. Особое внимание уделено подстанциям повышенной мощности со встроенным в распределительное устройство высшего напряжения высоковольтным коммутационным аппаратом. Рассмотрены преимущества, обусловленные эксплуатацией таких подстанций в контексте повышения эффективности защитного отключения силовых присоединений и рационализации электроснабжения участков шахты в условиях большой протяженности кабельных линий.

Представлен анализ результатов опытно-промышленной эксплуатации (в условиях шахты) КТП, содержащей комплекс «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в части разрушающего воздействия коммутационных перенапряжений на изоляцию обмоток трансформатора и функциональной нестабильности применяемых средств ограничения перенапряжений при размещении высоковольтного коммутационного аппарата в непосредственной близости от силового трансформатора в корпусе подстанции.

Представлен аналитический обзор результатов исследований в области подавления перенапряжений, обусловленных коммутацией ненагруженного трансформатора собственным высоковольтным выключателем КТП, который обозначил основные подходы и методы подавления коммутационных перенапряжений (классифицированы в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1).

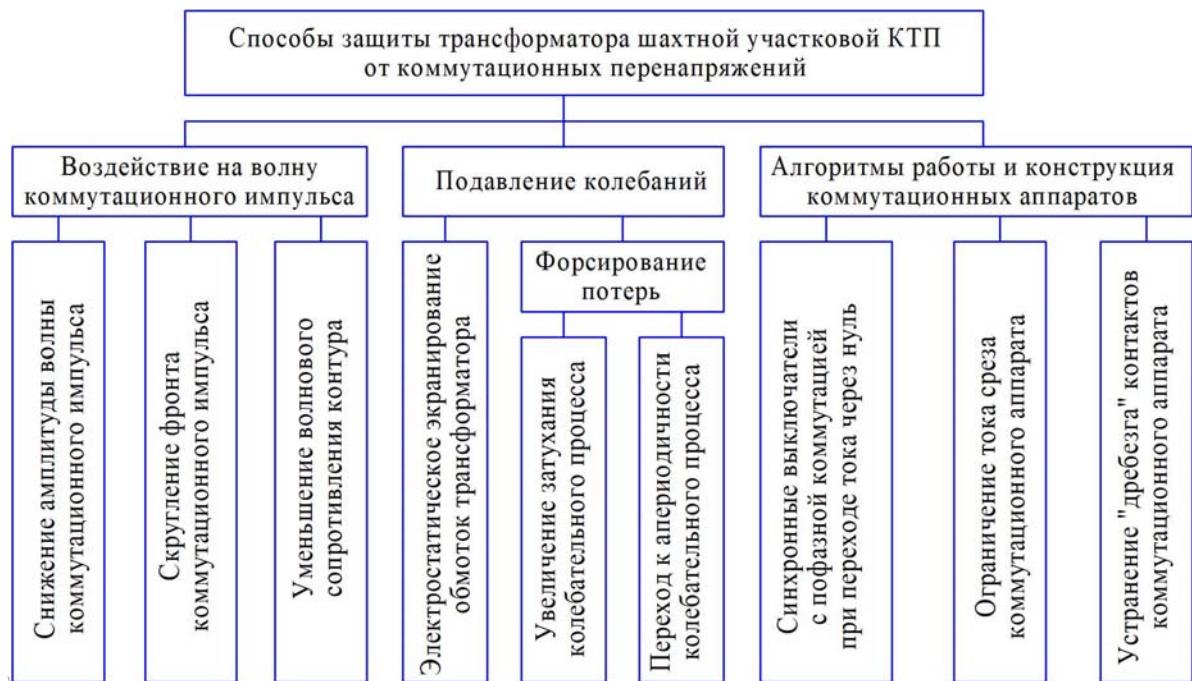


Рисунок 1 – Классификация методов защиты трансформатора шахтной участковой КТП от коммутационных перенапряжений

Обоснована целесообразность проведения исследований в области установления эффективности подавления коммутационных перенапряжений в структуре КТП посредством управляемого шунтирования его обмоток активно-реактивными цепями (обмотки высшего напряжения) и активными сопротивлениями (обмотки низшего напряжения) на интервале существования коммутационного процесса.

Второй раздел посвящён постановке экспериментов в контексте исследования процессов возникновения, протекания и подавления перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» КТП, включая применение элементов управляемого шунтирования активными (R) и активно-реактивными (RC) цепями обмоток трансформатора подстанции.

Применительно к исследованию коммутационных перенапряжений комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» разработан стенд (Рисунок 2), содержащий основные функциональные элементы объекта исследования, включая технические средства управляемого шунтирования обмоток трансформатора, измерительные и регистрирующие приборы.

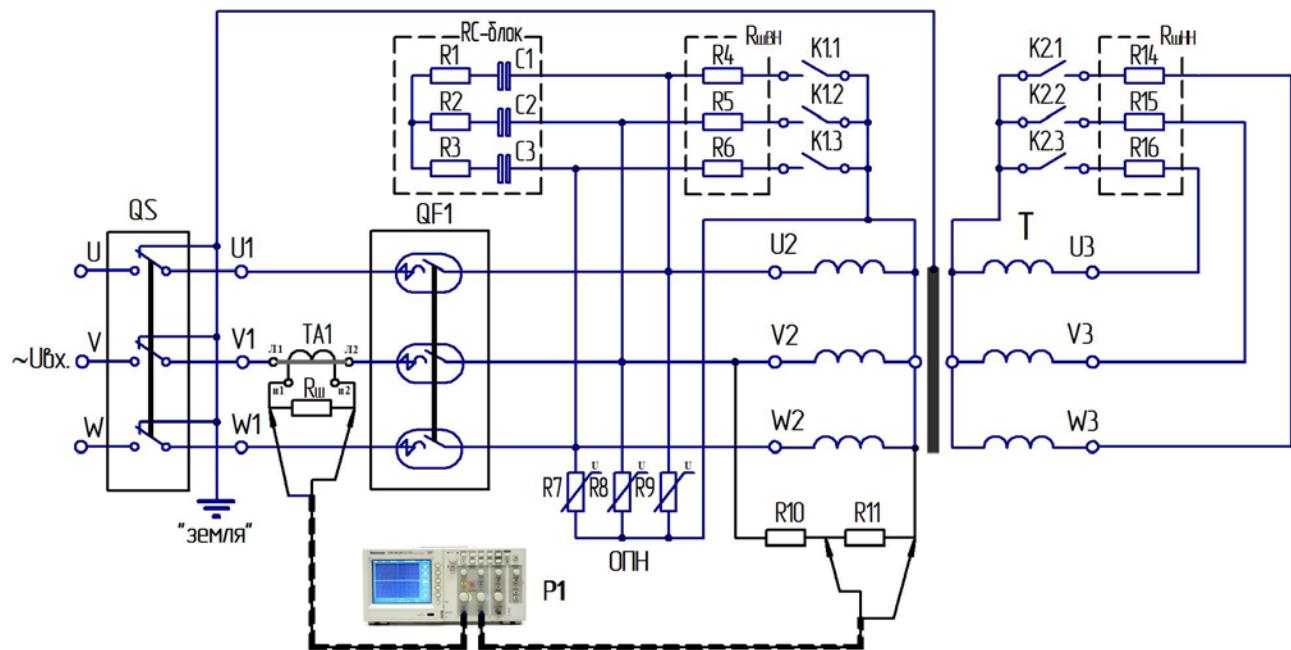


Рисунок 2 – Электрическая схема стенда исследований коммутационных процессов в комплексе «ВКА – трансформатор» шахтной КТП

В результате экспериментов установлено:

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

2. Нелинейные ограничители перенапряжений показали низкую эффективность при возникновении коммутационных импульсов длительностью 100 – 200 нс., когда скорость роста электрической прочности межконтактного промежутка оказывается меньшей скорости роста импульса коммутационного перенапряжения (Рисунок 3).

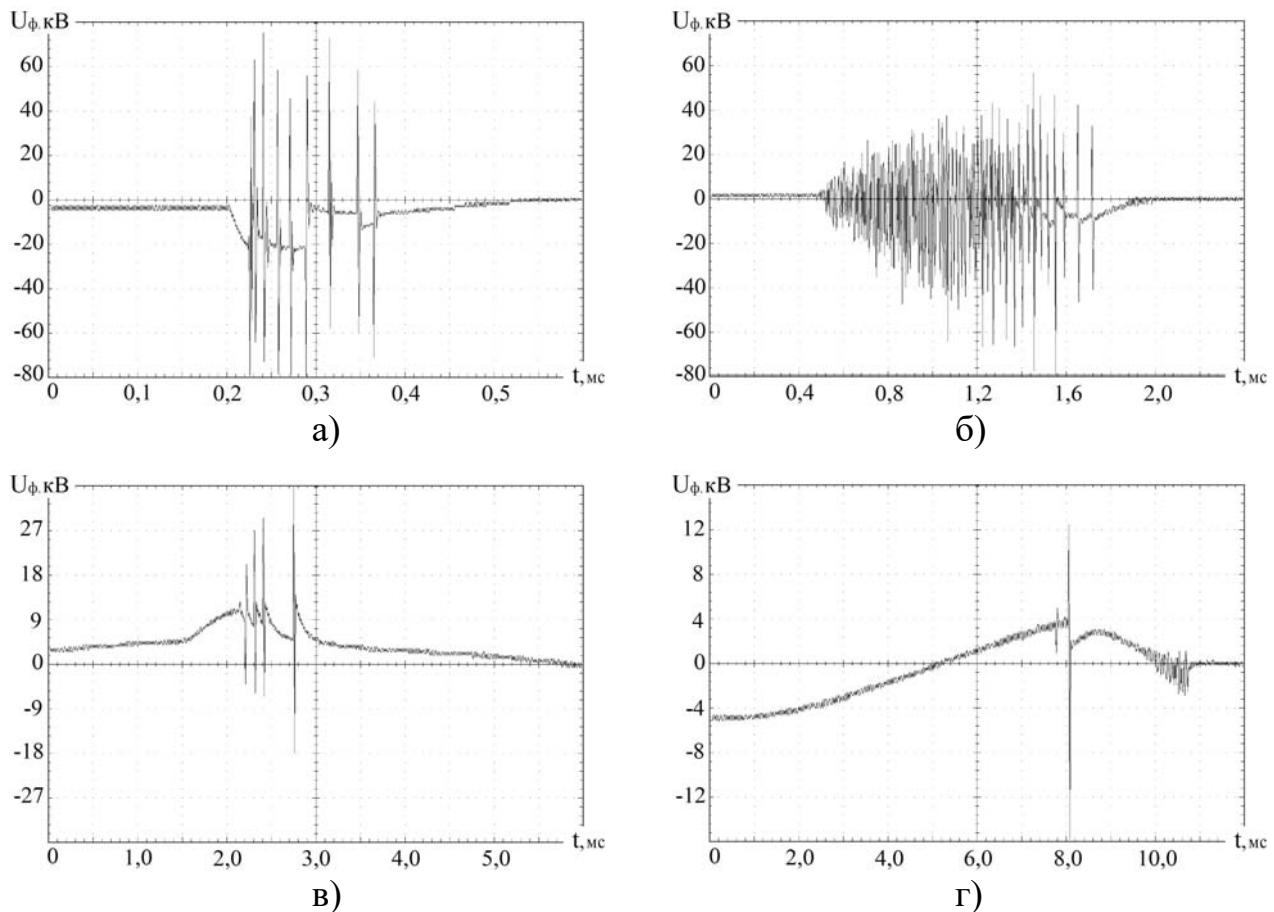


Рисунок 3 – Осциллограммы коммутационных перенапряжений при отключении трансформатора вакуумным контактором: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г) с использованием $R_{shn} = 46$ Ом

3. Зафиксированными параметрами комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в сети 6 кВ подтверждена целесообразность применения технических средств подавления перенапряжений, построенных на основе управляемой коммутации RC- и R-элементов, шунтирующих обмотки трансформатора КТП (соответствующие гистограммы вероятностей распределения амплитуд коммутационных перенапряжений заданной кратности, представлены на рисунке 4).

4. Экспериментально подтверждено, что существующие промышленные образцы технических средств ограничения перенапряжений, предназначенные для совместной эксплуатации с высоковольтными коммутационными

аппаратами, не выполняют свою функцию в случае, компактного расположения высоковольтного коммутационного аппарата и силового трансформатора в общем металлическом корпусе.

5. Доказана целесообразность построения технического средства ограничения перенапряжений на основе управляемой коммутации RC-элементов шунтирования в цепи обмотки высшего напряжения трансформатора КТП (в интервале коммутационного процесса) и R-элементов шунтирования в цепи обмотки низшего напряжения этого трансформатора (только в процессе его отключения).

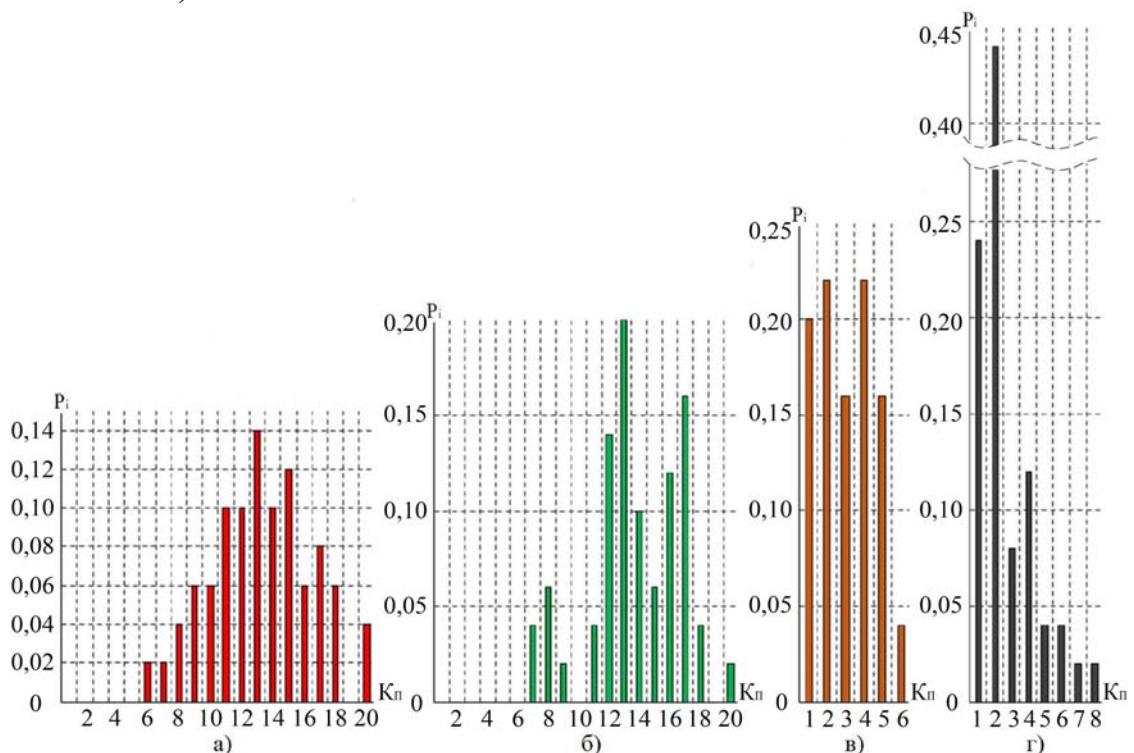


Рисунок 4 – Вероятности возникновения амплитуд коммутационных перенапряжений заданной кратности при *отключении* трансформатора *вакуумным контактором*: а) без средств защиты; б) при подключенных ОПН; в) при подключенном RC-блоке; г) с использованием $R_{шНН} = 46 \text{ Ом}$

Третий раздел посвящён исследованию процессов, коммутации в комплексе «ВКА – трансформатор» в контексте установления оптимальной структуры, рациональных параметров и алгоритмов функционирования технических средств снижения коммутационных перенапряжений методами математического и компьютерного моделирования.

Процесс формирования коммутационного перенапряжения в комплексе «ВКА – трансформатор» представлен выражением (1), в котором учтены факторы воздействия, такие, как: амплитуда тока среза; ёмкость между ВКА и трансформатором; входная ёмкость системы; формы кривой намагничивания; мощность трансформатора, его исходный режим, предшествующий его отключению; потери (на гистерезис и вихревые токи):

$$u(t) = \sqrt{U_m^2 \cdot e^{-2\beta t} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{L_{обм}}{C_{обм}} \cdot I_m^2 \cdot e^{-2\beta t} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi_0)}, \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения питания; $L_{обм}$ и $C_{обм}$ – соответственно индуктивность и эквивалентная емкость обмоток трансформатора; I_m – амплитуда тока среза; ω – частота затухающих колебаний; β – коэффициент затухания; φ_0 – начальная фаза коммутации; t – время переходного процесса.

На основании такого представления процесса разработана компьютерная модель объекта (Рисунок 5), в структуре которой выделены R- и RC-цепи шунтирования обмоток трансформатора, а также структуры управления моментами коммутации этих цепей.

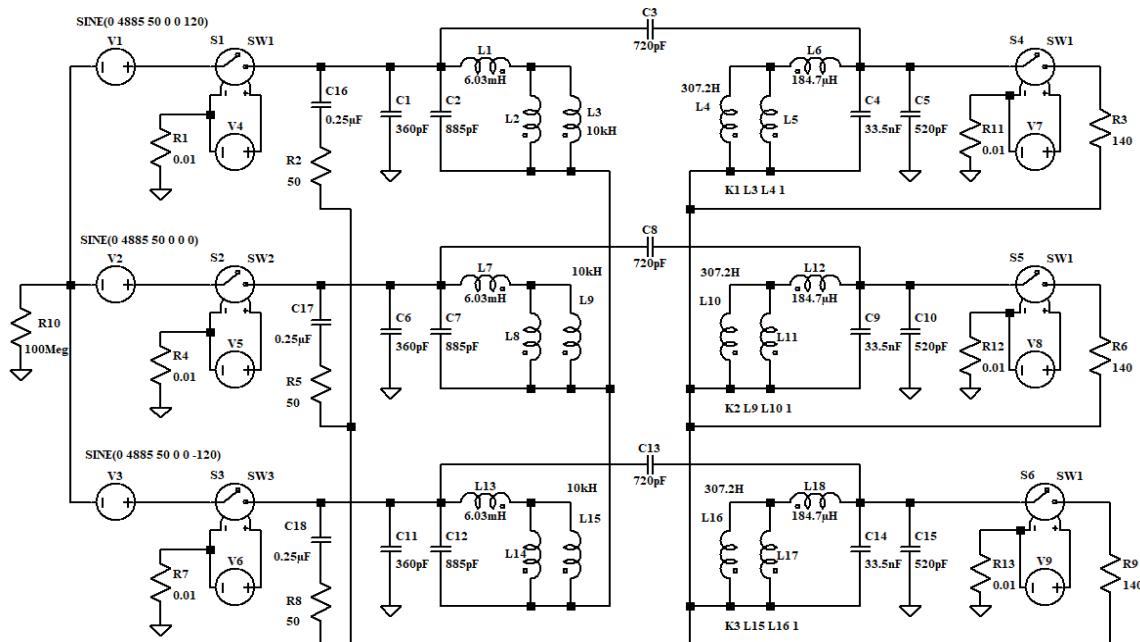


Рисунок 5 – Компьютерная модель объекта исследований

В результате исследования получены данные, позволяющие задавать очерёдность, продолжительность и условия синхронизации включения шунтирующих элементов технических средств подавления коммутационных перенапряжений. На рисунке 6 представлена зависимость коэффициента снижения амплитуды коммутационного импульса (K_C) от номиналов шунтирующих резисторов обмотки низшего напряжения трансформатора $R_{шнн}$, а на рисунке 7 – зависимость энергии (W_r), рассеиваемой резистором $R_{шнн}$, от времени предвключания t .

Установлено, что общее условие оптимальности работы системы автоматического ограничения перенапряжений (САОП) может быть представлено зависимостью (2):

$$\begin{cases} K_C = f(R_{шнн}), \text{ при } U_{u1} = U_{m\phi 1} \\ W'_r(t) \rightarrow 0, \text{ при } t1 \rightarrow t2 \end{cases}, \quad (2)$$

где U_{ul} – амплитудное значение коммутационного импульса; $U_{m\phi l}$ – амплитудное значение напряжения, питающего обмотку высшего напряжения трансформатора; $t1$ и $t2$ – соответственно моменты времени включения коммутатора шунтирующих сопротивлений обмотки низшего напряжения и отключения ВКА.

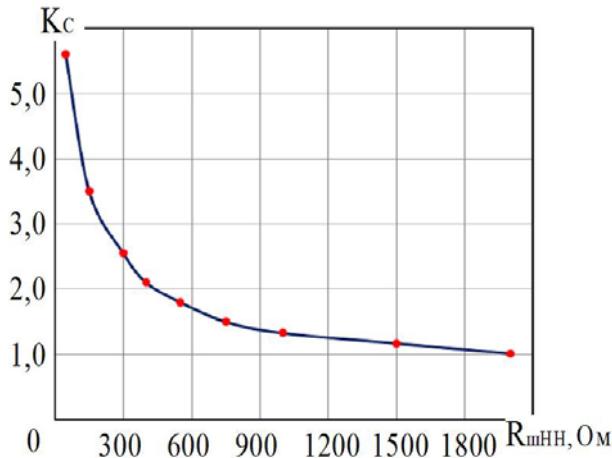


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента снижения амплитуды коммутационного импульса от номиналов шунтирующих резисторов обмотки НН трансформатора

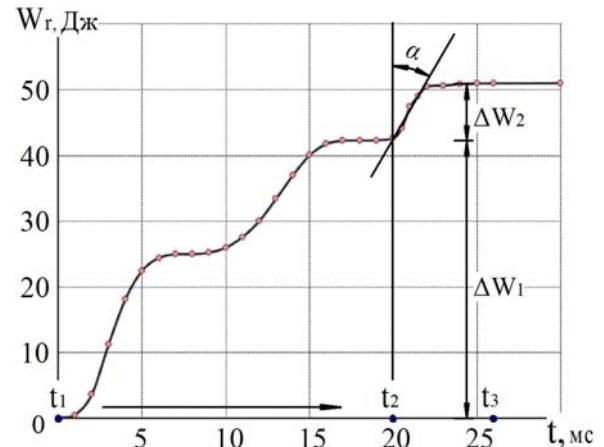


Рисунок 7 – Зависимость энергии W_r , рассеиваемой шунтирующим резистором обмотки НН трансформатора, от времени предвключения t

При этом диаграммы параметров переходного процесса отключения ВКА, протекающего согласно общему условию оптимальности функционирования САОП имеют вид, представленный на рисунке 8.

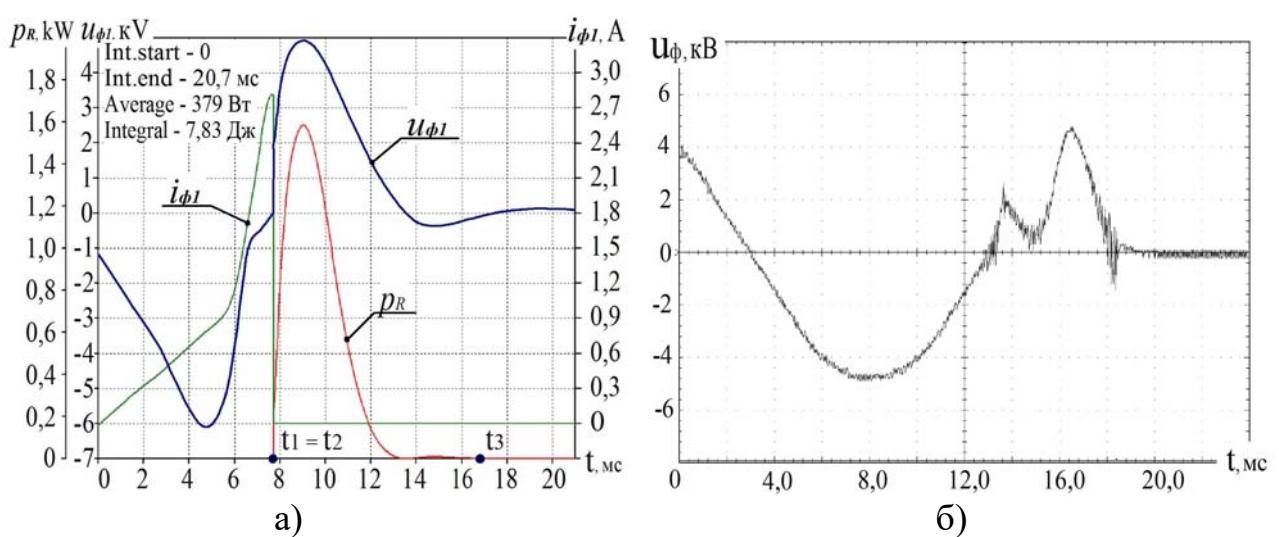


Рисунок 8 – Переходной процесс отключения ВКА, учитывающий общее условие оптимальности функционирования САОП: а) расчетные осциллограммы; б) экспериментальная осциллограмма

В результате выполненных исследований обоснованы исходные параметры для разработки алгоритмов управления функциональными узлами технических средств подавления коммутационных перенапряжений.

Четвёртый раздел посвящён реализации результатов исследований. Функциональная взаимосвязь технических средств управляемого шунтирования обмоток трансформатора на интервале коммутации в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» представлена в разработанной структурной схеме КТП (Рисунок 9).

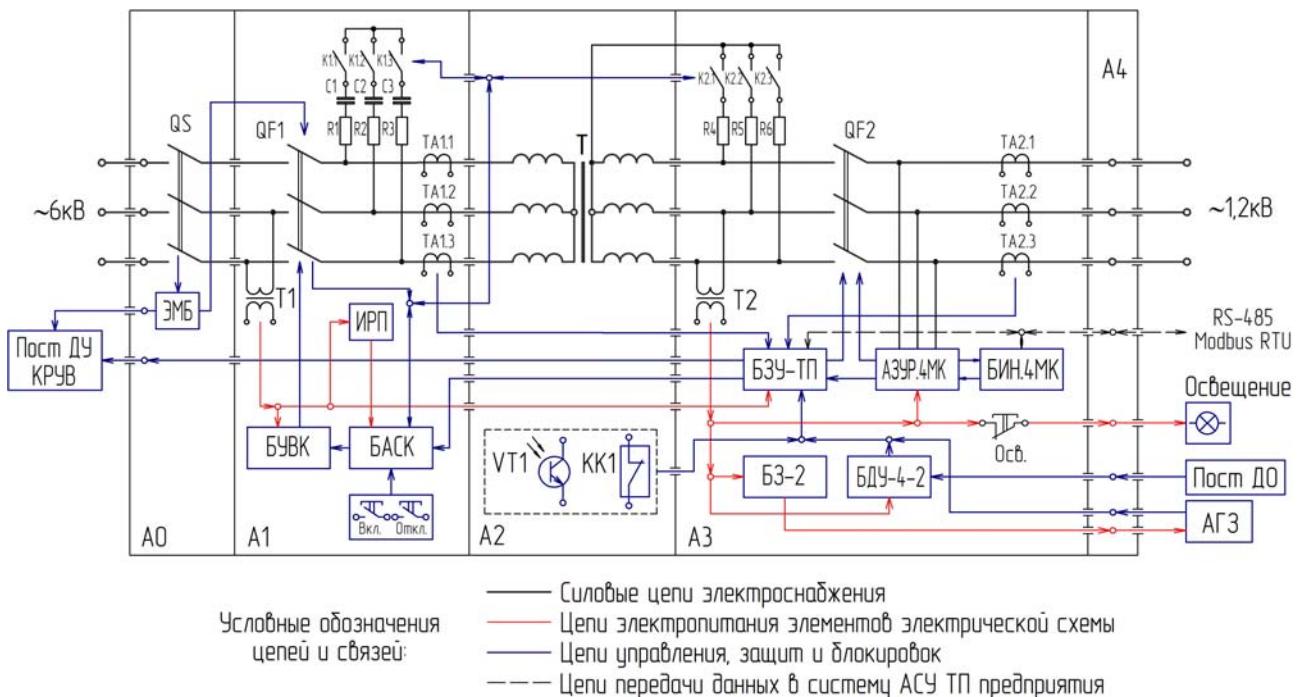


Рисунок 9 – Структурная схема шахтной участковой КТП, модернизированная системой автоматического ограничения перенапряжений

На рисунке 10а и рисунке 10б представлены, соответственно, функциональная схема и временная диаграмма, а на рисунке 10в – алгоритм функционирования устройства управления коммутатором шунтирующих резисторов обмотки низшего напряжения трансформатора КТП, как структурной единицы САОП.

Функциональные схемы и временные диаграммы устройств управления коммутатором активно-реактивных цепей шунтирования обмотки высшего напряжения трансформатора КТП при включении и отключении ВКА представлены, соответственно, на рисунке 11а и рисунке 11б.

Данными схемными решениями реализуется задача синхронизации работы коммутаторов шунтирующих устройств с работой ВКА и параметрами напряжения сети, что позволяет снизить мощность шунтирующих элементов коммутационного процесса.

Схемой также предусмотрена синхронизация функционирования САОП с командами средств защиты и управления КТП.

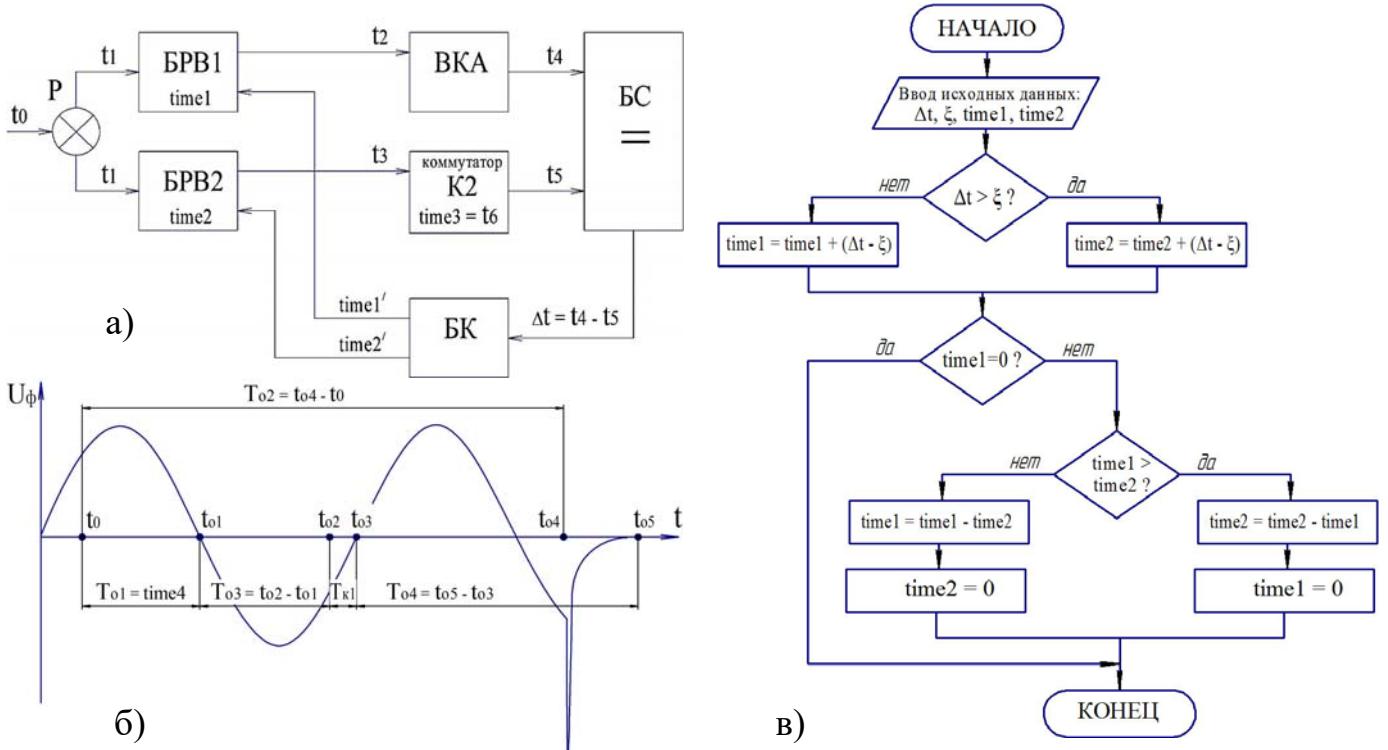


Рисунок 10 – Принцип работы устройства управления коммутатором шунтирующих резисторов обмотки низшего напряжения трансформатора:
а) функциональная схема; б) временная диаграмма; в) алгоритм работы

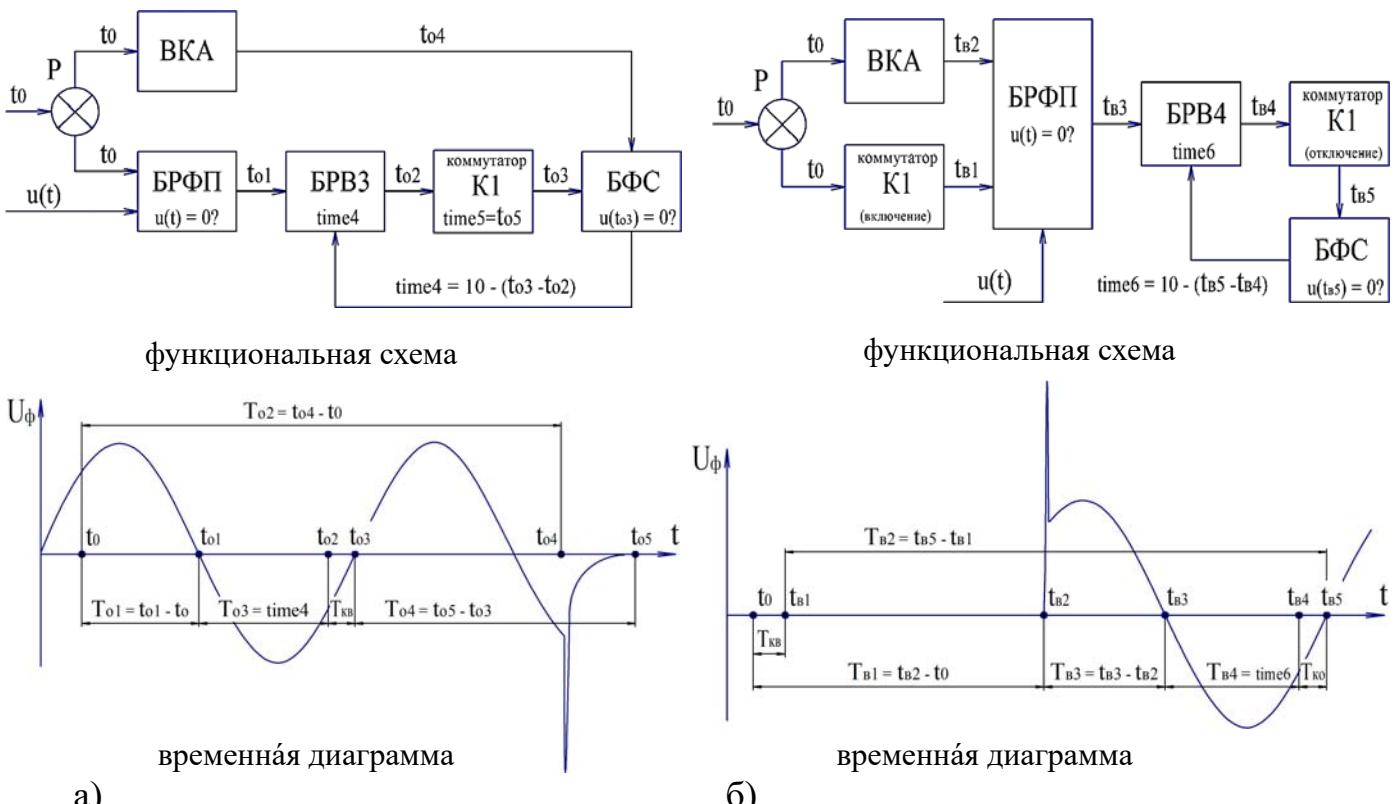


Рисунок 11 – Принцип работы устройства управления коммутатором шунтирующих активно-реактивных цепей обмотки высшего напряжения трансформатора: а) при отключении ВКА; б) при включении ВКА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из эффективных технических решений в области совершенствования системы электроснабжения шахты и повышения функциональных возможностей электротехнических комплексов шахтных технологических участков является применение комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» в структуре шахтной участковой трансформаторной подстанции. Проблемным фактором в этом случае, препятствующим безаварийной эксплуатации трансформаторной подстанции выступают значительные по величине коммутационные перенапряжения, действующие на изоляцию обмоток трансформатора и, выявленная в ходе эксплуатации, неработоспособность штатных средств ограничения перенапряжений в условиях размещения высоковольтных коммутационных аппаратов непосредственно в корпусе трансформаторной подстанции.

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 диссертационного исследования использованы в научно-исследовательской работе ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ», г. Донецк) и приняты к внедрению при проектировании и производстве шахтных КТП перспективных серий на ГП «Донецкий энергозавод».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки ДНР:

1. 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 нац. техн. ун-та. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4 (14). – С. 41–46.

2. 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 нац. техн. ун-та. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 4 (18). – С. 53–61.

3. 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 нац. техн. ун-та. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 3(17). – С. 69–77.

4. 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.

5. 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.

- в других изданиях:

6. 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 // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк: ООО «Типография Восток Пресс», 2017. – №1(52). – С. 14–24.

7. 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// Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ / Под общей редакцией академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – С. 236–242.

- в материалах научных конференций:

8. **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.

9. **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: Изд-во Южного федерального университета, 2019. – т. 2. – С. 142–147.

10. **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.

В публикациях, написанных в соавторстве, личный вклад Золотарева Е.В. заключается в следующем: [1] – расчёт процесса конвективного теплообмена внутри оболочки рудничной КТП и сравнительный анализ результатов с данными экспериментальных тепловых исследований; [2, 3, 4] – разработка схемы стенда, программы и методики исследований, анализ и систематизация результатов; [5] – разработка компьютерной модели и практическое моделирование процессов коммутации в системе «ВКА – трансформатор», обработка и систематизация полученных расчётных и экспериментальных данных; [6] – разработка функциональных схем КТП, обоснование концепции высоковольтной, низковольтной и резервной защит КТП; [7] – формулировка и обоснование концепции возможности питания двух и более рудничных КТП различной мощности от одной высоковольтной ячейки; [8] – разработка

концепции использования автотрансформатора в системе питания привода очистного комбайна; [10] – разработка принципов функционирования системы автоматического ограничения перенапряжений в структуре рудничной КТП, проведение экспериментов и обработка результатов.

АННОТАЦИЯ

Золотарев Е.В. Обоснование структуры и алгоритмов функционирования технических средств управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки). – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2020.

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» и получены новые научные результаты.

Исследованы процессы в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции, и выявлены факторы воздействия на амплитуду и эффективность применяемых средств ограничения коммутационных перенапряжений. Методами математического и компьютерного моделирования, а также экспериментами на натурных образцах обоснована возможность эффективного подавления коммутационных перенапряжений в комплексе «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой трансформаторной подстанции, посредством управляемой коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора.

Разработаны структура и алгоритм функционирования технических средств подавления перенапряжений при эксплуатации комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор» шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции на основе применения управляемой коммутации активных и активно-реактивных элементов шунтирования обмоток трансформатора, что позволило обеспечить безаварийную эксплуатацию усовершенствованной структуры шахтной участковой трансформаторной подстанции и, в связи с этим, создать предпосылки совершенствования системы электроснабжения шахты в целом и

расширить функциональные возможности структурных элементов шахтного участкового электротехнического комплекса.

Ключевые слова: шахта, электротехнический комплекс, трансформаторная подстанция, комплекс «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор», коммутационные перенапряжения, исследование, эксперимент, средства ограничения, автоматическое управление, техническая реализация.

ABSTRACT

Zolotarev Ye. V. Substantiation of the structure and algorithms of functioning of technical means for controlling the process of overvoltage suppression in the transformer substation of the mine section. – Manuscript.

Ph.D. (Candidate's) Thesis in Engineering Science by speciality 05.13.06 – Automation and control of technological processes and industries (by industry) (engineering science). - DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY, Donetsk, 2020.

In dissertation the actual scientific and technical task of providing of the accident-free functioning of the "high-voltage switching device – transformer" system, is decided of transformer substation of mine section on the basis of scientific ground and practical realization of structure and algorithms of technical equipments of management by the process of suppression overstrains and new scientific results were obtained.

The processes in the "high-voltage switching device - transformer" system of the mine section transformer substation are investigated, and factors influencing the amplitude and efficiency of the applied means of limiting switching overvoltages are revealed. Methods of mathematical and computer modeling, as well as experiments on full-scale samples, substantiated the possibility of effective suppression of switching overvoltages in the "high-voltage switching device - transformer" system of a mine section transformer substation, on the use of controlled switching of active and active-reactive elements for shunting transformer windings.

The structure and algorithm for the functioning of technical means for suppressing overvoltages during the operation of the "high-voltage switching device - transformer" system of a mine section complete transformer substation have been developed based on the use of controlled switching of active and active-reactive elements for shunting the transformer windings. This made it possible to ensure the trouble-free operation of the improved structure of the mine sectional transformer substation and, in this regard, to create the prerequisites for improving the mine power supply system as a whole and to expand the functional capabilities of the structural elements of the mine section electrical complex.

Keywords: mine, electrotechnical complex, transformer substation, "high-voltage switching device – transformer" system, switching overvoltages, research, experiment, means of limiting, automatic control, technical implementation.