

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

На правах рукописи

Маренич Ольга Константиновна

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ, АЛГОРИТМОВ И СТРУКТУРЫ
ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫМИ
ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 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 – 2019

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

Научный руководитель: кандидат технических наук
Ковалёва Инна Владимировна,
ГОУВПО «ДОННТУ»,
доцент кафедры «Горная электротехника
и автоматика им. Р.М. Лейбова»

Официальные оппоненты: **Белозеров Валерий Владимирович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУВО «Донской государственной
технической университет» (г. Ростов-на-Дону),
профессор кафедры «Автоматизация
производственных процессов»

Шевцов Дмитрий Валерьевич
кандидат технических наук, доцент
ГОУВПО «ДОННУ»,
заведующий кафедрой «Прикладная математика
и системы управления»

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

Защита состоится «17» марта 2020 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 в ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovnet@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 « » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук

 Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электротехнические комплексы шахт (ЭТК) обеспечивают электроэнергией технологическое оборудование. Нестационарность последнего обуславливает необходимость применения гибких кабелей, которые, ввиду отсутствия механической защиты, являются наиболее часто повреждаемым объектом. Возникающие при этом короткие замыкания (к.з.) сопровождаются высокими токами и создают мощные дугообразования в контактных группах автоматических выключателей (АВ) в процессе отключения.

Тенденция к повышению мощности установок обуславливает применение электросетей более высокого уровня напряжения (1140 В) и увеличение мощности междуфазного к.з. Применяемые низковольтные АВ серии 37ХХ зарекомендовали себя как эффективные коммутационные устройства в сети напряжения 660 В. Однако выявлена повторяющаяся повреждаемость этих АВ в сети напряжения 1140 В при отключении к.з., что обуславливает актуальность применения дополнительных устройств ограничения энергетических параметров этого процесса.

Повышение мощности установок участка шахты позволило увеличить протяжённость очистных забоев и применять асинхронные двигатели (АД) высокой мощности на значительном удалении от трансформаторных подстанций (ТП). Возникающие значительные потери напряжения в сети питания этих АД создают неблагоприятные условия их эксплуатации.

В связи с этим, актуальна задача автоматической стабилизации напряжения питания удалённого АД, которая может быть решена путём управления коммутационным процессом в структуре ТП.

Степень разработанности темы. Структура и функции шахтных ЭТК являются воплощением результатов исследований С.А. Волотковского, Г.Г. Пивняка, Ф.П. Шкрабца, Я.С. Римана и др. Применительно к эксплуатации систем электроснабжения участков шахт Р.М. Лейбовым, В.С. Дзюбаном, Е.А. Вареником, В.Н. Савицким и др. решена задача защиты человека от электропоражения. В комплексе автоматическое защитное отключение ЭТК участка шахты обосновано В.П. Колосюком. Существенный вклад в развитие автоматизации горно-технологических процессов внесли исследования В.И. Грубы, П. Д. Гаврилова, Ю.В. Шевырёва, коллективов ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», ГУ «НИИВЭ» (г. Донецк), Макеевского НИИ по безопасности работ в горной промышленности. Исследования касались совершенствования технологических процессов горного предприятия. Они не связаны с управлением коммутационными процессами в контексте обеспечения безаварийности применения низковольтных АВ в сетях напряжения 1140 В и повышения эффективности эксплуатации АД, удалённых от ТП.

Цель и задачи исследования. Цель работы – повышение эффективности эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов на основе

научного обоснования и практической реализации методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами в силовой цепи трансформатора комплектной подстанции участка шахты при отключении коротких замыканий и стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения.

Задачи исследований:

- анализ проблемных вопросов эксплуатации ЭТК участка шахты, обусловленных увеличением энергетических параметров процесса отключения к.з. в сети напряжения 1140 В и потерями напряжения в сети электропитания АД, удалённого от ТП;

- исследование свойств коммутационного дугообразования в отношении металлизации элементов конструкции АВ и обоснование способа ограничения энергетических параметров дуги на основе управления процессом коммутации;

- обоснование способа стабилизации напряжения питания АД, удалённого от ТП, на основе автоматического управления процессами коммутации цепей вторичных обмоток трансформатора ТП;

- разработка стендов, программ, методики и выполнение экспериментальных исследований процессов в элементах ЭТК, обусловленных управляемой коммутацией силовых цепей применительно к ускорению отключения к.з, а также при стабилизации величины напряжения электропитания потребителя в сети с высокими потерями напряжения;

- разработка устройств автоматизации управления коммутационными процессами в шахтной участковой электросети при ускорении отключения к.з. и стабилизации напряжения питания потребителя в сети с высокими потерями напряжения;

Объект исследования. Объектом исследования является процессы в системе электроснабжения участка шахты, обусловленные междуфазными к.з. в силовых присоединениях и токовыми нагрузками в сети электропитания удалённых потребителей высокой мощности.

Предмет исследования. Предметом исследования являются принципы построения и алгоритмы работы устройств управления коммутационными процессами электротехнического комплекса участка шахты.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Получила развитие математическая модель коммутационного плазмообразования в процессе горения сильноточной электрической дуги, отличающаяся наличием функциональной зависимости сечения плазмы от продолжительности плазмообразования, учётом продолжительности нагрева поверхностей плазмообразующих контактов автоматического выключателя и параметров расширения ствола плазмы дуги в придиафрагменных областях, что позволило обосновать целесообразность и параметры управления коммутационным процессом отключения короткого замыкания, в соответствии

с критерием опережения металлизации диэлектрических элементов конструкции автоматического выключателя;

2. Обоснован способ стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные потери напряжения, который состоит в автоматическом управлении коммутацией вторичных обмоток трансформатора питающей подстанции, обосновано применение одноконтурной системы автоматического управления процессом на основе сопоставления с заданным параметром разности фактического напряжения трансформатора и вычисленных потерь напряжения в сети, определена структура исполнительного коммутационного устройства и принципы формирования управляющей функции в вариантах фазового и импульсного воздействия на коммутационный процесс, установлена функциональная связь величины напряжения трансформатора и параметров управления коммутационным процессом.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии закономерностей воздействия плазмы электрической дуги на элементы конструкции автоматического выключателя, сопровождаемого их металлизацией, в процессе коммутации силовоточной электрической цепи переменного тока; обосновании параметров и способа управления ускорением коммутационного процесса и методов адаптации коммутационной функции применительно к решению задачи автоматической стабилизации напряжения питания электропотребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения.

Практическое значение результатов исследований состоит:

- в обосновании способов и устройств управления коммутацией схемы соединений вторичной обмотки трансформатора ТП участка шахты в качестве технических средств: ограничения энергетических параметров коммутационного дугообразования при отключении к.з.; стабилизации напряжения питания потребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения;

- в обеспечении возможности эксплуатации низковольтного АВ в структуре ТП, в сети напряжения 1140 В, на основе управления коммутацией обмоток её трансформатора как средства ускорения отключения тока к.з.;

- в создании технических средств автоматической стабилизации напряжения питания потребителя участка шахты в сети с высоким уровнем потерь напряжения на основе управления процессом коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием: теории электрических цепей; теории плазмообразования в электрической дуге; теории переходных процессов; теории эксперимента; включая проведение натуральных экспериментов, теории автоматического управления процессами и объектами, методов систематизации,

математического моделирования, гармонического анализа; цифровых измерительных устройств.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что металлизация диэлектрических элементов корпуса низковольтного АВ шахтной ТП в процессе отключения к.з. в сети напряжения 1140 В является следствием коммутационного дугообразования, сопровождаемого расширением столба плазмы в придиафрагменных областях, образуемых формой окна дугогасительной камеры. Энергетические параметры дуги имеют тенденцию линейного увеличения до установившегося уровня на интервале времени до 15 мс, что свидетельствует о недостаточности токоограничительных свойств применяемой максимальной токовой защиты (МТЗ), время срабатывания которой достигает $80 \div 100$ мс, и целесообразности ускорения отключения к.з. Достаточными функциональными свойствами обладает схема коммутации предохранителем выхода выпрямителя, объединяющего вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную цепь.

2. Разработан способ стабилизации напряжения питания потребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения на основе применения коммутатора трёхфазной цепи вторичных обмоток трансформатора ТП, функционирующего в режиме фазового управления, либо импульсной коммутации, и управляемого в автоматическом режиме. Установлено, что система автоматического управления (САУ) может быть построена по одноконтурной схеме на основе использования в качестве элемента сопоставляемого параметра величины потерь напряжения в кабельной сети потребителя, вычисленной с учётом величины тока и вводимых параметров используемых кабелей.

3. Установлено, что условием, препятствующим влиянию обратной ЭДС АД на параметры полупроводниковых элементов устройства управляемой коммутации является его подключение к вторичным обмоткам трансформатора со стороны, противоположной к цепи подключения АД. В случае импульсной коммутации частота импульсов отключения проводимости этих обмоток должна составлять $6n$ от частоты сети, а их скважность – определяться параметром, поступающим от САУ.

Результаты диссертационного исследования приняты ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ», г. Донецк) к использованию в профильных научно-исследовательских работах. Эти результаты внедрены в учебный процесс в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

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.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами математического моделирования и натурных экспериментов при решения обоснованных 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 XVII и XIX Международных научно-технических конференциях аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, ДОННТУ, 2017 г., 2019 г.), XIX Международной молодёжной научной конференции «Севергеозкотех - 2018» (Ухта, УГТУ, 2018 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»; Международном научно-практическом форуме «Россия в XXI веке: глобальные вызовы, риски и решения» (Донецк, ДОННТУ - Москва, РАН, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика» (Донецк, ДОННТУ, 2019 г.), XVII Всероссийской конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (Таганрог, ЮФУ, 2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них, 6 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 5 – в материалах конференций; 1 патент Украины на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста и состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы и 3 приложений. Работа иллюстрирована 65 рисунками, содержит 2 таблицы. Список литературы включает 97 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 устройства и функционирования ЭТК участков шахты, включая ТП, средства защиты от аварийных состояний. Особое внимание уделено анализу причин повреждаемости низковольтного АВ в составе ТП при отключении к.з. в сети напряжения 1140 В. Выполнен анализ в контексте выявления элементов, способствующих созданию в АВ междуфазной проводимости при отключении к.з. Обоснован вывод о металлизации как результате коммутационного дугообразования, и факторе, приводящем к появлению междуфазной проводимости в АВ. На основании обзора способов токоограничения к.з. сделан вывод об актуальности исследований, в области способов ускорения коммутации при отключении к.з.

В контексте автоматической стабилизации напряжения питания потребителей в сети с высокими потерями напряжения определена возможность применения автоматически управляемых полупроводниковых коммутаторов в структуре ТП.

Второй раздел посвящён исследованию процессов, приводящих к металлизации элементов АВ. Выполнен обзор методов моделирования дуги при коммутации сильноточной электрической цепи и рассмотрено коммутационное дугообразование как фактор плазменной металлизации внутренних поверхностей корпуса АВ. Сделан вывод о зависимости энергетических параметров процесса, в частности, постоянной времени τ дуги от её тока и радиуса. В качестве исходных положений приняты: зависимость энергии, поступающей в дугу от проводимости последней и напряжения дуги: $P_{\text{дуг.}} = qu^2$; зависимость термически стойкого сечения S_T струи металла в дуге от величины её тока I и времени нагрева t_n : $S_T \approx I \cdot \text{sqr}(t_n)$ и др., которые составляют математическое описание коммутационного дугообразования для установления условий плавления поверхностей контактов АВ при разрыве цепи к.з. и для определения геометрических параметров газа, насыщенного парами металла.

Учтён эффект расширения плазмы в придиафрагменных областях, и на основании анализа формы диаграмм придиафрагменного расширения плазмы, представленных в разработках по теории дугообразования, определена зависимость расширения радиуса плазмы r_{nl} дуги в придиафрагменной области от диаметра d диафрагмы:

$$r_{nl} = 7 - 0,4375d + (d/2). \quad (1)$$

Расширение плазмы дуги подтверждено в конструкции АВ типа А3792, т.к. форма окна дугогасительной камеры, в которой образуется щель, шириной

1 мм в процессе перемещения контакта, создаёт эффект диафрагмы, что приводит к расширению тела дуги в придиафрагменной области и металлизации последней (Рисунок 1). Плазмообразование наступает с задержкой на разогрев поверхности контактов, её плавление, испарение. В результате анализа графиков энергетических параметров дугообразования в электрической цепи установлена зависимость изменения диаметра D столба дуги от продолжительности дугообразования на интервале переходного процесса (в диапазоне $2 \text{ мс} \leq t_k \leq 15 \text{ мс}$) в предположении, что начальный момент $D=2r_k$; r_k – радиус канала дуги а t_k принимается в секундах:

$$D \approx r_k (2 + 1.1(t_k \cdot 10^3 - 2) / 6,4), \quad (2)$$

Выражения (1) и (2), а также исходный математический аппарат и учёт зависимости температуры T на поверхности электрода от плотности энергии W и времени $t_{\text{дуг.}}$ дугообразования достаточны для выполнения расчётов в диапазоне токов к.з. в ЭТК участка шахты, согласно которым сделаны выводы:

- параметр быстрого действия МТЗ (БЗУ-ТП) и время срабатывания АВ типа А3792 (80 мс - 100 мс) не препятствуют достижению коммутационной плазмой установившихся значений;

- противодействовать плазмообразованию возможно при ограничении продолжительности дуги. Это препятствует разогреву поверхности контактов и ограничивает диаметр D столба дуги. При продолжительности дуги менее 10 мс параметр D может быть не более половины установившегося значения.



Рисунок 1 – Дугогасительная камера АВ типа А 3792 как объект диафрагмирования коммутационной электрической дуги:

а – взаиморасположение силового контакта (ширина 26,1 мм) и дугогасительной камеры; *б* – дугогасительная камера со следами придиафрагменного плазмообразования

Для ограничения времени дугообразования в АВ предложена схема коммутации предохранителем выхода выпрямителя, объединяющего вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную цепь (Рисунок 2а). Изобретение

защищено патентом Украины. Вместо предохранителя может быть применён нормально включенный контактор КМ, управляемый МТЗ. Ограничение тока и перенапряжений возможно включением резистора к выходу выпрямителя.

Третий раздел посвящён обоснованию технических решений в области автоматического управления процессом стабилизации напряжения питания удалённого потребителя на основе регулируемой коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП. Для этого в схеме (Рисунок 2а) может быть применён управляемый выпрямитель VS1-VS6 (Рисунок 2б), либо коммутатор VT1 цепи обмоток трансформатора (Рисунок 2в). Их фазные напряжения должны составлять не менее 1.05 от номинального напряжения сети и регулироваться на уменьшение.

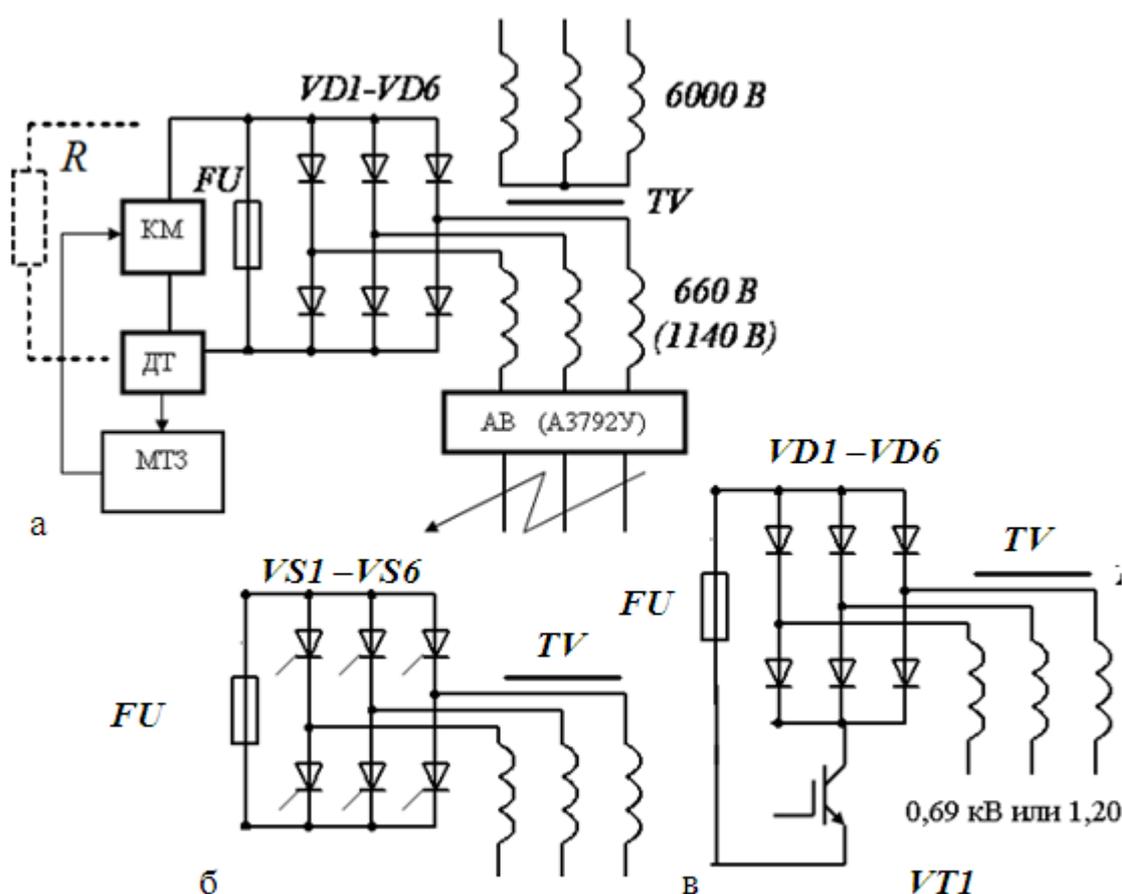


Рисунок 2 – Схема управления процессом коммутации обмоток трансформатора ТП при отключении к.з. автоматическим выключателем (а) и варианты её адаптации к функции фазового (б) и импульсного (в) регулирования напряжения вторичных обмоток трансформатора TV

Автоматизация процесса реализована одноконтурной САУ (Рисунок 3), на основе использования в качестве сопоставляемого параметра вычисленного напряжения, подводимого к АД потребителя, путём вычитания от напряжения

выхода трансформатора ТП расчётного значения потери напряжения в кабелях ($\Delta U_{МК}$ и $\Delta U_{ЗК}$) в номинальном, либо пусковом режимах АД.

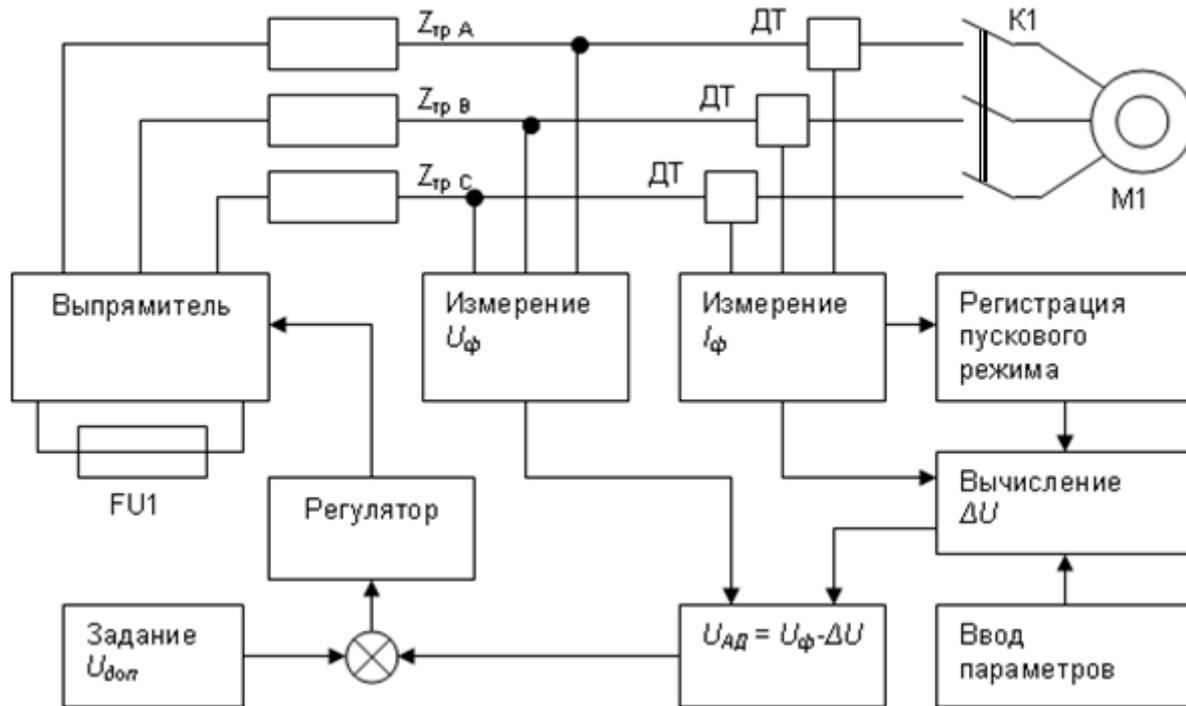


Рисунок 3 – Функциональная схема устройства автоматического управления стабилизацией напряжения питания удалённого потребителя на основе применения управляемой коммутации обмоток трансформатора ТП

В номинальном режиме работы потери напряжения в магистральном и гибком кабелях (электропитания АД) определяются из выражений:

$$\Delta U_{МК} = \sqrt{3} \cdot I_{МК} \cdot [r_{МК} \cdot \cos \varphi_{СВ} + x_{МК} \cdot \sin \varphi_{СВ}], \quad (3)$$

$$\Delta U_{ЗК} = \sqrt{3} \cdot I_{ЗК} \cdot [r_{ЗК} \cdot \cos \varphi + x_{ЗК} \cdot \sin \varphi], \quad (4)$$

где $I_{МК}$; $I_{ЗК}$ – токи магистрального и гибкого кабелей.

В соответствии с необходимостью вычислительных операций в структуру САУ вводятся параметры (длина и сечение, определяющие величины сопротивлений) магистрального и гибкого кабелей, задействованных в электропитании АД, его номинальный коэффициент мощности, средневзвешенный коэффициент мощности $\cos \varphi_{СВ}$ потребителей участка. При пуске АД в параметре потерь напряжения в кабеле учитывается коэффициент мощности ($\cos \varphi = 0,5$). Контроль режима пуска АД предусмотрен по величине тока $I > I_{он}$. Процесс иллюстрируется блок-схемой алгоритма (Рисунок 4). Приемлемые величины минимального напряжения на АД в номинальном

режиме и при пуске ($U_{дон1}$ и $U_{дон2}$) составляют, соответственно, 0,9 и 0,8 от номинального значения.

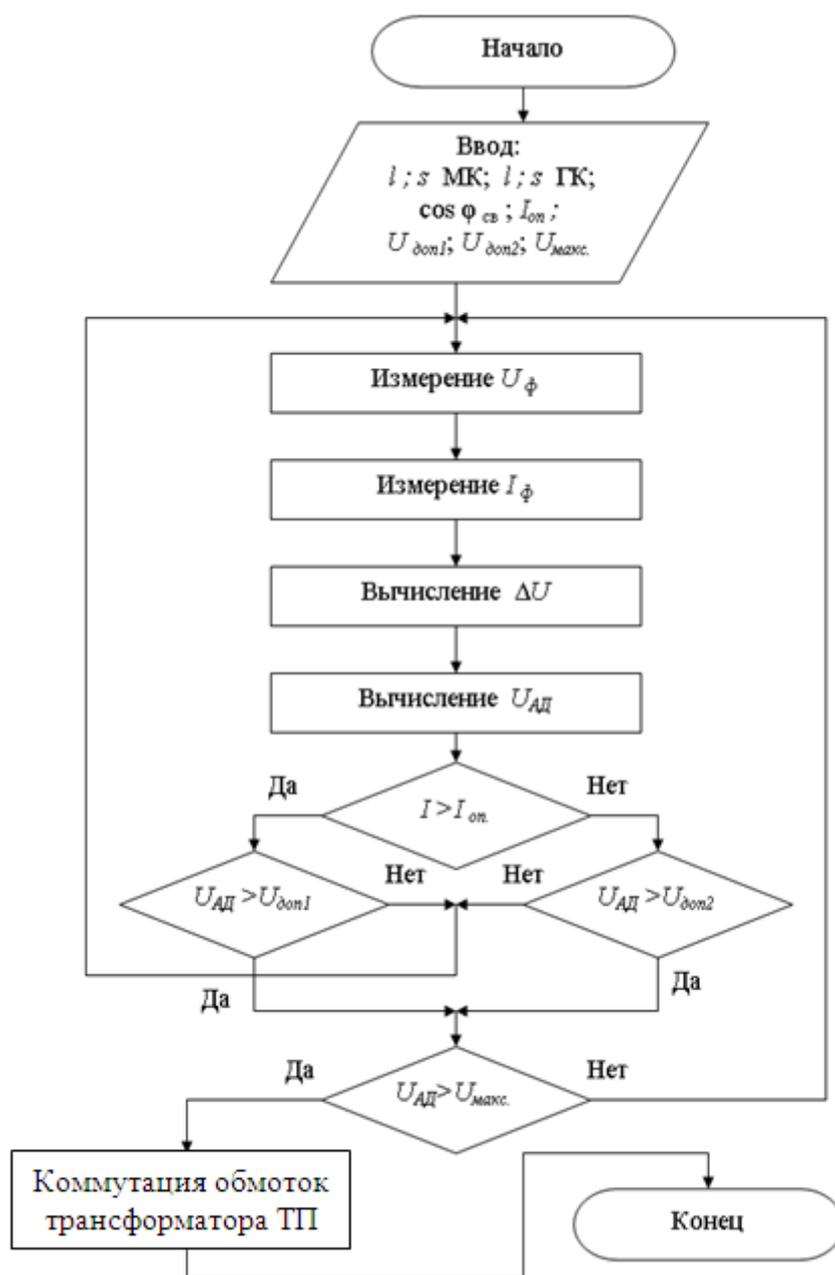


Рисунок 4 – Алгоритм процесса стабилизации величины напряжения питания потребителя в сети с высоким уровнем потерь напряжения средствами коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП

На основании сравнения заданного и фактического параметров формируется управляющее воздействие в отношении угла отпирания тиристоры выпрямителя, либо скважности импульсов коммутации обмоток трансформатора. Идентичность форм напряжений фаз при импульсном регулировании выполняется, если будет приходиться одинаковое количество

импульсов коммутации на каждую комбинацию проводящих элементов VD1-VД6, т.е., отношение частоты коммутаций обмоток к частоте сети должно составлять: $f_k/f_c = 6n$ (Рисунок 5). Импульсы коммутации должны быть привязаны к напряжениям фаз (с диапазоном смещения (γ) первого импульса в полуволне не более 58 эл. град). При фазовом управлении и при импульсной коммутации обмоток трансформатора с частотой $f_k = 300$ Гц установлено превалирование 1-й, отсутствие 3-й гармоник в напряжениях, что согласуется с требованиями к электропитанию АД.

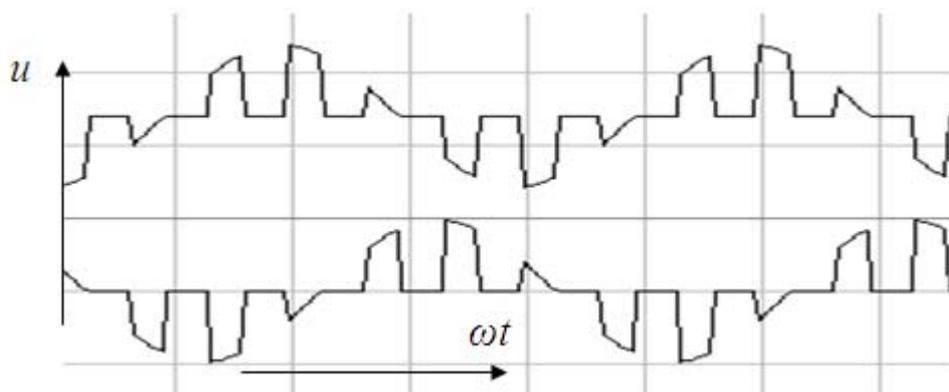


Рисунок 5 – Расчётные диаграммы форм напряжений двух фаз вторичной трёхфазной обмотки трансформатора ТП при импульсном регулировании их действующего значения, при работе на активную нагрузку: частота коммутации $f_k = 300$ Гц; скважность импульсов – 50%

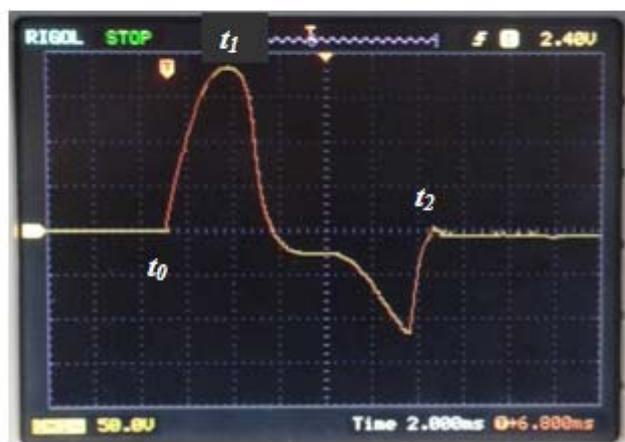
Четвёртый раздел посвящён постановке экспериментов в контексте решения задач исследования и анализу их результатов. Созданы исследовательские стенды, программы и методики исследований.

Применительно к экспериментам в области управления ускорением коммутации при отключении к.з. стенд содержит регулируемый в диапазоне от 0 до 20 кА источник тока, АВ (А3792), нагруженный цепью к.з., плавкие предохранители, устройство МТЗ (БЗУ-ТП), цифровой осциллограф.

Установлена возможность ускорения более чем в 10 раз, отключения к.з. при использовании плавкого предохранителя в качестве коммутационного устройства по сравнению со скоростью срабатывания средств МТЗ, применяемых в ТП. Иллюстрация реакции предохранителя на к.з. представлена на рисунке 6, откуда следует: продолжительность тока в сети от момента t_0 возникновения к.з. до начала t_1 защитной функции предохранителя – 1,5 мс; общая продолжительность ($t_0 - t_2$) тока – 5,9 мс; реакция на к.з. со стороны защит, применяемых в ТП на интервале $t_0 - t_2$ отсутствует. В связи с выявленным эффектом опережающего разрыва цепи к.з. следует возможность исключения дугообразования в контактных группах низковольтного АВ, что обеспечит его безаварийную работу в сети напряжения 1140 В.



а



б

Рисунок 6 – Фиксация процесса перегорания плавких элементов в цепи к.з. на выходе АВ за время ($t_1 - t_2$), меньше продолжительности реагирования на к.з. блока защиты БЗУ-ТП и расцепителей максимального тока АВ (а) и осциллограмма тока (б) в цепи к.з. (амплитуда тока 4292 А)

Применительно к реализации способа стабилизации напряжения питания потребителя (в условиях значительных потерь напряжения в питающем кабеле) проведены эксперименты относительно исследования фазового и импульсного способов управления устройствами коммутации (Рисунок 2б; Рисунок 2в).

Получена зависимость величины выходного напряжения трансформатора от углов отпирания тиристорov выпрямителя (Рисунок 2б) при фазовом управлении, а также диаграмма (Рисунок 7) зависимости интервалов времени Δt , отключения проводимости обмоток трансформатора от фазовых параметров γ передних фронтов импульсов частоты 300 Гц применительно к величинам формируемых напряжений в диапазоне $0,8 U_{\phi} \div 0,95 U_{\phi}$ (где U_{ϕ} напряжение фазы вторичной обмотки трансформатора).

Пятый раздел посвящён реализации результатов исследований. Разработаны варианты принципиальных схем исполнительных устройств регулируемой коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП на основе применения плавких предохранителей и отключаемых вакуумных контакторов.

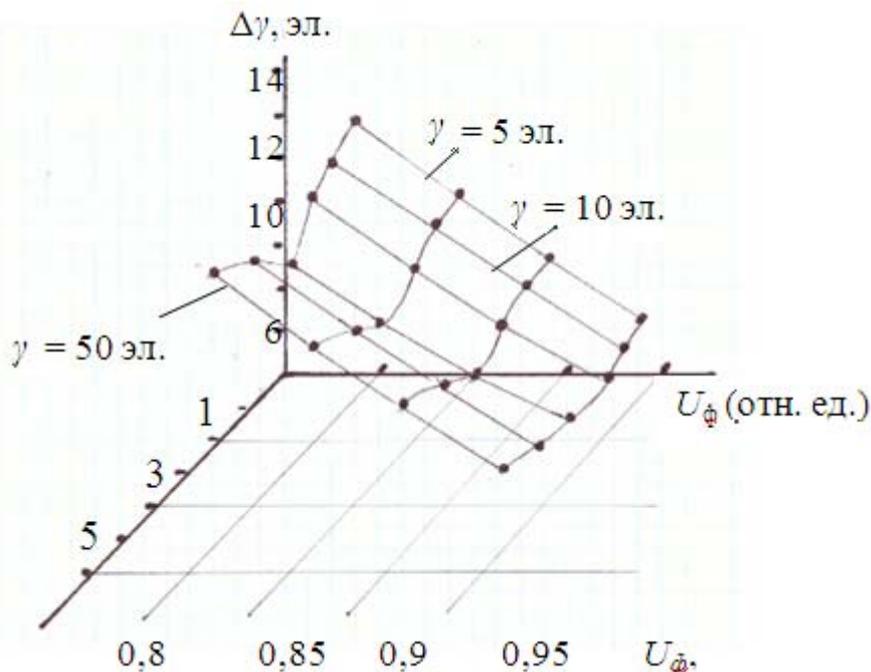


Рисунок 7 – Диаграмма зависимости интервалов $\Delta\gamma$, отключения проводимости обмоток трансформатора от фазовых параметров γ передних фронтов импульсов ($f_k = 300$ Гц) применительно к формируемым уровням напряжения

Применительно к использованию контактора в схеме (Рисунок 2а) разработано устройство выявления к.з. по скорости роста тока. Применительно к процессу стабилизации напряжения питания электропотребителя на основе импульсной коммутации обмоток трансформатора ТП разработан формирователь скважности импульсов коммутации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика эксплуатации электрооборудования участка шахты выявила критичность конструкции автоматического выключателя трансформаторной подстанции к процессу отключения к.з. в сети напряжения 1140 В. Ограничение энергетических параметров коммутационной дуги в АВ на уровне, недостаточном для металлизации элементов его конструкции позволит обеспечить эффективную, безаварийную эксплуатацию низковольтных автоматических выключателей в составе шахтных участковых трансформаторных подстанций в сетях напряжения 1140 В, исключить необходимость разработки, изготовления и применения специальных силовых высоковольтных коммутационных аппаратов, что имеет важное народно-хозяйственное значение.

Проблемным вопросом эксплуатации потребителей, удалённых от ТП, является недостаточный уровень напряжения из-за значительных его потерь в кабельной сети. В связи с этим и с учётом меняющихся режимов работы АД и

уровней нагрузки актуально создание САУ стабилизацией напряжения питания потребителя, удалённого от ТП, на уровне, близком к номинальному.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности эксплуатации шахтных участковых ЭТК на основе обоснования и реализации методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами в цепи трансформатора ТП участка при отключении к.з. и стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель коммутационного плазмообразования в процессе горения сильноточной электрической дуги, отличающаяся наличием функциональной зависимости сечения плазмы от продолжительности плазмообразования, учётом продолжительности нагрева поверхностей плазмообразующих силовых контактов АВ и параметров расширения ствола плазмы дуги в придиафрагменных областях.

2. Выявлены элементы конструкции АВ типа АЗ792, применяемого в шахтной участковой электрической сети напряжения 1140 В, создающие эффект диафрагмирования коммутационной электрической дуги и металлизации поверхности его функциональных узлов и деталей корпуса. Установлено, что продолжительность защитной функции автоматического выключателя и применяемых в ТП дополнительных средств максимальной токовой защиты позволяет энергетическим параметрам коммутационного дугообразования достичь установившихся (высоких) величин.

3. Обоснован принцип ограничения энергетических параметров дугообразования при отключении к.з. в сети напряжения 1140 В низковольтным АВ, который основан на применении управляемой коммутации выходных цепей выпрямителя, объединяющего вторичные обмотки трансформатора ТП в трёхфазную схему. Изобретение защищено патентом Украины.

4. Установлено, что быстрдействие обесточивания цепи к.з. при использовании предохранителя в схеме коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП может быть увеличено в 10 и более раз по сравнению со скоростью срабатывания применяемых в ТП средств защиты. Это создаёт эффект опережающего отключения по отношению к срабатыванию АВ ТП, либо синхронного с ним отключения. Сокращение времени дугообразования препятствует созданию энергетического импульса, достаточного для плазмообразования и металлизации прилегающих поверхностей.

5. Обоснован способ стабилизации напряжения питания электропотребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения, который состоит в автоматическом управлении коммутацией вторичных обмоток трансформатора ТП, разработан алгоритм и обосновано применение одноконтурной системы автоматического управления процессом

на основе сопоставления с заданным параметром разности фактического напряжения трансформатора ТП и вычисленных потерь напряжения в сети, определена структура исполнительного коммутационного устройства и принципы формирования управляющей функции в вариантах фазового и импульсного воздействия на коммутационный процесс, установлена функциональная связь величины выходного напряжения трансформатора ТП и параметров управления коммутационным процессом в вариантах фазового и импульсного управления коммутатором.

6. Установлено, что критерию идентичности форм фазных напряжений выхода трансформатора ТП при импульсной коммутации соответствует отношение частоты импульсов коммутации к частоте сети: $6n$ (где n – число натурального ряда). Условием противодействия влиянию обратных ЭДС АД потребителей на параметры коммутации вторичных обмоток трансформатора ТП является подключение полупроводниковых коммутаторов к обмоткам трансформатора со стороны, противоположной подключению силовых присоединений АД потребителей.

7. Результаты диссертационного исследования приняты ГУ «НИИВЭ» (г. Донецк) к использованию в профильных научно-исследовательских работах, внедрены в учебный процесс в ГОУВПО «ДОННТУ».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Маренич, О.К.** Элементы конструкции автоматического выключателя АЗ7ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2018. – Вып 4(14).- С. 47-52.

2. Ковалёва, И.В. Токоограничение цепи защитного отключения как инновационное решение в области повышения ресурса шахтной участковой трансформаторной подстанции / И.В. Ковалёва, **О.К. Маренич** // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып. 2(16). – С.95-101.

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. Золотарёв // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып. 3(17). – С. 69–77.

4. Ковалёва, И.В. Техническая реализация токоограничения цепи короткого замыкания в контексте применения вакуумных коммутаторов / И.В.

Ковалёва, **О.К. Маренич** // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2018.- Вып. 1(11). – С. 34-40.

5. **Маренич, О.К.** Повышение эффективности автоматической защиты от коротких замыканий средствами управляемой коммутации силовых цепей источника питания / О.К. Маренич // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта, Донецк: ДОНИЖТ, 2019. - Вып. 55.- С.11-19.

6. **Маренич, О.К.** Автоматическое управление коммутацией обмоток трансформатора как способ стабилизации напряжения питания удалённого электропотребителя шахтного технологического участка/ О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Информатика и кибернетика: Сборник научных трудов.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып. 3(17). – С. 7-14.

- в других изданиях:

7. **Маренич, О.К.** Анализ технических возможностей применения средств токоограничения в электросетях участка шахты / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сб. науч. тр. XVII Междун. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов, г. Донецк, 24-25 мая 2017 г. - Донецк, ДОННТУ. – 2017. – Режим доступа: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/handle/123456789/32070> . - Загл. с экрана.

8. Дубинка, Е.С. Новые технические решения в области повышения ресурса и безопасности эксплуатации электрооборудования технологического комплекса участка шахты / Е.С. Дубинка, **О.К. Маренич** // Актуальные эколого-политологические аспекты современности : научно-практическая конференция (в рамках междунар. науч.-практ. форума "Россия в 21 веке: глобальные вызовы, риски и решения", г. Донецк, 28 февр. - 4 апр. 2019 г.) : сб. науч. тр. конф.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- С 51-53.

9. **Маренич, О.К.** Контактёр SPVC как комбинированная система автоматического подавления энергетического потока цепи короткого замыкания /О.К. Маренич // Севергеозкотех-2018: XIX междунар. молодёжная науч. конф., 21-23 марта 2018 г.: материалы конф. – Ухта, УГТУ, 2019.-Ч1.- С 53-55.

10. **Маренич, О.К.** Токоограничение цепи защитного отключения как инновационное решение расширения области применения низковольтных автоматических выключателей / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Наука, техника, инновации: IX междунар. науч.- практ. конф., 25 апр. 2019 г., материалы конф.- Усинск, УФ УГТУ, 2019.- 5с.

11. **Маренич, О.К.** Автоматическое токоограничение процесса отключения цепи короткого замыкания – инновационное решение в области эксплуатации электротехнических комплексов / О.К. Маренич, И.В. Ковалёва // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: XIX междунар. науч.-техн. конф., 21-23 мая 2019 г., материалы конф.- Донецк, ДОННТУ, 2019.- С.152-158.

-патенты:

12. Пат. 102285 (UA), МПК (2013.01) H02H 3/00. Трифазный трансформатор напруги / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, **О.К. Маренич**. – № 2011 09048; заявл. 19.07.2011; опубл. 25.06.2013, Бюл. №12.

В публикациях, написанных в соавторстве, личный вклад Маренич О.К. заключается в следующем: [1] – анализ элементов конструкции АВ в контексте выявления причин возникновения внутреннего к.з.; [2; 7] – обоснование структуры и исследование компьютерной модели элементов ЭТК участка шахты; [3] – разработка схемы стенда, программы и методики экспериментов, анализ их результатов; [4; 9] – разработка схем функциональных узлов устройства; [6] – разработка схем, алгоритма работы устройства, анализ результатов экспериментов; [8] – обоснование способов и разработка вариантов схем устройств; [10; 11; 12] – обоснование и формулировка концепции ограничения энергетических параметров дугообразования при отключении силового присоединения ТП.

АННОТАЦИЯ

Маренич О.К. Обоснование методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами электротехнического комплекса 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, 2019.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности эксплуатации шахтных участков электротехнических комплексов на основе научного обоснования и практической реализации методов, алгоритмов и структуры технических устройств управления коммутационными процессами в силовой цепи трансформатора подстанции участка шахты при отключении коротких замыканий и стабилизации напряжения питания потребителя в сети, создающей значительные по величине потери напряжения и получены новые научные результаты.

Обоснована целесообразность применения, разработаны и исследованы устройства управляемой коммутации вторичных обмоток трансформатора участковой трансформаторной подстанции как средства ограничения энергетических параметров дугообразования в автоматическом выключателе при отключении короткого замыкания, а также как способа регулирования электрических параметров, формируемых трансформатором, в процессе автоматической стабилизации напряжения питания удалённого потребителя.

Разработаны структура и алгоритм системы автоматического управления процессом стабилизации напряжения на основе применения одноконтурной

схемы при использовании в качестве элемента сопоставляемого параметра величины потерь напряжения в кабельной сети потребителя, вычисленной с учётом величины его тока и вводимых параметров используемых кабелей.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, шахта, трансформаторная подстанция, автоматический выключатель, дугообразование, коммутационный процесс, электропотребитель, напряжение, стабилизация, автоматическое управление, исследование, эксперимент, анализ.

ABSTRACT

Marenich O.K. **Substantiation of methods, algorithms and structure of technical devices for controlling the switching processes of the electrical complex of 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). – STATE HIGHER EDUCATION ESTABLISHMENT «DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY», Donetsk, 2019.

In the dissertation, the urgent scientific and technical problem of increasing the efficiency of operation of mine precinct electrical complexes on the basis of scientific justification and practical implementation of the methods, algorithms and structure of technical devices for controlling switching processes in the power circuit of a transformer of a substation of a mine section when disconnecting short circuits and stabilization of the voltage supply of the electrical consumer in the network, which creates a significant voltage loss and new scientific results were obtained.

The appropriateness of the application is scientifically substantiated, options for controlled switching devices of the secondary windings of the transformer of the local transformer substation are developed as a means of limiting the energy parameters of arc formation in an automatic circuit breaker when a short circuit is disconnected, and also as a way of regulating the electrical parameters generated by the transformer, in the process of automatic stabilization of the supply voltage of a remote electrical consumer.

The structure and algorithm of a system for automatic control of the voltage stabilization process based on the use of a single-circuit scheme using the value of the voltage loss in the consumer cable network as an element of the comparable parameter, calculated taking into account its current and the input parameters of the cables used, have been developed.

Keywords: electrotechnical complex, mine, transformer substation, circuit breaker, arcing, switching process, electrical consumer, voltage, stabilization, automatic control, research, experiment, analysis.