Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Маренич Мария Константиновна

УДК 004.5622.25:621.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ БАЗЫ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА ШАХТЫ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Донецк – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. о. Донецк, г. Донецк.

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент **ГУЛЯЕВА Ирина Борисовна,** ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», доцент кафедры «Электрические системы»
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор **ШКЛЯРСКИЙ Ярослав Элиевич** ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург), заведующий кафедрой «Общая электротехника»
	кандидат технических наук **САЦЮК Александр Владимирович** ФГБОУ ВО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (г. Донецк), доцент кафедры «Автоматика и телемеханика, связь и вычислительная техника»
Ведущая организация:	Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В. А. Антипова» (г. Донецк)

Защита состоится «04» июня 2026 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.03 в ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», по адресу: 283001, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артёма, 58, I учебный корпус, ауд. 203.

Тел. факс: +7(856) 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ», по адресу: 283001, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артёма, 58, II учебный корпус и на сайте: http://donntu.ru

Автореферат разослан « »_____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.491.03
доктор технических наук, профессор А.О. Новиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эксплуатация системы электроснабжения (СЭС) участка шахты сопряжена с опасностью поражения персонала электрическим током. В целях обеспечения защиты от электропоражения предусмотрены:

– заземление металлических корпусов электрооборудования как средство защиты человека от электропоражения при касании к корпусу электроустановки, который оказался под потенциалом фазы;

– автоматическая защита от утечек тока на землю (средство защиты человека от электропоражения при его касании к фазному проводнику, находящемуся под напряжением).

СЭС участка шахты функционирует в режиме изолированной нейтрали трансформатора, а применяемые в её структуре кабели отличаются наличием экранов – слоёв проводящей резины, находящихся в контакте с центральными проводами (ЦП) и покрывающих изоляцию фазных проводов. При этом ЦП кабелей выполняют функцию заземляющих жил, осуществляя электрическое присоединение металлических корпусов перемещаемого электрооборудования к заземлённым корпусам пускателей, выполняющих функцию промежуточных проводников сети заземления.

Однако, при таком способе заземления корпусов перемещаемого электрооборудования ёмкости изоляции между фазными и заземлёнными ЦП кабелей существенно увеличивают общую ёмкостную проводимость изоляции (цепей «фаза-земля») – путь тока электропоражения человека, стоящего на земле, при его касании к фазному проводнику, находящемуся под напряжением.

Таким образом, несмотря на функционирование в режиме изолированной нейтрали трансформатора, применение заземления корпусов электроустановок, и средств защиты от утечек тока на землю, шахтная участковая электрическая сеть априори представляет опасность электропоражения человека, а функция защиты от утечек тока на землю сводится не к устранению электропоражающего фактора, а к ограничению количества электричества в теле человека в условиях действия электропоражающего фактора, обусловленного, в частности, компоновочными и техническими решениями при формировании структуры СЭС участка шахты.

Одним из путей решения этого технического противоречия является принципиальное изменение концепции формирования СЭС участка шахты, основанное на объединении в единую структуру средств автоматического защитного отключения при локализации в структурах асинхронных двигателей (АД) устройств выявления и подавления опасных состояний силовых электрических присоединений и исключении из эксплуатации технических средств, способных создавать высокие уровни проводимости цепей «фаза - земля». В этой связи тема диссертационного исследования является актуальной.

Степень разработанности темы. Обоснованные Р.М. Лейбовым концептуальные положения теории электробезопасности эксплуатации силового рудничного электрооборудования были развиты исследованиями и разработками В.Д. Кочеткова, В.С. Дзюбана, С.В. Прудникова, Е.А. Вареника, В.Н. Савицкого и др. Созданные ими средства защиты от утечек тока на землю обеспечивают автоматическое защитное отключение напряжения в СЭС участка шахты, сопровождаемое ограничением количества электричества в теле человека в случае его прикосновения к токоведущим элементам. В исследованиях В.П. Колосюка совокупность средств защиты рудничного электрооборудования от аварийных и опасных состояний представлена как единая система защитного отключения. В этой же плоскости лежат и исследования Б.В. Гуляева, где рассмотрена специфика влияния параметров надёжности структурных компонентов системы защитного отключения СЭС участка шахты на качество формирования и выполнения в ней защитных функций. Однако в данных исследованиях отсутствуют обоснования, касающиеся подавления электропоражающего фактора, обусловленного использованием ЦП кабелей в качестве заземляющих проводников. Научные обоснования целесообразности изменения концепции построения системы высоковольтного электроснабжения (СВЭ) горного предприятия на основе применения средств локализации токов утечки в подземной высоковольтной кабельной сети даны в работах А.М. Брюханова, О.А. Демченко, Л.А. Муфеля. Этим доказывается возможность внесения принципиальных изменений в саму концепцию построения СВЭ шахты. Аналогично этому, целесообразна и корректировка системы электроснабжения участка шахты на основе совершенствования методов и средств автоматического защитного отключения силовых присоединений, в контексте создания ограничительного эффекта применительно к формированию электропоражающего фактора.

Связь с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа является частью разработок, выполненных в ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» в рамках гостемы Н-2022-5 «Обоснование технических решений в области повышения безопасности эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов». Результаты диссертационного исследования приняты ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк) и ГБУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности (ГБУ «МакНИИ», г. Макеевка) к использованию в профильных научно-исследовательских работах. Эти результаты внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет».

Цель и задачи исследования. Цель работы – повышение эффективности функционирования системы электроснабжения участка шахты за счёт обоснования и практической реализации модифицированной алгоритмической

базы и технических средств управления процессами автоматического защитного отключения.

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

− анализ специфики функционирования СЭС участка шахты в контексте обеспечения защиты персонала от поражения электрическим током и проблемных вопросов в области обеспечения безопасности эксплуатации рудничного электрооборудования;

− обоснование концепции построения СЭС участка шахты на основе ограничения параметров электропоражающего фактора и совершенствования средств автоматического защитного отключения силовых присоединений;

− обоснование структуры и алгоритмов функционирования средств выявления контакта фазы с объектом контроля, управляющих автоматическим защитным отключением силовых присоединений шахтной участковой электрической сети;

− техническая реализация результатов исследования, включая стендовые испытания экспериментальных образцов, в контексте адаптации обоснованных технических решений к условиям эксплуатации в структурах силового рудничного электрооборудования и разработки рекомендаций по совершенствованию структуры комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений СЭС участка шахты.

Объект исследования. Объектом исследования являются процессы, происходящие в СЭС участка шахты, обусловленные электрической проводимостью изоляции фазных проводников.

Предмет исследования. Предметом исследования являются принципы построения и алгоритмы работы технических средств автоматического защитного отключения силовых присоединений СЭС участка шахты, действующих в условиях неприсоединения к заземлению металлических корпусов АД при локализации в их структуре устройств выявления опасных состояний.

Идея работы состоит в дооснащении комплекса средств автоматического защитного отключения СЭС участка шахты устройствами выявления контакта фазы с объектом контроля, управляющими защитным отключением силовых присоединений и локализуемыми в структурах АД и коммутационных аппаратов, что позволяет распространить функцию защитного отключения на состояния контакта фазы электрической сети с корпусом электроустановки, исключая при этом применение центральных проводов кабелей электропитания в качестве проводников заземления АД и снижая, тем самым, параметры электропоражающего фактора частичным устранением ёмкостной проводимости изоляции между фазами электрической сети и землёй.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием: основных положений электротехники, теории электрических цепей; методов систематизации, компьютерного моделирования, теории эксперимента; включая проведение натурных экспериментов, теории переходных процессов; теории автоматического управления процессами и объектами, методов

математического моделирования, использования цифровых измерительных устройств в условиях экспериментов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Обоснован способ определения допустимой области применения средств автоматического ограничения параметров электропоражающего фактора при эксплуатации шахтной участковой электрической сети, отличающаяся учётом возмущающих факторов, обусловленных величинами ёмкостной проводимости изоляции, варьированием частоты напряжения на силовом присоединении и фактической величины активного сопротивления цепи утечки на землю.

2. Впервые обоснована структура СЭС участка шахты, исключающая использование центральных проводов кабелей в качестве заземляющих проводников и частично подавляющая, тем самым, параметры электропоражающего фактора, обусловленного ёмкостными проводимостями изоляции сети, основанная на применении средств автоматического выявления контакта фазы сети с объектом контроля при их локализации в структурах АД и силовых коммутационных аппаратов, реализующих функцию управления автоматическим защитным отключением силовых присоединений; разработана структура локализуемого средства автоматического выявления контакта фазы сети с объектом контроля и алгоритм формирования функции защитного отключения силового присоединения.

3. Обоснован способ диагностирования – определения места повреждения экранированного кабеля, основанный на применении петлевого метода в условиях эксплуатации кабеля при неприсоединении к заземлению его центрального провода.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается:

− в раскрытии комплекса факторов повышения опасности эксплуатации СЭС участка шахты и ограничения области применения автоматической защиты от утечек тока на землю, обусловленных применением центральных проводов силовых кабелей в качестве проводников заземления корпусов АД;

− в обосновании параметров и способа управления автоматическим защитным отключением силовых присоединений при возникновении контакта фазы с их металлическими корпусами как условия технической реализации альтернативной концепции построения СЭС участка шахты, ограничивающей формирование электропоражающего фактора вследствие использования центральных проводов силовых кабелей в качестве проводников заземления металлических корпусов АД;

− в обосновании способа диагностирования – определения в автоматическом режиме места повреждения изоляции экранированного кабеля, основанного на применении петлевого метода при условии неприсоединении к заземлению его центрального провода.

Практическая ценность результатов исследований состоит в следующем:

− обоснование технических решений в контексте подавления электропоражающего фактора при эксплуатации СЭС участка шахты и

совершенствования средств автоматического защитного отключения её силовых присоединений;

− обоснование целесообразности и возможности технической реализации альтернативной концепции построения СЭС участка шахты, исключающей использование структурных компонентов кабелей в качестве элементов заземления электроустановок и содержащей комплекс средств автоматического защитного отключения при локализации их компонентов в структурах АД электропотребителей.

Устройство защитного отключения АД в случае контакта фазы с его металлическим корпусом, содержащее функциональные узлы, локализованные в структуре этого двигателя и его силового коммутационного аппарата при использовании центрального провода кабеля электропитания в качестве не присоединяемого к заземлению информационного канала, защищено патентом Российской Федерации на изобретение.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что существенным фактором, повышающим риск электропоражения человека в электрической сети участка шахты (вследствие роста количества электричества в теле человека $q > 50$ мА·с), создающим опасность искрения в контактных узлах элементов заземления (вследствие формирования токов в элементах заземления, превышающих искробезопасные параметры и имеющих линейную зависимость роста от ёмкости изоляции сети), ограничивающим область применения автоматической защиты от утечек тока на землю электрическими сетями с ёмкостью изоляции не более 1,0 мкФ/фазу, является эффект формирования дополнительной ёмкостной проводимости между фазами и землёй, обусловленный применением центральных проводов кабелей электропитания АД в качестве проводников заземления их металлических корпусов. Удельный вес ёмкости, образуемой между фазными и центральным проводами, в ёмкости изоляции кабелей марки КГЭШ между фазами сети и землёй составляет, в среднем 35,6%.

2. Вследствие наличия ёмкостной проводимости изоляции кабелей, в том числе, ёмкостной проводимости, формируемой вследствие присоединения к заземлению центральных проводов кабелей, область применения участковой автоматической защиты от утечек тока на землю в бóльшей степени ограничивается в комбинированных электрических сетях, при формировании в них напряжений, частота которых превышает величину промышленной частоты (f_c = 50 Гц).

Факторами, предопределяющими ошибочное выявление (и закорачивание на землю) в качестве повреждённой фазы при возникновении в СЭС участка шахты цепи утечки тока на землю являются величины: ёмкости изоляции сети; частоты напряжения сети; электрической проводимости цепи утечки тока на землю.

3. Установлено, что техническим решением в области повышения безопасности эксплуатации СЭС участка шахты и распространения её функциональности на технологическое оборудование повышенных уровней

мощности является отказ от применения центральных проводов кабелей электропитания в качестве проводников заземления металлических корпусов АД при дополнении комплекса средств автоматического защитного отключения устройствами выявления контакта фазы с объектом контроля, управляющими защитным отключением силовых присоединений и локализуемыми в структурах АД и силовых коммутационных аппаратов.

Соответствие паспорту специальности. По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), в частности: п. 2 «Автоматизация контроля и испытаний»; п. 5 «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами»; п. 14 «Теоретические основы и прикладные методы резервирования контуров управлении, повышения эффективности, надёжности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации»; п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается результатами компьютерного моделирования и натурных экспериментов при решении обоснованных задач, положительной оценкой на научных конференциях и семинарах, выполненными публикациями в рецензируемых сборниках научных трудов.

Апробация результатов диссертации Основные положения диссертации докладывались, обсуждались и одобрены на XXVIII, XXIX, XXX, XXXI Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, НИУ «МЭИ», 2022 г., 2023 г., 2024 г., 2025 г.), Международной научно-практической конференции «Регионы России в меняющемся мире: преемственность приоритетов и новые возможности» (Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2023 г.). XXII, XXIV Международных научно-технических конференциях аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, ДонНТУ, 2022 г., 2024 г.), IX Международной научно-технической конференции «Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем» (ФГБОУВО «ДонНТУ», Донецк, 2023 г.), заседании круглого стола по теме: «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах» (ГУ «МакНИИ», Макеевка, 2023 г.) в рамках IX Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»; заседании круглого стола по теме: «О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в горной промышленности» (ГБУ «НИИВЭ», Донецк, 2024 г.), XX Всероссийской конференции-конкурсе студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы

недропользования» под эгидой Международного центра компетенций ЮНЕСКО (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 2024 г.), III Международной научно-практической конференции «Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики» (ФГБОУ ВО «ДонГТУ», г. Алчевск, 2025г.).

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 и демонстрационных стендов, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 21 работе, в том числе: 3 – размещены в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утверждённый ВАК РФ (к-1 и к-2), из которых 2 по научной специальности; 7 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР; 10 – в материалах и тезисах научных конференций, 1 – в описании патента Российской Федерации на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 184 страницах машинописного текста и состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы и 1 приложения. Работа иллюстрирована 67 рисунками, содержит 11 таблиц. Список литературы включает 99 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.

Первый раздел посвящён анализу специфики формирования электропоражающего фактора в СЭС участка шахты вследствие использования ЦП кабелей в качестве проводников цепи заземления корпусов АД. Установлено, что применительно к кабелям марки КГЭШ ёмкость между фазными проводниками и подключенным к заземлению центральным проводом составляет, в среднем, 35,6% от общей ёмкости изоляции - параметра, обусловливающего величину тока и количества электричества в теле человека при его касании к фазному проводнику, находящемуся под напряжением. Установлено, что присоединение центральных проводов силовых кабелей к заземлениям, существенно увеличивая ёмкостные проводимости изоляции, априори обусловливает формирование токов в заземляющей сети участка шахты, превышающих искробезопасные параметры, определяемые ГОСТ 30852.10-2002; ГОСТ Р МЭК 60079-11 – 2010.

Из анализа защитных функций автокомпенсатора ёмкостного тока и короткозамыкателя на землю повреждённой фазы в структуре аппарата автоматической защиты от утечек тока на землю следует, что:

− способ автоматической компенсации ёмкостного тока цепи утечки, основанный на управлении величиной индуктивности компенсирующего дросселя и реализуемый в схемах аппаратов защиты от утечек тока на землю, позволяет снизить величину ёмкостного тока не более, чем на 60%, что не соответствует критерию эффективности для сетей линейного напряжения 1140 В;

− область применения способа выявления повреждённой фазы, основанного на сопоставлении разностей потенциалов между землёй и фазами сети и реализуемого схемами короткозамыкателей на землю повреждённой фазы (в аппаратах защиты от утечек тока на землю), ограничена величинами ёмкости изоляции сети, частоты напряжения сети, сопротивления цепи утечки на землю. Определены соотношения $R_{\text{утfix.}} = f(C_{из})$ при $f_c = 50$ Гц и $C_{из} = f(f_c)$ при $R_{\text{ут}} = 1{,}0$ кОм, которым соответствует равенство потенциалов между землёй и повреждённой, а также смежной с ней фазой:

$$R_{ут\,fix.} = 1 \;/\; \left(0{,}01 + 0{,}54\, C_{из}\right) \quad , \tag{1}$$

$$C_{из} = \left(9 / (2 + f_c / 25)\right) - 0{,}5 \quad . \tag{2}$$

Определены параметры СЭС участка шахты, характеризуемые увеличением ёмкости изоляции, когда при возникновении цепи утечки тока на землю в качестве повреждённой фазы будет выявлена и закорочена на землю смежная с ней фаза, что недопустимо.

Выполнен анализ специфики функционирования автоматического защитного отключения комбинированных шахтных участковых электрических сетей и степени влияния ёмкости изоляции на величину тока утечки на землю, в том числе, в структурных компонентах преобразователя частоты.

Обоснована целесообразность проведения исследований в области повышения эффективности обеспечения безопасных условий эксплуатации СЭС участка шахты на основе научного обоснования и практической реализации методов подавления электропоражающего фактора, обусловленного ёмкостью изоляции электрической сети и совершенствования средств автоматического защитного отключения силовых электрических присоединений при локализации их компонентов в структурах АД и коммутационного электрооборудования.

Во втором разделе на основании анализа аварийных состояний электрических машин сделан вывод о крайне низкой вероятности возникновения контакта фазы с корпусом АД в его рудничном исполнении. Этому способствуют многослойность изоляции обмоток статоров, применение изоляционных материалов с высокими классами нагревостойкости, специфика конструкции и размещения силовых проходных контактов, применение средств фиксации кабелей в отсеках кабельных вводов, а также средств защиты от токовых перегрузок электрических машин. Таким образом, маловероятное состояние

контакта фазы с корпусом АД непрерывно купируется заземлением этого корпуса присоединением к нему и заземлению ЦП кабеля электропитания, что формирует постоянно действующий и не устраняемый существующими техническими средствами фактор электропоражения человека, выраженный ёмкостными проводимостями изоляции электросети (между фазами и землёй) и усиливающийся по мере применения кабелей повышенных сечений и протяжённости.

Присоединение оголённого ЦП кабеля электропитания, к заземляющему зажиму в отсеке кабельного ввода рудничной электроустановки предполагает его расположение в непосредственной близости от силовых проходных контактов, находящихся под потенциалами фаз, что, с учётом отсутствия средств фиксации ЦП в пространстве данного отсека, повышает вероятность возникновения цепи контакта «фаза - корпус».

Обоснована целесообразность локализации контура заземления как способа повышения безопасности эксплуатации СЭС участка шахты. Для выявления контакта фазы с корпусом АД предложена схема последовательного присоединения конденсатора, диода и реагирующего органа между цепью обмоток статора АД и его металлическим корпусом, что представляет собой концепцию датчика «фаза-корпус», адаптируемого к размещению в структуре АД (Рисунок 1). При условии присоединения к фазам сети через трёхфазную цепь индуктивных, либо полупроводниковых компонентов, соединённую по схеме «звезда», данный датчик может быть применён для выявления контакта фазы с любым объектом контроля, в частности, в структуре АД при соединении обмоток статора в «треугольник», либо в структуре силового коммутационного аппарата для выявления контакта фазы с ЦП отходящего кабеля (при повреждении изоляции фазного проводника).

Установлено, что ЦП кабеля электропитания, будучи неприсоединённым к элементам заземления, может выполнять функцию компонента средства определения места повреждения кабельной изоляции. Действие разработанного устройства (Рисунок 2) основано на реализации петлевого метода, предусматривающего процедуру поочередного измерения и анализа величин токов в ветвях контролируемого объекта с последующим пересчётом результатов измерения на протяжённости кабельных присоединений. Алгоритм вычисления протяжённости L_1(% от общей длины) кабеля от пускателя до места повреждения изоляции фазного провода представлен на рисунке 3.

Обоснован способ управления коммутацией вторичной обмотки трансформатора участковой подстанции, предусматривающий ввод в процессе коммутации токоограничивающих резисторов как средство, повышающее ресурс коммутационного аппарата и снижение тока в объекте защиты на временно́м интервале отключения.

Разработана алгоритмическая база технической реализации автоматического защитного отключения силового присоединения средствами, локализуемыми в структурах АД и коммутационных аппаратов, а также алгоритмическая база реализации способа определения места повреждения кабеля

электропитания при использовании неприсоединяемого к заземлению ЦП кабеля в качестве проводника информационного сигнала.

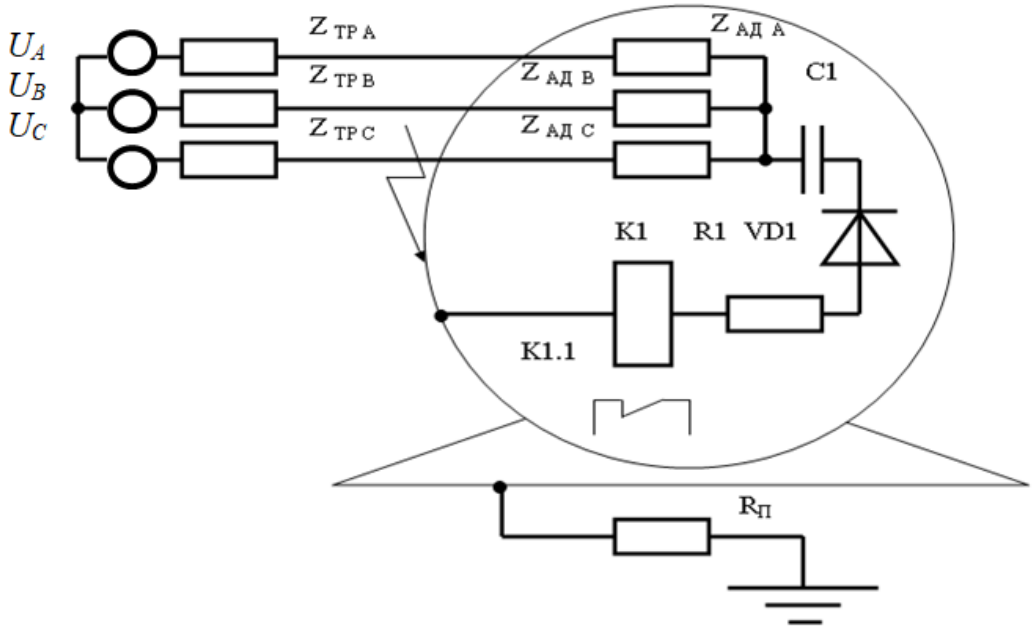


Рисунок 1 − Схема устройства выявления контакта фазы сети с корпусом асинхронного двигателя

Третий раздел посвящён обоснованию технических решений в части адаптации схемы пускателя к выполнению защитной функции при наличии управляющего воздействия от датчика контроля возникновения электрической цепи «фаза – корпус», локализуемого в структуре АД. Обобщённая схема устройства представлена на рисунке 4.

Установлены закономерности (представляющие собой логарифмические функции) изменения напряжения на реагирующем органе датчика контакта «фаза – корпус» в зависимости от параметров его активно-ёмкостных компонентов.

Исследованием процессов в многомашинном рудничном электротехническом комплексе установлены условия синхронного защитного отключения группы электропотребителей при возникновении цепи повышенной проводимости с фазы на корпус одного из них. Обоснованы технические решения (включая алгоритм функционирования) блокировки отключенного состояния коммутационного аппарата силового присоединения с возникшей цепью контакта «фаза – корпус».

Разработана демонстрационная версия (экспериментальный образец) устройства защитного отключения силового присоединения, адаптированная к функционированию в трёхфазной, и в однофазной сети. Экспериментом подтверждена её работоспособность.

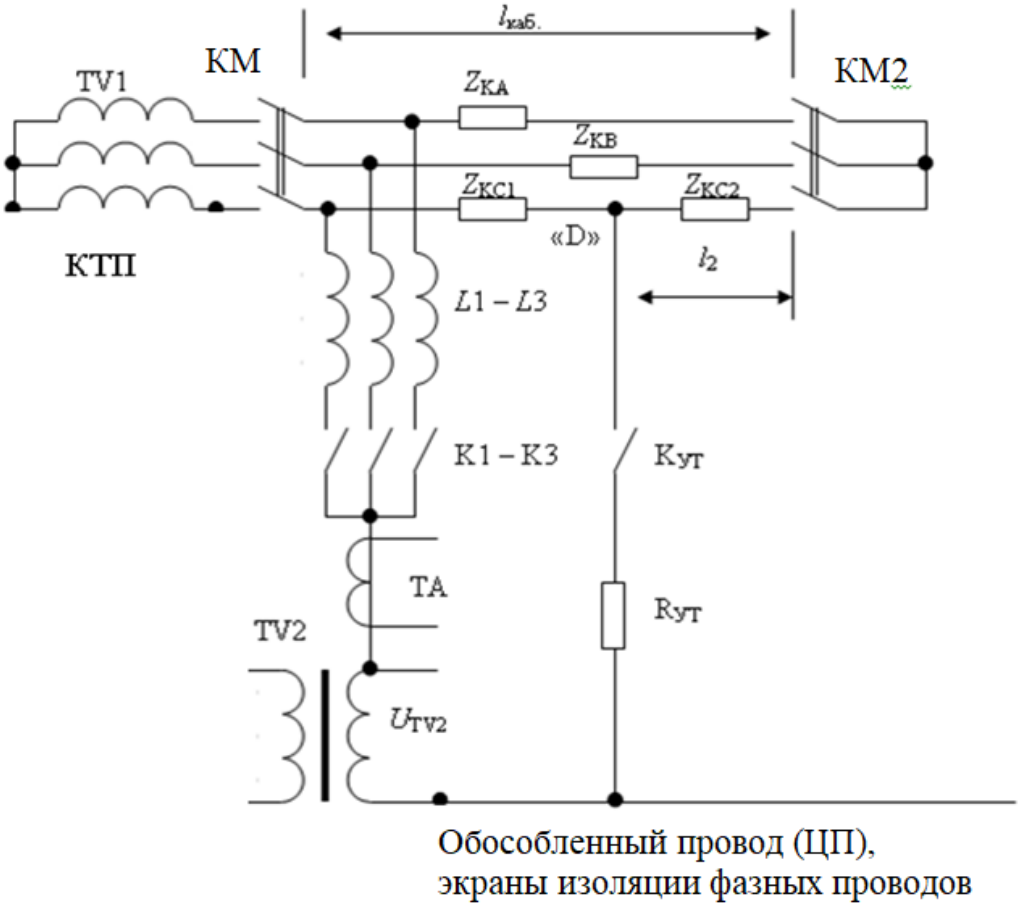


Рисунок 2– Схема, иллюстрирующая процесс контроля момента и выявления места повреждения изоляции шахтного гибкого экранированного кабеля

Синтезирована структура комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений при её оснащении устройствами выявления контакта фаз с объектами защиты, локализованными в объектах защиты и коммутационных аппаратах (Рисунок 5).

В четвёртом разделе уточнена структура и определены параметры функциональных элементов датчика контроля «фаза – корпус» с учётом его применения в силовых электроустановках участка шахты.

Установлены закономерности формирования импульсов напряжения на реагирующем органе датчика контакта «фаза - корпус» в зависимости от параметров компонентов его измерительной цепи (Рисунок 6) и определена её структура применительно к функционированию в СЭС участка шахты. Разработаны схемы присоединения устройств выявления контакта фазы с объектом контроля к узлам управления силовыми коммутационными аппаратами.

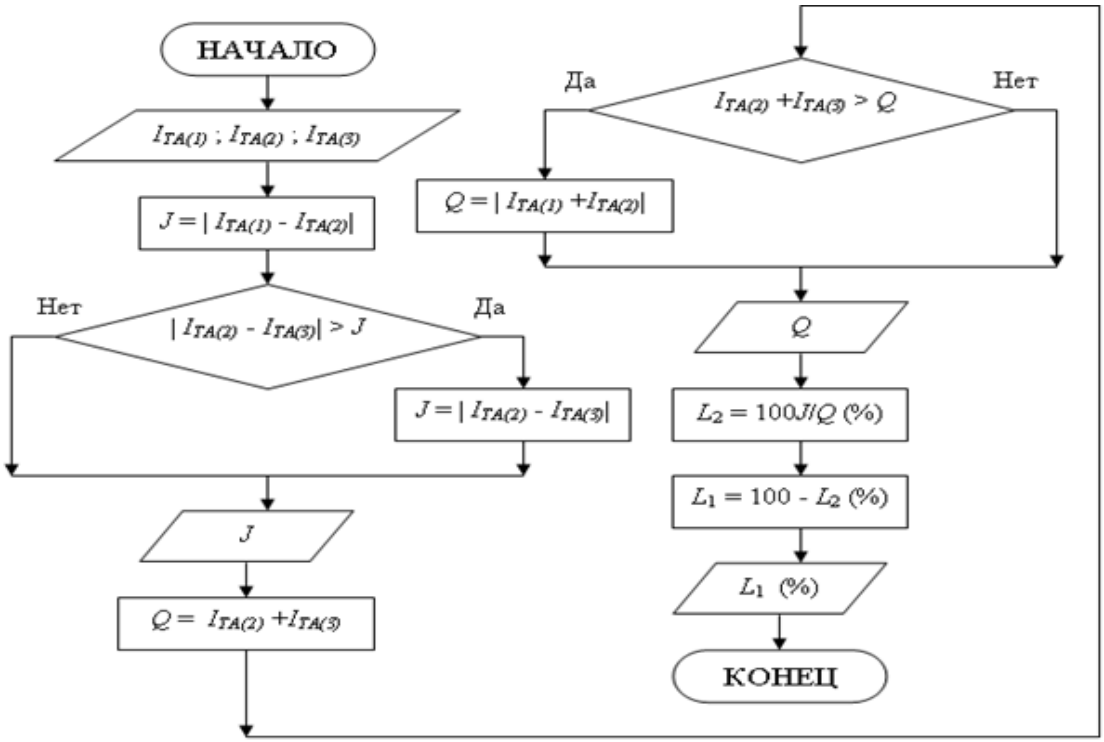


Рисунок 3 − Блок-схема алгоритма вычисления протяжённости L1 (% от общей длины) кабеля от пускателя до места повреждения изоляции фазного провода

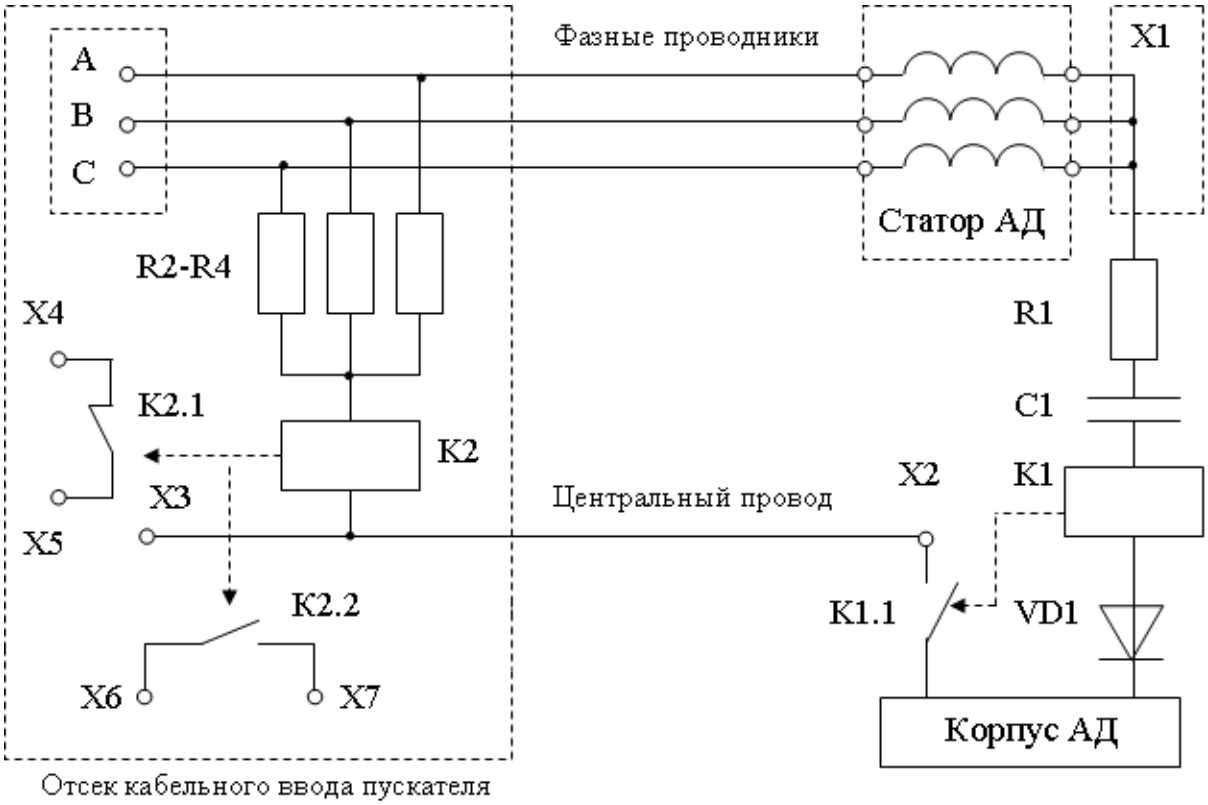


Рисунок 4 - Устройство защиты от повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя (патент № 2832720 Российской Федерации на изобретение)

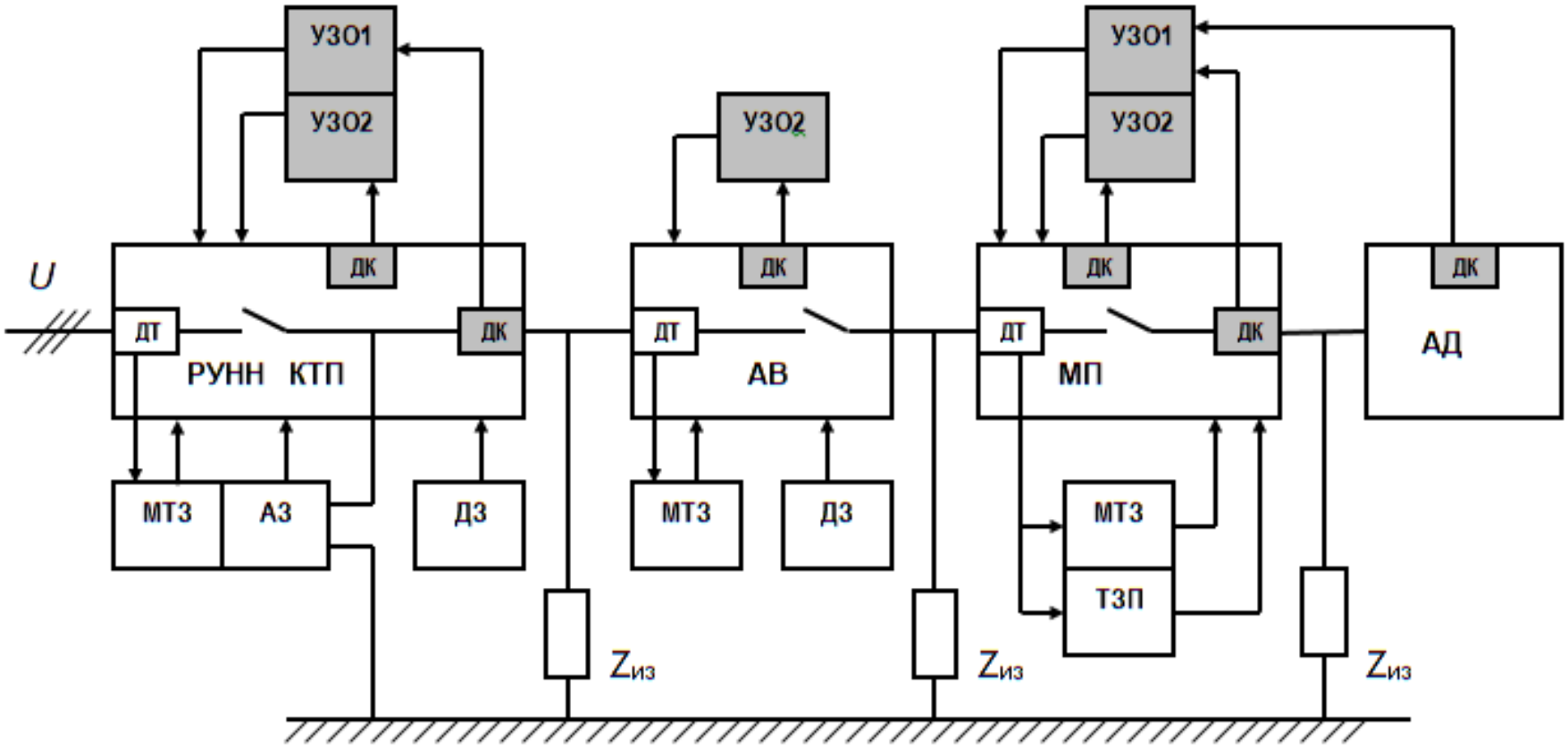
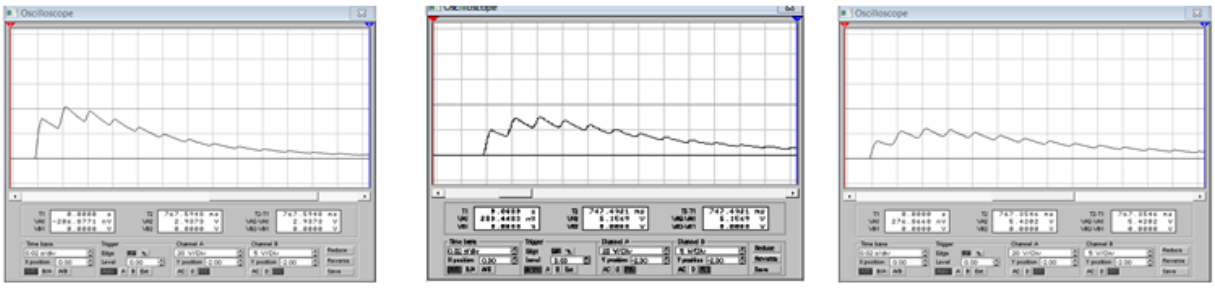


Рисунок 5 – Структура комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений электрической сети участка шахты: МТЗ - максимальная токовая защита; АЗ -автоматическая защита от утечек тока на землю; ТЗП - токовая защита от перегрузки АД; ДЗ - внешние дополнительные устройства защиты (при наличии); ДТ - датчик тока; ДК - датчик контакта фазы с объектом защиты; УЗО - устройство защитного отключения: 1 - при контакте фазы с ЦП кабеля; 2 - при контакте фазы с корпусом объекта



R1 = 100 Ом R1 = 200 Ом R1 = 300 Ом

Рисунок 6 – Осциллограммы напряжений на обмотке реле типа 90.3747-10 при моделировании процессов в сети линейного напряжения 660 В, формируемых при условии присоединения резистора R1 последовательно с обмоткой реле (реагирующего органа) и конденсатора C2 = 500 мкФ - параллельно этой обмотке; масштабы: 20 В / деление шкалы; 0,02 с / деление шкалы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности обеспечения безопасных условий эксплуатации СЭС участка шахты на основе научного обоснования и практической реализации методов подавления электропоражающего фактора и совершенствования средств автоматического защитного отключения силовых электрических присоединений при локализации их компонентов в структурах АД и коммутационного электрооборудования.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1) Установлено, что существенное влияние на уровень электропоражающего фактора в СЭС участка шахты оказывает ёмкость изоляции, образуемая между фазными проводниками кабелей и их центральными проводами при подключении последних к цепи заземления. При этом ток в цепи заземления может достигать уровней, превышающих предельно допустимые величины по критерию искробезопасности.

2) В условиях присоединения ЦП кабелей к заземлениям режим изолированной нейтрали трансформатора не является достаточным в контексте обеспечения электробезопасности эксплуатации СЭС участка шахты. Функции применяемой автоматической защиты человека от электропоражения сводятся не к устранению электропоражающего фактора, а к ускорению отделения от человека энергетического потока трансформаторной подстанции в условиях постоянно действующего электропоражающего фактора, созданного, в частности, присоединением к заземлению ЦП кабелей.

3) Установлен эффект неполной (менее 2/3) компенсации ёмкости изоляции шахтной участковой электрической сети автокомпенсаторами, функционирующими на основе управления величиной индуктивности компенсирующего дросселя.

4) Установлено, что факторами ограничения области эффективного функционирования устройства выявления фазы с цепью утечки тока на землю в структуре короткозамыкателя повреждённой фазы аппарата защиты от утечек тока на землю, действующего на основе определения минимальной из разностей потенциалов между землёй и фазами электрической сети, являются ёмкость изоляции сети, превышающая 1.0 мкФ/фазу (электросети с потребителями высокой мощности), частота сети, превышающая 50 Гц (комбинированные электросети), сопротивление утечки (как показатель нестабильности величины сопротивления тела человекка).

Определены соотношения параметров электрической сети при достижении которых схемами аппаратов защиты от утечек тока на землю в качестве повреждённой будет выявлена и закорочена на землю смежная с ней фаза, что представляет собой опасность электропоражения человека.

5) Обоснована целесообразность изменения концепции построения СЭС участка шахты в части отказа от присоединения ЦП кабелей к заземлениям при условии применения локальных средств выявления контакта фазы сети с корпусом электроустановки, управляющих процессами автоматического защитного отключения.

6) Установлена возможность выявления контакта фазы с корпусом АД при подключении измерительной цепи между корпусом и точкой нулевого потенциала фаз статора. Обоснованы структура и параметры устройства (защищено патентом Российской Федерации на изобретение) управления автоматическим защитным отключением коммутационного аппарата на основе выявления контакта «фаза - корпус», датчиком, локализуемым в АД.

7) Синтезирована структура комплекса средств автоматического защитного отключения силовых присоединений при его оснащении устройствами выявления контакта фазы с объектом защиты.

8) Установлена возможность выявления места повреждения изоляции фазы экранированного кабеля при использования его неприсоединяемого к заземлению ЦП в качестве проводника информационного сигнала измерительной цепи, и адаптации петлевого метода к применению в условиях эксплуатации силового рудничного электрооборудования.

9) Результаты диссертационного исследования приняты ГБУ «НИИВЭ» (г. Донецк) и ГБУ «МакНИИ» (г. Макеевка) к использованию в профильных научно-исследовательских работах, использованы в НИР и внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет».

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с обоснованием алгоритмов и технических решений в части реализации функции самоконтроля исправности технических средств автоматической защиты, локализуемых в структурах рудничных АД.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных зданий, в которых должны бать опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук:

1. **Маренич, М.К.** Алгоритм автоматического защитного блокирующего отключения рудничного асинхронного двигателя при отсутствии заземления его корпуса / **М.К. Маренич**, И.Б. Гуляева //Вестник Донецкого национального университета Серия Г: Технические науки №1/2025. – С. 104-111.
2. **Маренич, М.К.** Локализация датчиков контакта фазы в структуре асинхронных двигателей как завершающий компонент при построении системы автоматической защиты электротехнического комплекса участка шахты/**М.К. Маренич**// Вестник Донецкого национального университета Серия Г: Технические науки №3/2025. – С. 86-97.

Патенты:

3. Патент на изобретение 2832720 (RU), МПК (2006.01) H02H3/02; H02H7/08 Устройство для выявления повреждения в кабельном присоединении статора рудничного асинхронного двигателя, **М.К. Маренич,** Л.А. Муфель, И.Б. Гуляева – 2024109616. Заявл. 09. 04 .2024. Опубл. 28. 12. 2024. Бюл. №1.

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:

4. Денисова, Е.В. Специфика заземления электрооборудования участка шахты в контексте соответствия критерию эффективности защиты персонала от электропоражения]/ Е.В. Денисова, И.Б. Гуляева, **М.К. Маренич**, // Горная промышленность №4 / 2022.–С. 110-118.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, учредителями которых являются образовательные организации высшего образования и научные организации, расположенные на территории Донецкой Народной Республики:

5. Гуляева, И.Б. Адаптация петлевого метода определения места повреждения кабеля к условиям применения в структуре рудничного электромеханического комплекса / И.Б. Гуляева, **М.К. Маренич,** Л.А. Муфель // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 1 (23) 2021, Донецк. –С. 35-41.
6. Гуляева, И.Б. Управление коммутацией цепи нейтрали вторичной обмотки трансформатора подстанции как способ повышения эффективности защитного отключения сети / И.Б. Гуляева, **М.К. Маренич** // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 2 (24) 2021, Донецк. – С. 9-16.
7. Гуляева, И.Б. Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма. Проблемные вопросы и пути их решения/ И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, **М.К. Маренич**, Л.А. Муфель, О.А. Демченко // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 3(25) 2021, Донецк. – С. 34-47.

8. Гуляева, И.Б. Адаптация схемы магнитного пускателя к реализации комплексной защиты силового присоединения/ И.Б. Гуляева, **М.К. Маренич,** Л.А. Муфель, О.А. Демченко // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 4 (26) 2021, Донецк. – С. 38-47.

9. Гуляева, И.Б. Анализ эффективности защитной функции автокомпенсатора ёмкостного тока в структуре аппарата защиты серии «АЗУР-1» / И.Б. Гуляева, Е.С. Дубинка, **М.К. Маренич.** –Вестник Донецкого национального технического университета, Вып. 1 (27) 2022, Донецк.–С. 50-60.

10. **Маренич, М.К.** Анализ эффективности защитной функции короткозамыкателя повреждённой фазы в структуре аппарата защиты от утечек тока на землю / **М.К. Маренич** // Вестник Донецкого национального технического университета Вып. 2 (28) 2022, Донецк. –С. 46-53.

11. **Маренич, М.К**. Ёмкость изоляции электросети участка шахты как фактор формирования тока в цепи заземления [Электронный ресурс]/ **М.К. Маренич**, И.Б. Гуляева // Вестник Донецкого национального технического университета. Вып. 3(29) 2022, Донецк. – С. 20-26.

Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций:

12. **Маренич, М.К.** Локализация контура заземления как способ повышения безопасности эксплуатации системы электроснабжения участка шахты **/М.К. Маренич**, И.Б. Гуляева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (17-19 марта 2022 г.,Москва), Тезисы докладов. – М., НИУ «МЭИ»: 2022. – С. 972.

13. **Маренич, М.К.** Автоматический контроль проводимости цепи «фаза - корпус электроустановки» как альтернатива защитному заземлению в электросети участка шахты / **М.К. Маренич,** И.Б. Гуляева //Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XXII международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (в рамках 8-го Международного научного форума «Инновационные перспективы Донбасса»). Донецк, 2022. – С. 138-142.

14. **Маренич, М.К.** Защита персонала шахты от электропоражения. Анализ эффективности альтернативных технических решений / **М.К. Маренич,** И.Б. Гуляева //Инновационные перспективы Донбасса. IX Междунар. начн.- техн. конф. г. Донецк, 23-25 мая 2021 г. – Донецк, ДонНТУ, 2023. Т.2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2023. –С. 5 - 14.

15. Шарнопольская, О.Н. Новая концепция построения системы электроснабжения участка шахты как фактор повышения конкурентоспособности производства рудничного электрооборудования / О.Н. Шарнопольская, **М.К. Маренич** // Регионы России в меняющемся мире: преемственность приоритетов и новые возможности: сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 24 ноября 2023 г.) / гл. ред. Н. В. Морозова. – Чувашский гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, Чебоксары: Изд-во Среда, 2023. – С. 186 - 193.

16. **Маренич, М.К**. К вопросу обоснования новой концепции построения системы электроснабжения участка шахты /**М.К. Маренич**, И.Б. Гуляева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать девятая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (16-18 марта 2023 г.,Москва), Тезисы докладов.– М., НИУ «МЭИ»: 2023. – С. 1210.

17. **Маренич, М.К**. Ёмкость изоляции кабелей как компонент электропоражающего фактора / **М.К. Маренич,** И.Б. Гуляева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. ТридцатаяМеждународная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (17-19 марта 2024 г.,Москва), Тезисы докладов.– М., НИУ «МЭИ»: 2024. – С. 1309.

18. **Маренич, М.К.** Комплексный контроль технического состояния электрооборудования как основа альтернативной концепции построения системы электроснабжения участка шахты /**М.К. Маренич,** И.Б. Гуляева // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XXIV Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов, Донецк, 2024. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 211-212.

19. **Маренич, М.К.** Альтернативная концепция построения системы электроснабжения участка шахты. Принципиальные отличия и их обоснование / **М.К. Маренич** // Актуальные проблемы недропользования (под эгидой Международного центра компетенций ЮНЕСКО): Тезисы докладов участников XX Всероссийской конференции-конкурса студентов выпускного курса и аспирантов, Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет, 02-06.12.2024, Т.2.–С. 140-144.

20. **Маренич, М.К.** Обеспечение безопасности эксплуатации электрических машин участка шахты при отсутствии заземления/ **М.К. Маренич,** И.Б. Гуляева // Радиотехника, электротехника и энергетика. Тридцать первая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (13-15 марта 2025 г.,Москва), Тезисы докладов. – М., НИУ «МЭИ»: 2025. – С. 1216.

21. **Маренич, М.К.** Перспективная система электроснабжения участка шахты в контексте применения технических средств повышения эффективности защиты человека от электропоражения /**М.К. Маренич**// Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции,г. Алчевск, ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 24-25.04.2025. – С. 356-358.

Личный вклад соискателя в публикациях, написанных в соавторстве: [1] – обоснование алгоритма автоматической блокировки отключенного состояния силового присоединения после защитного отключения группы электропотребителей; [3, 6, 16] – исследование специфики формирования электропоражающего фактора в СЭС участка шахты, обусловленного использованием ЦП кабелей в качестве элементов заземления корпусов АД; [4] – разработка алгоритма определения места повреждения изоляции кабеля;[5, 7, 12, 19] – разработка схемного решения; [8] – экспериментальное исследование

объекта, анализ результатов экспериментов; [10] – разработка и исследование расчётной схемы объекта; [11, 13, 14, 15, 17] – обоснование принципиальных положений альтернативной концепции построения СЭС участка шахты; [21] – разработка схем узлов выявления контакта фазы с корпусом АД и передачи информационного сигнала в цепь управления отключением пускателя.

Подписано в печать 12.03.2026. Формат 60x84x1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Печать цифровая. Заказ № 128. Тираж 100 экз.

Отпечатано ИП Криничная Ирина Викторовна
ОГРНИП 32293010009725 от 28.12.2022 г.
283059, г. Донецк, ул. Овнатаняна, 4. Тел. +7 (949) 328-16-19
e-mail: krinichnayirina@ya.ru