

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ПИЧУЕВ Александр Вадимович

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В
ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Петров В.Л.

Москва – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие техники и технологии ведения горных работ на предприятиях, осуществляющих добычу полезных ископаемых подземным способом, в значительной степени связано с развитием и совершенствованием электротехнических комплексов и систем, обеспечивающих эффективную реализацию технологических процессов производства.

Применение в подземных электрических сетях систем частотного регулирования электропривода механизмов подачи очистных комбайнов, насосных станций, скребковых и ленточных конвейеров в значительной степени оказало влияние на структуру подземной электрической сети, повысило производительность и надежность механизированных комплексов. В модернизированной структуре подземной электрической сети появились участки с постоянным током и током изменяющейся частоты – далее подземные комбинированные электрические сети (ПКЭС).

Оценка современного уровня обеспечения энергомеханических служб, осуществляющих оперативное управление и техническое обслуживание электротехнических комплексов в подземных электрических сетях горных предприятий показывает, что эффективный контроль изоляции и защитное отключение позволяют обеспечить безопасные условия труда, снизить вероятность возникновения и развития аварийных ситуаций, которые представляют опасность для жизни людей, могут привести к нарушению сложного технологического процесса и значительному материальному ущербу.

Вопросы эффективности работы средств защитного отключения, особенно в ПКЭС, при наличии в сети высших гармонических составляющих напряжения и тока, режимов генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, процессов низкочастотной поляризации в изоляции и необходимости компенсации емкостного тока утечки до настоящего времени исследованы недостаточно.

С учетом общей тенденции к росту мощности устанавливаемых на горных машинах электродвигателей (до 1,2 МВт) и перспективы перехода подземных участков электрических сетей на напряжение 3,3 кВ проблема эффективности серийно выпускаемых устройств защиты от токов утечки в настоящий момент времени заключается фактически в исчерпании потенциала их дальнейшего развития на основе ранее применяемых способов построения и принципах действия.

Общая тенденция развития и совершенствования защиты от токов утечки направлена на применение микропроцессорных устройств в электронных блоках питания, контроля изоляции, управления автоматической компенсации и защитного шунтирования, на обеспечение самоконтроля, диагностики исправности и телеметрии данных о состоянии защитных комплексов, что при эксплуатации в условиях ПКЭС требует решения вопроса о магнитной совместимости. Недостаточно исследована эффективность автоматической компенсации, которая в значительной степени определяется параметрами переходного процесса в несимметричных режимах утечки тока, временем срабатывания защиты и длительностью режима генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

Обоснование методов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий позволяет выйти на более высокий перспективный уровень развития теории и практики создания новых средств обеспечения безопасной эксплуатации горно-шахтного оборудования и является актуальной научной проблемой.

Степень разработанности темы исследования. Диссертация основана на исследованиях ведущих ученых, внесших значительный вклад в развитие теории электротехнических комплексов, систем и их компонентов применительно к специфическим условиям горного производства.

Наиболее значимый вклад в области разработки способов контроля изоляции и средств защитного отключения внесли Дзюбан В.С., Жидков В.О., Ильин Ю.Н., Кононенко В.П., Ликаренко А.Г., Малафеев С.И., Петуров В.И., Прудников А.П., Ревякин А.И., Сидоров А.И., *Thielen H., Liang M.-Y., Wenjun F., Yang Y.*

Вопросам защитного отключения в ПКЭС посвящены работы Бабокина Г.И., Куницкого В.И., Лазарева А.И., Лукачевича Ю.Ю., Шпрехера Д.М., *Paul O'shea, Schonek J., Nebon Y.*

В области исследования переходных процессов существенный вклад внесли Бабичев Ю.Е., Безденежных А.Г., Гамазин С.И., Жидков В.О., Ким К.Е., Ставцев В.А., Суворов И.Ф., *Berzoy A., Fortescue C., Kolar J., Faulkner E.*

В области обеспечения электробезопасности в шахтных подземных электрических сетях значительный вклад внесли Бацезев Ю.Г., Гладылин Л.В., Глухарев Ю.Д., Ляхомский А.В., М.Е., Петров Г.М., Цапенко Е.Ф., Щуцкий В.И., *Ellinek S., Ronai B., Pouvel I., Biegelmeier G., Koeppen S., Ollendorff F.*

Научные разработки ученых нашли свою практическую реализацию в действующих нормах и правилах, регламентах и стандартах, технических средствах контроля изоляции и защитного отключения.

Целью работы является обоснование методов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий, обеспечивающих повышение безопасности эксплуатации электротехнических комплексов и систем современного технического уровня.

Идея работы заключается в том, что повышение безопасности эксплуатации электротехнических комплексов и систем достигается за счет реализации методов и средств пофазного контроля сопротивления изоляции, компенсации емкостного тока утечки, фильтрации высших гармонических составляющих тока и ограничения режимов генерирования электродвигателями обратной ЭДС.

Задачи научных исследований.

1. Разработка математической модели для исследования режимов утечки тока и синтеза схем замещения подземной электрической сети.
2. Разработка имитационных моделей подземных комбинированных электрических сетей, позволяющих исследовать гармонический состав напряжения и тока утечки с оценкой степени их влияния на работоспособность средств защитного отключения.
3. Обоснование метода исследования электромагнитных переходных процессов в подземной электрической сети при несимметричных режимах утечки через изоляцию с оценкой их влияния на работоспособность средств защитного отключения.
4. Обоснование метода и разработка средств пофазного контроля изоляции, компенсации емкостного тока утечки, контроля и ограничения режима генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями в подземных электрических сетях горных предприятий.
5. Обоснование метода оценки состояния безопасности подземных электрических сетей по уровню и длительности воздействия тока на человека в зависимости от параметров фазной изоляции в несимметричных режимах утечки.

Область исследования, обозначенная в сформулированных задачах, соответствует п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств

и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования», п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов» паспорта научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Объектом исследования являются подземные электротехнические комплексы и системы, включая средства защитного отключения.

Предметом исследования являются режимы утечки тока через изоляцию в подземных электрических сетях промышленной частоты и подземных комбинированных электрических сетях горных предприятий, оборудованных средствами защитного отключения.

Научная новизна работы.

1. Разработана математическая модель для анализа переходных процессов при несимметричных режимах утечки тока в подземной электрической сети, отличающаяся тем, что учитывает параметры фазной изоляции, асинхронных электродвигателей и устройств защитного отключения.

2. Разработаны имитационные модели ПКЭС для исследования гармонического состава напряжения и токов утечки, отличающиеся тем, что учитывают параметры средств обеспечения качества электроэнергии, устройств защитного отключения, изоляции электрической сети, а также параметры преобразователей частоты с автономным инвертором напряжения и взрывозащищенных асинхронных электродвигателей.

3. Обоснован метод исследования электромагнитных переходных процессов в подземной электрической сети при несимметричных режимах утечки через изоляцию с оценкой их влияния на работоспособность средств защитного отключения.

4. Установлены закономерности, отражающие характер изменения фазных напряжений и токов утечки в зависимости от параметров сопротивления изоляции с учетом электромагнитных переходных процессов при срабатывании устройств защитного отключения, генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, низкочастотной поляризации и резонанса тока в колебательных контурах фазной изоляции.

5. Обоснован метод пофазного контроля сопротивления изоляции с компенсацией емкостного тока, отличающийся тем, что учитывает зависимости изменения фазных напряжений и токов утечки от параметров изоляции подземной электрической сети в несимметричных режимах.

6. Обоснован метод оценки состояния безопасности в подземных электрических сетях горных предприятий на основе совокупности зависимостей уровня и длительности воздействия тока на человека от параметров фазной изоляции в несимметричных режимах утечки.

Теоретическая значимость работы: заключается в научном обосновании методов исследования электромагнитных переходных процессов, пофазного контроля сопротивления изоляции с компенсацией емкостного тока утечки и метода оценки состояния безопасности подземных электрических сетей, представляющих теоретическую основу реализации новых принципов создания способов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий.

Практическая значимость работы.

1. Разработан комплекс алгоритмов и программ на основе методического обеспечения для анализа режимов утечки тока в подземных электрических сетях и выполнен синтез схем замещения, учитывающих параметры изоляции, устройств защитного отключения, преобразователей частоты, фильтро-компенсирующих устройств, токоограничивающих реакторов, синус-фильтров и асинхронных электродвигателей.

2. Разработаны схемы замещения подземных комбинированных электрических сетей, позволяющие исследовать гармонический состав напряжения и токов в цепях утечки через изоляцию, в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя устройств защитного отключения.

3. Разработаны алгоритмы расчета электромагнитных переходных процессов в подземных электрических сетях, учитывающие режимы утечки тока, параметры изоляции, устройств защитного отключения и асинхронных электродвигателей.

4. Разработаны средства пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостного тока утечки в подземных электрических сетях горных предприятий.

5. Разработаны средства контроля и ограничения количества электричества в процессе генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями в режимах несимметричной утечки тока в подземных электрических сетях.

Методология и методы исследований. Научное обоснование методов аналитических и экспериментальных исследований режимов утечки тока в подземных электрических сетях горных предприятий, разработка способов и средств защитного отключения выполнены в соответствии с методами теории электротехнических комплексов, систем и их компонентов, теории электротехники, физики диэлектриков, математического анализа, имитационного моделирования и метода планирования эксперимента.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель подземной электрической сети для анализа переходных процессов в различных режимах утечки тока, отличающаяся тем, что учитывает постоянные времени затухания электромагнитных колебаний в активно-емкостных контурах фазной изоляции и в активно-индуктивных контурах обмоток асинхронных электродвигателей.

2. Имитационные модели подземных комбинированных электрических сетей, отличающиеся тем, что учитывают спектральный состав напряжения и тока утечки через изоляцию, влияющих на работоспособность устройств защитного отключения.

3. Закономерности, отличающиеся тем, что учитывают несимметрию фазных напряжений и токов утечки в зависимости от изменения параметров сопротивления изоляции подземной электрической сети.

4. Метод пофазного контроля сопротивления изоляции с компенсацией емкостного тока, отличающийся тем, что учитывает зависимости изменения фазных напряжений и токов утечки от параметров изоляции подземной электрической сети в несимметричных режимах.

5. Метод оценки состояния безопасности подземных электрических сетей, отличающийся тем, что учитывает уровень и длительность воздействия тока на человека в зависимости от параметров фазной изоляции в несимметричных режимах утечки.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов рекомендаций подтверждается использованием теории электротехники при анализе режимов утечки тока в подземных электрических сетях горных предприятий; удовлетворительной сходимостью (расхождение не превышает 10%) результатов аналитических и экспериментальных

исследований режимов утечки тока; применением в экспериментальных исследованиях современной высокоточной контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Реализация результатов работы. Рекомендации по повышению эффективности работы средств защитного отключения в подземных электрических сетях, методика оценки потенциальной опасности проектируемых и реконструируемых подземных электрических сетей, методика испытания и настройки средств контроля и защитного отключения внедрены в ряде компаний (АО «Геоспецстрой», ООО «Электропром», ПП «Шахтоуправление «Луганское» «РТК Востокуголь»).

Практическим результатом работы, внедренным в учебный процесс, является применение ряда теоретических и методических положений диссертации при подготовке специальных вопросов дипломных проектов и в научно-исследовательских работах студентов по направлению 21.05.04 «Горное дело» профилю «Электрификация и автоматизация горного производства» и аспирантов по научной специальности «Электротехнические комплексы и системы» НИТУ МИСИС.

Апробация результатов. Основные положения и разделы диссертационной работы докладывались и обсуждались: на IV и V Всесоюзных конференциях молодых ученых «Интенсификация горнорудного производства» (Свердловск, 1989 и 1991 гг.); Международной конференции «Электробезопасность-90» (Болгария, Варна, 1990 г.); Всесоюзной научно-практической конференции «Электробезопасность при эксплуатации электроустановок» (Душанбе, 1990 г.); X научной конференции «Моделирование электроэнергетических систем» (Каунас, 1991 г.); Международном семинаре «Проблема повышения надежности, уровня безаварийности эксплуатации электротехнических и электромеханических систем» (Москва, 1993 г.); Международном научно-практическом семинаре «Проблемы и перспективы развития горной техники» (Москва, 1995 г.); IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (Чита, 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт» (Чита, 2011 г.); XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2012 и 2014 гг.); V Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2012 г.); VI Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2015 г.), на Симпозиумах с международным участием «Неделя горняка» (1998 – 2001, 2005 – 2007, 2010, 2011 – 2021, 2023 гг.).

Публикации и объекты авторского права. Основные положения диссертации опубликованы в 49 печатных работах, в числе которых 10 статей в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 статья в изданиях, индексируемых международной базой научного цитирования Scopus, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на полезную модель, 1 авторское свидетельство на изобретение, 4 монографии, 7 статей в ведущих рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 304 наименований и включает 132 рисунка, 14 таблиц и 1 приложения. Объем диссертации 325 страниц, приложения – 58 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и идея научного исследования, научная новизна, научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В главе 1 приведена общая характеристика проблемы обеспечения контроля изоляции и защитного отключения в подземных электрических сетях с учетом современной структуры системы электроснабжения горных предприятий, производственных факторов и требований безопасности ведения горных работ.

Рассмотрены методы определения параметров изоляции электроустановок напряжением до 1,2 кВ и средства защиты от токов утечки в подземных выработках угольных и горнорудных предприятий.

Проведен анализ средств защитного отключения и технических решений по обеспечению требований безопасности в подземных электрических сетях промышленной частоты (ПЭС ПЧ) и в ПКЭС, определены достоинства и недостатки серийно выпускаемых устройств защиты от токов утечки (УЗТУ).

Средства защитного отключения, как составная часть электротехнических комплексов и систем (ЭТКС), должны решать следующие основные задачи:

- осуществление непрерывного контроля активного сопротивления изоляции и быстросрабатывающего отключения находящейся под напряжением электрической сети при снижении сопротивления изоляции ниже нормированных значений независимо от режима утечки тока (симметричный, однофазный, двухфазный);
- осуществление предупредительного контроля активного сопротивления изоляции на отключенном участке электрической сети и блокировки включения коммутационных аппаратов при снижении сопротивления изоляции до критического значения, соответствующего срабатыванию устройства защитного отключения (УЗО);
- эффективную компенсацию емкостного тока утечки в протяженных кабельных линиях в случае однофазного (однополюсного) прикосновения к частям, находящимся под напряжением, недопустимым для человека, за время срабатывания УЗО и время генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

В результате анализа текущего состояния вопроса научных исследований режимов утечки тока в ПЭС ПЧ и в ПКЭС, исследований в области компенсации емкостных токов утечки через изоляцию, низкочастотной поляризации, переходных процессов за время срабатывания УЗО и режимов генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями дано обоснование цели и определены задачи диссертационного исследования.

В главе 2 дано обоснование метода и разработана математическая модель для исследования переходных процессов при несимметричных режимах утечки через изоляцию в подземных электрических сетях, выполнен синтез схем замещения, учитывающих параметры изоляции, УЗО, преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения (ПЧ с АИН), фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), токоограничивающих реакторов, синусных фильтров (СФ) и асинхронных электродвигателей (АД).

Исследования проводились применительно к условиям ПЭС ГП напряжением до 1140 В угольных шахт, для большинства которых отличительными особенностями являются: высокая категорийность по газу и пыли; глубина разработки от 300 до 700 м с последующим увеличением до 1000 м; мощность электрической нагрузки очистных механизированных комплексов до 2000 кВт; применение частотно-регулируемого привода взрывозащищенных

АД механизмов подачи выемочных комбайнов мощностью до 600 кВт, скребковых и ленточных конвейеров с единичной мощностью АД до 400 кВт; суммарная протяженность электрически связанных кабельных линий до 1500 м. Подземные электрические сети выполнены по смешанной схеме распределения электроэнергии от передвижной участковой понизительной подстанции (ПУПП) к потребителям электроэнергии: ПЭС ПЧ и ПКЭС, включающие цепи постоянного тока и участки с регулируемой частотой, оборудованные серийными УЗТУ типа УАКИ и АЗУР.

Основой математической модели для анализа режимов утечки тока, уровней напряжения и параметров изоляции электрической сети относительно земли является вывод и составление соответствующей системы дифференциальных уравнений для базовой схемы замещения подземной электрической сети.

Для моделирования несимметричных режимов принята схема замещения цепей утечки тока, характерная для ПЭС ГП напряжением до 1140 В (рисунок 1, а).

Источником ЭДС являются вторичные обмотки силового трансформатора ПУПП 6000/1140 В. УЗТУ задается параметрами фильтра присоединения, компенсатора и цепи измерителя.

На рисунке 1, б – д приведены составляющие схемы замещения подземной электрической сети с параметрами:

- УЗТУ типа АЗУР (активно-индуктивный 3RL-фильтр): параметры фильтра $R_{fa}, R_{fb}, R_{fc}, L_{fa}, L_{fb}, L_{fc}$, сопротивление и индуктивность цепи измерителя соответственно R_0, L_0 ;
- УЗТУ типа УАКИ (активно-вентильный 3VDR-фильтр): фазные сопротивления фильтра R_{fa}, R_{fb}, R_{fc} , сопротивления R_0, R_{PN} и индуктивность L_{PN} цепи измерителя;

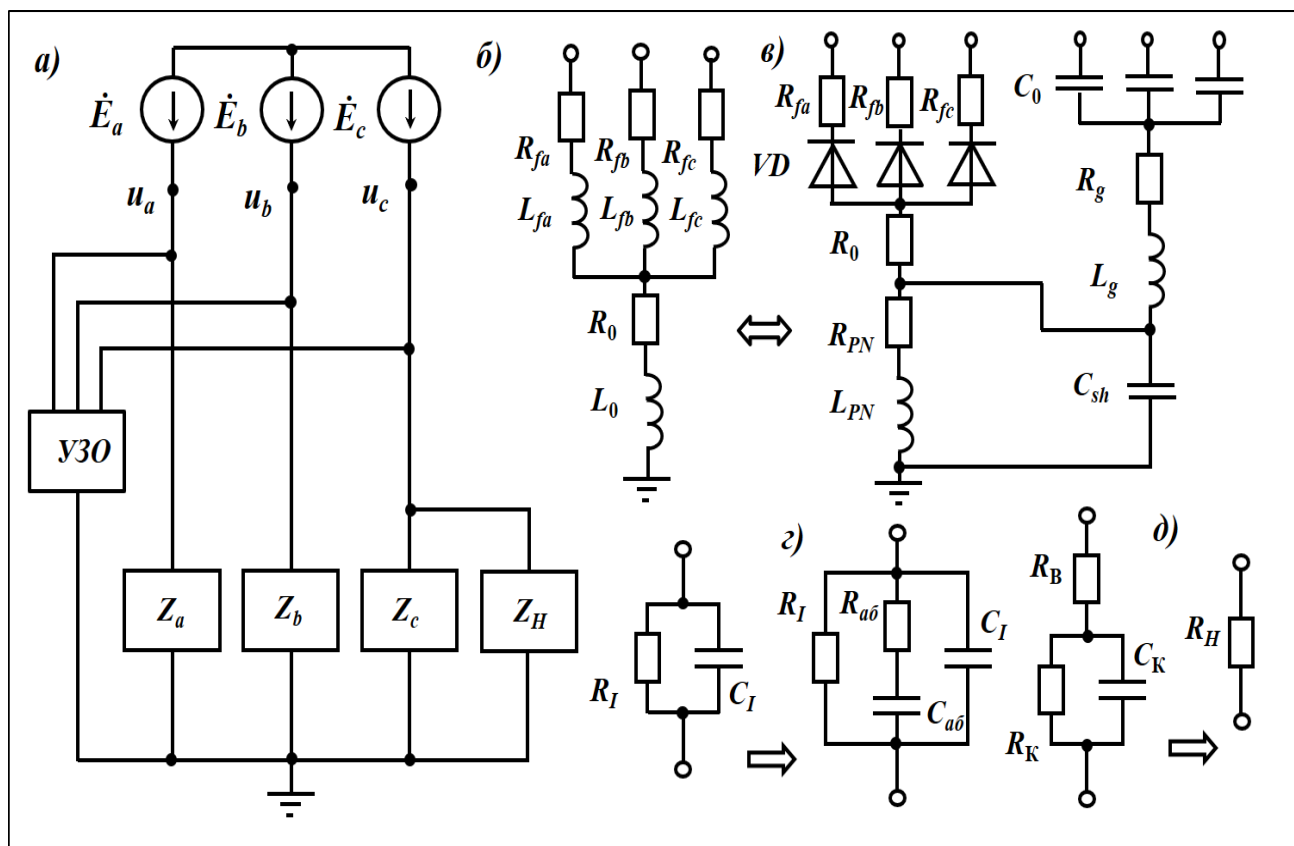


Рисунок 1 – Схема замещения подземной электрической сети и ее составляющие

– компенсатор емкостного тока утечки: разделительные емкости C_0 фильтра присоединения, шунтирующая емкость C_{sh} , активное сопротивление R_g и индуктивность компенсирующего дросселя L_g ;

– составляющие полных сопротивлений изоляции фаз электрической сети (Z_a, Z_b, Z_c): активное сопротивление R_I и емкость C_I фаз, емкость C_{a6} и сопротивление R_{a6} току абсорбции;

– составляющие сопротивления цепи утечки тока через человека (Z_H): сопротивление внутренних органов R_B , сопротивление R_K и емкость C_K кожных покровов (допустимо упрощение $Z_H \approx R_B = R_H = 1 \text{ кОм}$).

С учетом того, что исследуемые режимы утечки тока относятся к переходным процессам во время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, при моделировании фазные сопротивления изоляции предложено представить в виде постоянных времени затухания электромагнитных колебаний в RC -контурах:

$$X_{IA} = \frac{1}{\omega_0 C_A}, X_{IB} = \frac{1}{\omega_0 C_B}, X_{IC} = \frac{1}{\omega_0 C_C}; \quad T_{IA} = \frac{X_{IA}}{R_{IA}}, T_{IB} = \frac{X_{IB}}{R_{IB}}, T_{IC} = \frac{X_{IC}}{R_{IC}}, \quad (1)$$

где X_{IA}, X_{IB}, X_{IC} – емкостные сопротивления изоляции фаз сети относительно земли; T_{IA}, T_{IB}, T_{IC} – постоянные времени затухания электромагнитных колебаний в фазных RC -контурах изоляции; ω_0 – радиальная промышленная частота.

Сопротивление фазы сети, в которой произошло однополюсное прикосновение к токоведущей части, и электромагнитная составляющая в контуре фазной изоляции с учетом параметров тела человека, определится по формулам:

$$R_{IH} = \frac{R_I R_H}{R_I + R_H}; X_{IH} = \frac{X_I X_H}{X_I + X_H}; \quad T_{IH} = \frac{X_{IH}}{R_{IH}}, \quad (2)$$

где $R_H = \frac{X_{\Xi}^2 + R_{\Xi}^2}{R_{\Xi}}$; $X_H = \frac{X_{\Xi}^2 + R_{\Xi}^2}{X_{\Xi}}$ – составляющие полного сопротивления тела человека.

Здесь $R_{\Xi} = R_B + \frac{R_K X_{CK}^2}{X_{CK}^2 + R_K}$; $X_{\Xi} = \frac{X_{CK} R_K^2}{R_K^2 + X_{CK}}$ – эквивалентные сопротивления для схемы замещения параметров тела человека.

На рисунке 2 приведена последовательность преобразования схемы замещения фазной изоляции сети с учетом активного R_{a6} и емкостного X_{a6} сопротивлений току абсорбции.

Составляющие эквивалентного фазного сопротивления изоляции и постоянная затухания электромагнитных колебаний в контуре, образованном активными и емкостными сопротивлениями изоляции, определяются по формулам:

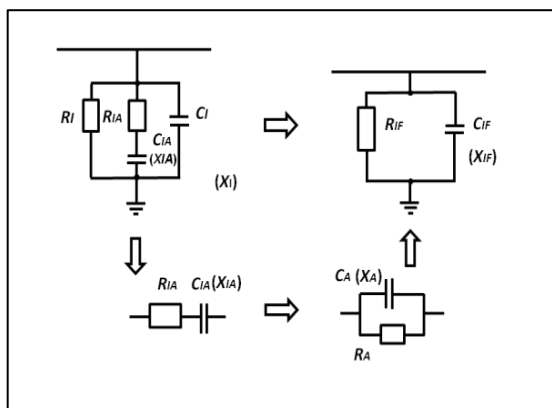


Рисунок 2 – Преобразование схемы замещения фазной изоляции сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции

$$R_{IF} = \frac{R_I Z_{a6}^2}{R_I R_{a6} + Z_{a6}^2}, X_{IF} = \frac{X_I Z_{a6}^2}{X_I X_{a6} + Z_{a6}^2}, \quad T_{IF} = \frac{X_{IF}}{R_{IF}} = T_I \cdot \frac{R_I R_{a6} + Z_{a6}^2}{X_I X_{a6} + Z_{a6}^2}, \quad (3)$$

где $Z_{a6} = \sqrt{R_{a6}^2 + X_{a6}^2}$ – полное

сопротивление току абсорбции в фазе сети.

Известные показатели несимметрии параметров электрической сети (коэффициент несимметрии активных составляющих сопротивления изоляции и коэффициент относительной несимметрии напряжения смещения нейтрали от фазного напряжения

сети относительно земли) требуют дополнительных измерений и расчетов для определения составляющих активных и емкостных проводимостей фаз изоляции сети. Для более полного и качественного анализа режима утечки предложено использовать коэффициент несимметрии фазных напряжений:

$$k_{NU} = \frac{U_{F.max} - U_{F.min}}{U_{F.max}} = 1 - \frac{U_{F.min}}{U_{F.max}} = \frac{\Delta U_F}{U_{F.max}}, \quad (4)$$

где $U_{F.max}$, $U_{F.min}$ – соответственно максимальное и минимальное значения фазных напряжений электрической сети относительно земли при различных режимах утечки тока через изоляцию. В этом случае степень несимметрии оценивается непосредственным измерением контролируемых величин фазных напряжений.

На рисунке 3 представлена схема замещения электрической сети с АД для исследования несимметричных режимов и установления закономерности изменения фазных напряжений и токов утечки при изменении параметров изоляции.

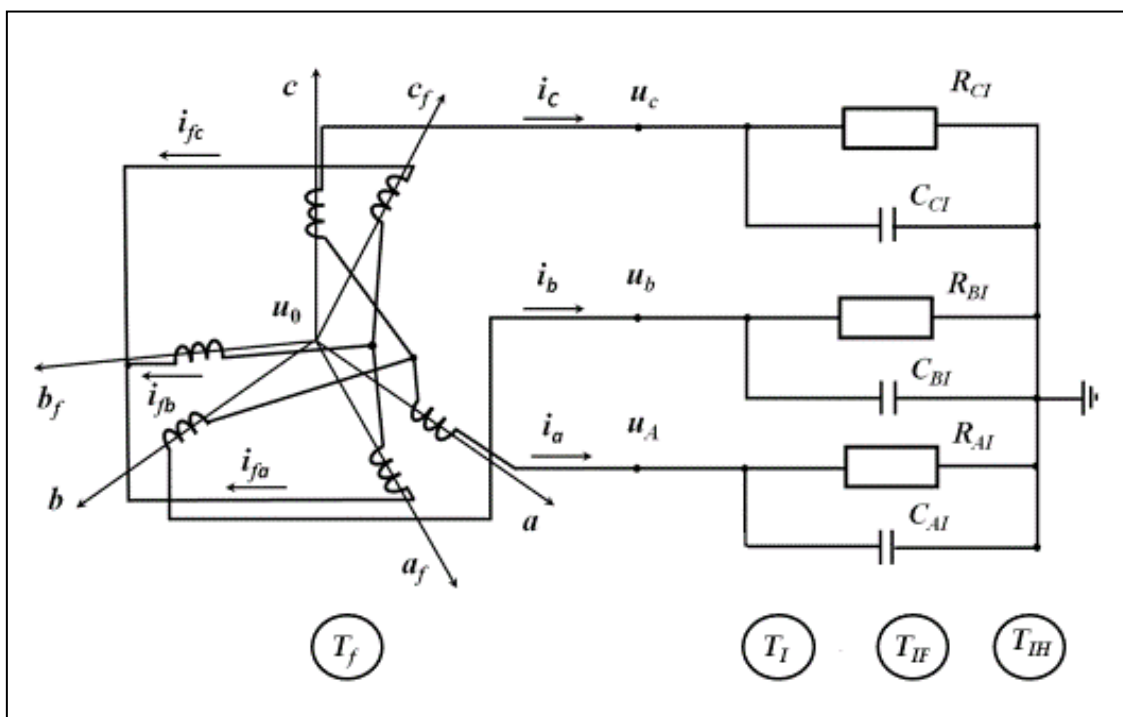


Рисунок 3 – Схема замещения электрической сети с асинхронным электродвигателем

Разработанная схема является универсальной, так как, в зависимости от поставленной задачи научного исследования, возможна замена модели асинхронного двигателя любым другим источником ЭДС (генератор, трансформатор, синхронный электродвигатель) и добавление типовых элементов схем замещения (фильтры присоединения и цепи измерителя УЗО, источники оперативного постоянного тока, компенсаторы, токоограничивающие реакторы, ФКУ, СФ и т.д.).

Математическое моделирование переходных процессов в условиях несимметрии внешних цепей утечки тока через изоляцию и симметрии внутренних цепей источника ЭДС (асинхронного электродвигателя) осуществлялось представлением трехфазной сети двухфазной моделью в координатах $\alpha, \beta, 0$. В этом случае основные параметры схемы замещения приведены в системе относительных единиц в соответствии с теорией Парка-Горева, а модель представляется системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка, приведенных к форме Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_\alpha}{d\tau} = -\frac{1}{x^*} \left[u_\alpha + ri_\alpha + \omega_r^* (e_\beta + \mu x^* i_\beta) - \frac{e_\alpha}{T_f} \right]; \\ \frac{di_\beta}{d\tau} = -\frac{1}{x^*} \left[u_\beta + ri_\beta + \omega_r^* (e_\alpha + \mu x^* i_\alpha) - \frac{e_\beta}{T_f} \right]; \\ \frac{de_\alpha}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[-\omega_p^* (e_\beta + \mu x^* i_\beta) - \frac{e_\alpha}{T_f} + \mu (u_\alpha + ri_\alpha) \right]; \\ \frac{de_\beta}{d\tau} = \frac{1}{\sigma} \left[\omega_p^* (e_\alpha + \mu x^* i_\alpha) - \frac{e_\beta}{T_f} + \mu (u_\beta + ri_\beta) \right]; \\ \frac{du_\alpha}{d\tau} = \frac{1}{6} [-u_\alpha (4T_{IA} + T_{IB} + T_{IC}) + \sqrt{3}u_\beta (T_{IB} - T_{IC}) - 2u_0 (2T_{IA} - \\ - T_{IB} - T_{IC}) + i_\alpha (4x_{IA} + x_{IB} + x_{IC}) - \sqrt{3}i_\beta (x_{IB} - x_{IC})]; \\ \frac{du_\beta}{d\tau} = \frac{1}{2\sqrt{3}} [u_\alpha - 2u_0 (T_{IB} - T_{IC}) - \sqrt{3}u_\beta (T_{IB} + T_{IC}) - \\ - i_\alpha (x_{IA} - x_{IB}) + \sqrt{3}i_\beta (x_{IB} + x_{IC})]; \\ \frac{du_0}{d\tau} = \frac{1}{6} [-u_\alpha (2T_{IA} - T_{IB} - T_{IC}) + \sqrt{3}u_\beta (T_{IB} - T_{IC}) - 2u_0 (T_{IA} + \\ + T_{IB} + T_{IC}) + i_\alpha (2x_{IA} - x_{IB} - x_{IC}) + \sqrt{3}i_\beta (x_{IB} - x_{IC})]; \\ \frac{d\omega_p^*}{d\tau} = \frac{M_B}{T_j}. \end{array} \right. \quad (5)$$

где $e_\alpha, e_\beta, u_\alpha, u_\beta, u_0, i_\alpha, i_\beta$ – соответственно ЭДС, напряжения и токи утечки в координатах $\alpha, \beta, 0$; μ – коэффициент магнитной связи между статором и ротором; σ – полный коэффициент рассеяния; r, x^* – соответственно активное и приведенное индуктивное (с учетом рассеяния магнитного потока) сопротивление фазы статора; ω_p^* – частота вращения, приведенная к синхронной радианной частоте ω_0 ; T_j – постоянная инерции ротора; M_e – механический момент на валу электродвигателя.

Полученная система и алгоритмическое обеспечение по решению дифференциальных уравнений положены в основу метода исследования режимов утечки тока в ПЭС ГП, что позволило установить закономерности, отражающие характер изменения фазных напряжений и токов утечки в зависимости от параметров сопротивления изоляции с учетом электромагнитных переходных процессов при срабатывании УЗО, генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, низкочастотной поляризации и условий резонанса тока в колебательных контурах фазной изоляции.

В третьей главе приведены результаты исследования режимов утечки тока в ПЭС ПЧ, дано обоснование методов пофазного контроля сопротивления изоляции и компенсации емкостных токов, а также метода оценки степени опасности режимов утечки.

В результате синтеза схем замещения ПЭС ГП разработана обобщенная имитационная модель ПЭС ПЧ, оборудованная УЗО с $3RL$ - и $3VDR$ -фильтрами присоединения к сети и компенсаторами емкостного тока утечки (рисунок 4).

Сравнительный анализ результатов моделирования режимов однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию электрической сети позволил сделать вывод о том, что характер изменения векторов напряжений и токов зависит от режима утечки и соотношения параметров сопротивлений и емкостей в структуре фазных RC -контуров изоляции относительно земли.

В режиме однофазной утечки напряжение нулевой последовательности U_0 (ННП) находится в противофазе с напряжением поврежденной фазы и синфазно напряжению неповрежденных фаз. При этом ток нулевой последовательности I_0 (ТНП) находится в противофазе току неповрежденных фаз и синфазен току утечки в поврежденной фазе.

В режиме двухфазной утечки ННП синфазно напряжению неповрежденной фазы. При этом ТНП находится в противофазе току неповрежденной фазы.

На рисунке 5 приведена векторная диаграмма соотношений ННП в режимах однофазной и двухфазной утечек тока через изоляцию. При переходе из режима однофазной утечки в режим двухфазной утечки вектор напряжения $\dot{U}_0$ изменяет свое направление практически на 180° и перемещается из третьего квадранта системы координат в первый.

Для режима однофазной утечки тока I_h через человека характерно существенное снижение напряжения в фазе $\dot{U}_{FA}$, где произошло прикосновение, при этом вектор $\dot{U}_0$ опережает вектор этой фазы на угол 90° независимо от параметров активного сопротивления фаз и при любых его комбинациях с емкостным сопротивлением соответствующих фаз сети.

В режиме двухфазной утечки тока при снижении сопротивления изоляции напряжение в неповрежденной фазе $\dot{U}_{FA}$ увеличивается и приближается к линейному значению, в то время как $\dot{U}_0$ также увеличивается и приближается к фазному, но при этом опережает вектор напряжения $\dot{U}_{FA}$ в силу емкостного характера тока утечки. Напряжение в поврежденных фазах $\dot{U}_{FB}$ и $\dot{U}_{FC}$, а также соответствующие им углы фазного сдвига φ_B и φ_C незначительно изменяются относительно значений, соответствующих симметричному режиму, а при емкостях более $0,5$ мкФ/фазу, остаются практически неизменными.

На рисунке 6 приведена векторная диаграмма изменения тока I_h и ННП $\dot{U}_0$ при $R_I = 300$ кОм/фазу, $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ/фазу.

Степень несимметрии фазных напряжений в режимах однофазной и двухфазной утечки тока при неизменных параметрах активного сопротивления изоляции сети определяется не только соотношением активных сопротивлений фаз сети, но и в значительной мере величиной емкости изоляции сети относительно земли.

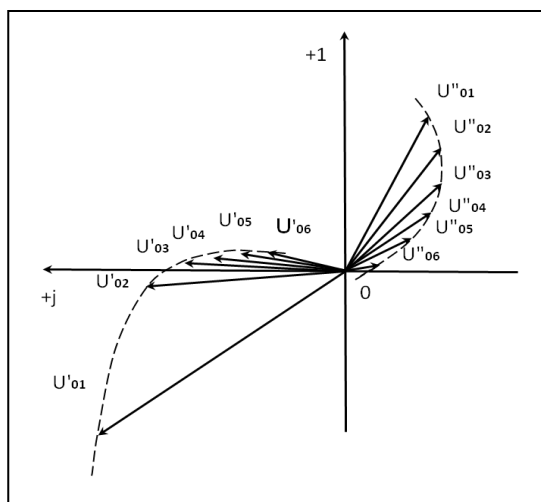


Рисунок 5 – Векторная диаграмма соотношений ННП U_0 в режимах однофазной и двухфазной утечек тока

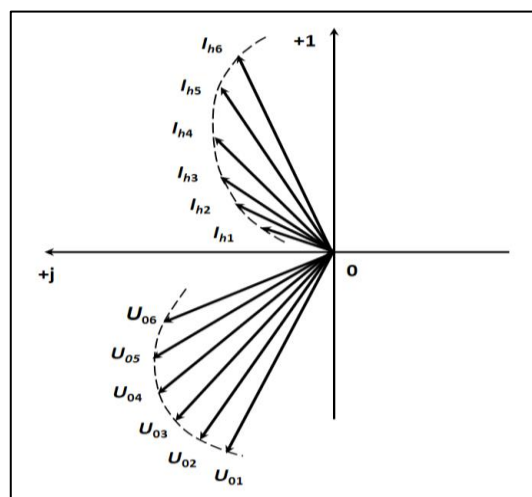


Рисунок 6 – Векторная диаграмма изменения тока I_h и ННП U_0 ($R_I = 300$ кОм/фазу, $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ/фазу)

Наибольшая несимметрия напряжений (рисунок 7) характерна для сетей малой протяженности ($C_I < 0,25$ мкФ/фазу), при этом с уменьшением активного сопротивления поврежденной фазы коэффициент несимметрии k_{NU} увеличивается от $0,017$ до $0,585$. Для сетей средней протяженности ($0,25 < C_I < 0,5$ мкФ/фазу) – $k_{NU} = 0,013 - 0,245$. Для сетей большой протяженности ($C_I > 0,5$ мкФ/фазу) несимметрия фазных напряжений незначительна – $k_{NU} = 0,002 - 0,134$.

В режиме двухфазной утечки тока через изоляцию при емкостях менее 0,5 мкФ/фазу несимметрия фазных напряжений выражена в большей степени, чем при аналогичных параметрах изоляции в режиме однофазной утечки. Для сетей малой протяженности $k_{NU} = 0,049 - 0,527$, средней протяженности – $k_{NU} = 0,044 - 0,291$, большой протяженности – $k_{NU} = 0,042 - 0,174$.

При емкостях изоляции сети относительно земли более 0,5 мкФ/фазу несимметрия активных сопротивлений изоляции практически не проявляется и ток утечки можно считать полностью емкостным.

Анализ зон определения напряжений $\dot{U}_{FA}, \dot{U}_{FB}, \dot{U}_{FC}, \dot{U}_0$ (рисунок 8) в несимметричных режимах утечки при различных сочетаниях $R_I = 10,5 - 300$ кОм/фазу и $C_I = 0,5 - 1$ мкФ/фазу показал, что несмотря на нелинейный характер изменения фазных напряжений сети относительно земли, напряжение $\dot{U}_0$ изменяется фактически по линейному закону.

В однофазных режимах утечки при емкости изоляции сети $C_I = 0,45$ мкФ/фазу напряжение поврежденной фазы $\dot{U}_{FA}$ не зависит от величины активного сопротивления R_I . Аналогично при емкости изоляции $C_I = 0,65$ мкФ/фазу напряжение $\dot{U}_{FB}$ не зависит от величины R_I . Зависимость напряжения $\dot{U}_{FC}$ от R_I сохраняется на всем диапазоне изменения C_I . Таким образом, при указанных емкостях и только в двух соответствующих фазах сети достигается резонанс тока при включении индуктивного сопротивления в нейтраль трансформатора. По этой причине в низковольтных электрических сетях в несимметричных режимах утечки возможен только частичный (неявно выраженный) резонанс тока.

На рисунках 9 и 10 представлены параметрические зависимости постоянных затухания электромагнитных колебаний T_I и T_{IF} в RC -контурах при различных комбинациях активного сопротивления R_I и емкости C_I изоляции, а также емкости C_A и активного сопротивления R_A току абсорбции.

Анализ влияния низкочастотных поляризаций на величину сопротивления изоляции сети показал, что на ток утечки оказывают влияние поляризационные процессы, при которых уровень активного сопротивления абсорбции не превышает 500 кОм/фазу и емкость абсорбции более 0,1 мкФ/фазу. Чем ниже уровень сопротивления изоляции сквозному току утечки, тем при более низких уровнях сопротивления абсорбции возникают условия, когда процессы поляризации приводят к снижению эквивалентного сопротивления цепи утечки до уровня ниже допустимого $R_{IF} < R_{доп}$. При активном сопротивлении менее 60 кОм/фазу фактический ток превышает величину сквозного тока утечки на 40 – 60% от его действующего значения.

Анализ режимов утечки тока при несимметрии параметров изоляции показал, что ПЭС ГП представляют опасность не только при низких активных сопротивлениях изоляции ($R_I \leq 31,5$ кОм/фазу) и высоких емкостях ($C_I \geq 0,25$ мкФ/фазу), но и при существующей до момента прикосновения человека несимметрии между фазными напряжениями сети относительно земли. Несимметрия фазных активных сопротивлений изоляции при определенных комбинациях повышает опасность тока утечки (например, если сопротивление опережающей фазы меньше, чем сопротивление отстающей фазы по отношению к фазе, в которой произошло прикосновение человека). В таких режимах ток утечки может превышать действующее значение I_h на 15 – 20 мА, что может оказаться критическим при низком уровне активного и высоком уровне емкостного сопротивлений фазной изоляции.

Таким образом, влияние процесса низкочастотной поляризации необходимо учитывать на стадии предварительного контроля уровня сопротивления изоляции, осуществляемого блокировочным реле утечки.

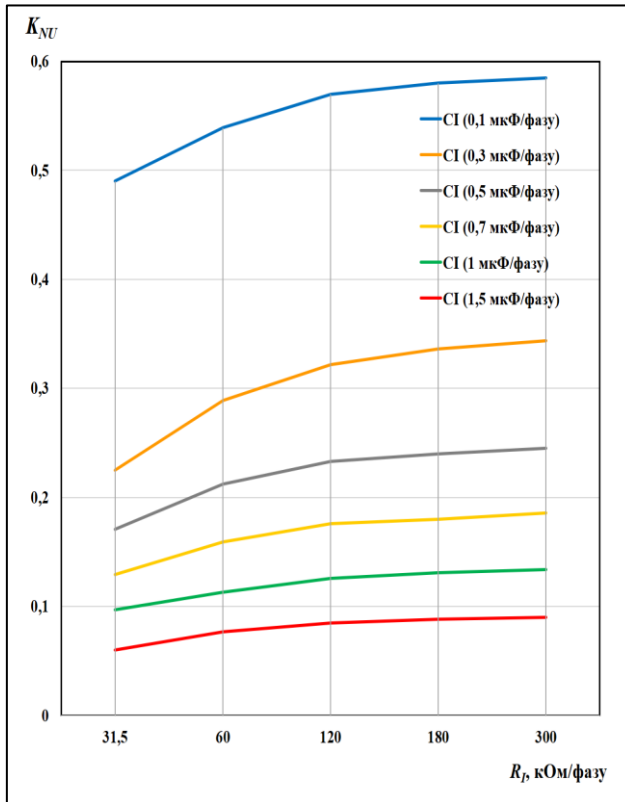


Рисунок 7 – Коэффициенты несимметрии фазных напряжений k_{NU} в режиме однофазной утечки тока через изоляцию

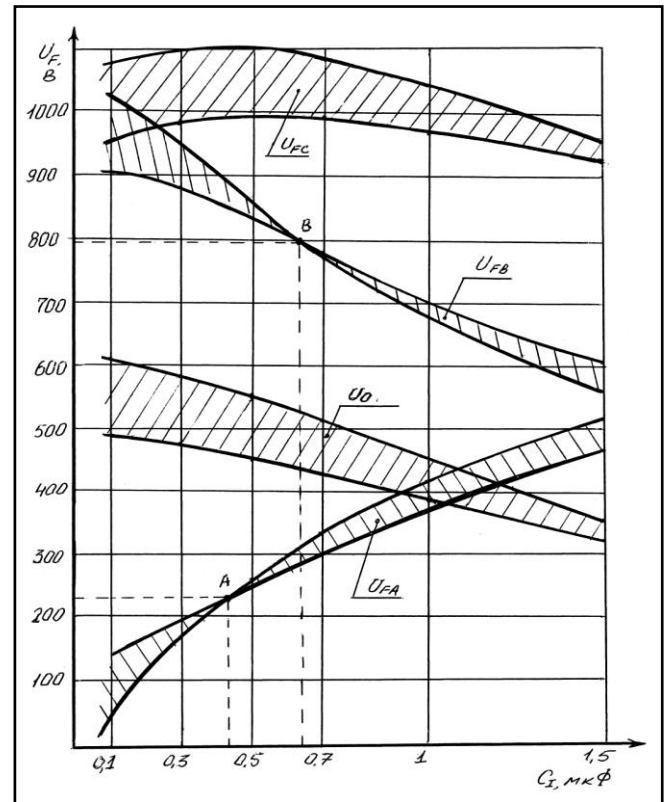


Рисунок 8 – Зоны изменения U_{FA} , U_{FB} , U_{FC} и U_0 при $R_I = 0,5 - 300$ кОм/фазу, $C_I = 0,1 - 1,5$ мкФ/фазу

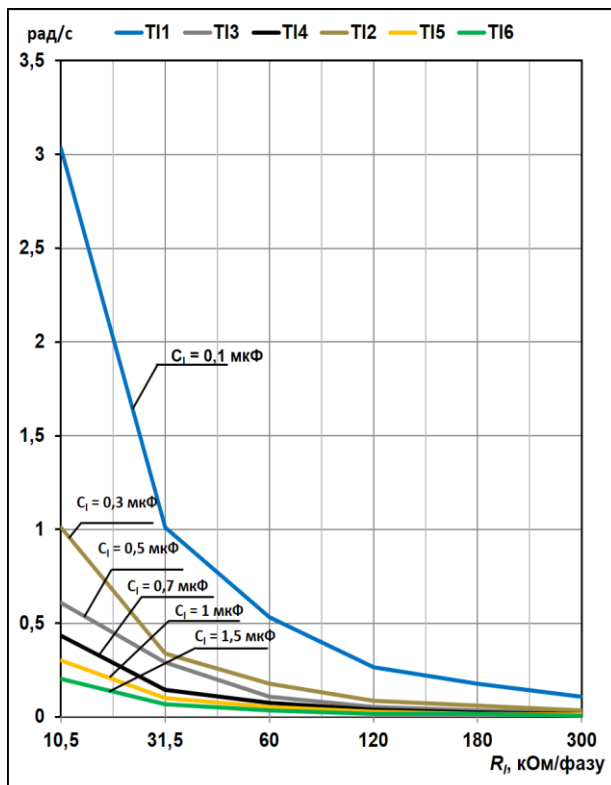


Рисунок 9 – Параметрические зависимости электромагнитной постоянной T_I от активного сопротивления R_I и емкости изоляции C_I

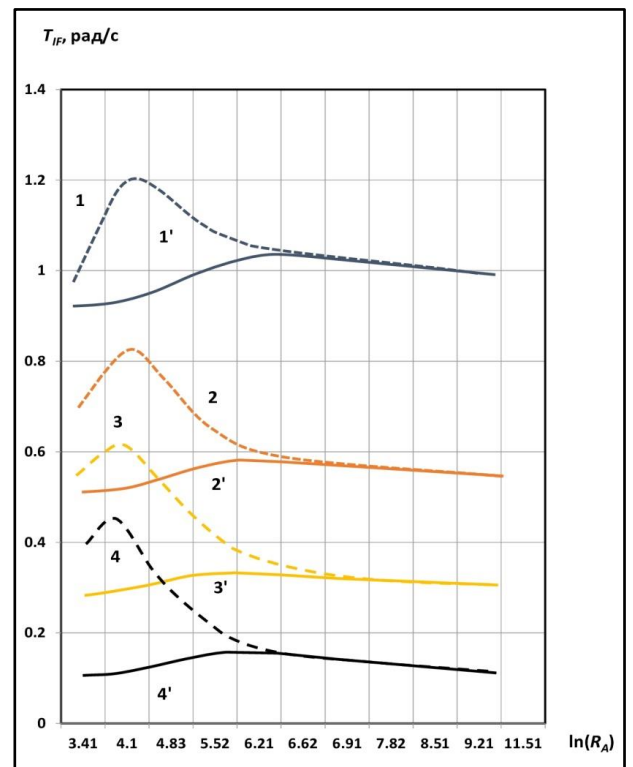


Рисунок 10 – Зависимости $T_{IF} = f(\ln(R_A))$ при $C_I = 0,1$ мкФ/фазу и $R_I = \text{var}$:
 1 – 31,5, 2 – 60, 3 – 120, 4 – 240 кОм, ($C_A = 0,1$ мкФ);
 1' – 31,5, 2' – 60, 3' – 120, 4' – 240 кОм, ($C_A = 0,01$ мкФ)

В результате проведенных исследований предложен метод оценки опасности режимов утечки по уровню тока через человека за время срабатывания УЗО, в зависимости от соотношений активного сопротивления и емкости RC-контуров изоляции и степени несимметрии фазных напряжений сети относительно земли.

В таблице 1 приведены параметры позиционирования опасности подземной электрической сети в случае однополюсного прикосновения человека к токоведущей фазе напряжением до 1140 В.

Таблица 1 – Параметры позиционирования опасности подземной электрической сети

Состояние электрической сети	Ток через человека I_h , $t = 0,2$ с за время срабатывания УЗО, мА	Активное сопротивление изоляции R_I , кОм/фазу	Емкость изоляции C_I , мкФ/фазу	Коэффициент несимметрии фазных напряжений, K_{NU}
потенциально безопасная	≤ 100	$\geq 31,5$	$\leq 0,1$	$> 0,89$
потенциально опасная	100 – 250	$\leq 31,5$ ----- 31,5 – 300	$\geq 0,1$ ----- 0,1 – 0,5	0,79 – 0,88
опасная	≥ 250	10,5 – 300	$\geq 0,5$	0,52 – 0,79

Снижение опасности тока утечки в электрической сети может быть достигнуто за счет реализации методов и средств пофазного контроля активного сопротивления изоляции и эффективной компенсации емкостного тока утечки в ПЭС ГП.

На основании результатов исследования режимов утечки разработан способ пофазного контроля сопротивления изоляции сети относительно земли, основанный на измерении комплексов токов в ветвях фильтра напряжения нулевой последовательности. Принципиальные схемы устройств для реализации способа приведены на рисунках 11 и 12.

Устройство содержит источник питания 1, токоограничивающий элемент 2, фильтр напряжения нулевой последовательности 3 (ФННП), состоящий из сопротивлений Z_1, Z_2, Z_3 , измерители тока 4, 5, 6, фазометры 7, 8, 9 и вольтметр 10 (рисунок 11).

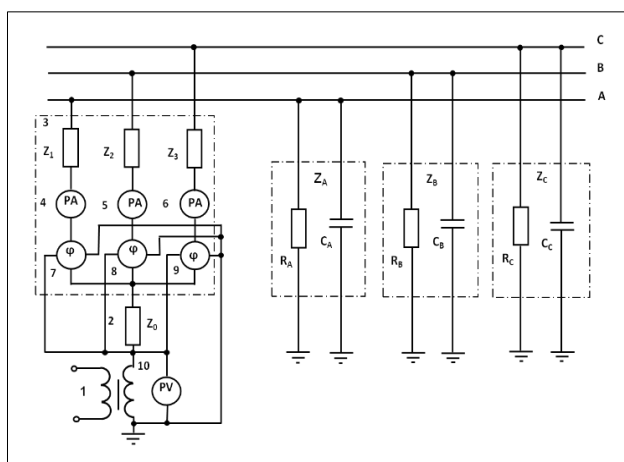


Рисунок 11 – Устройство пофазного контроля изоляции в отключенной электрической сети

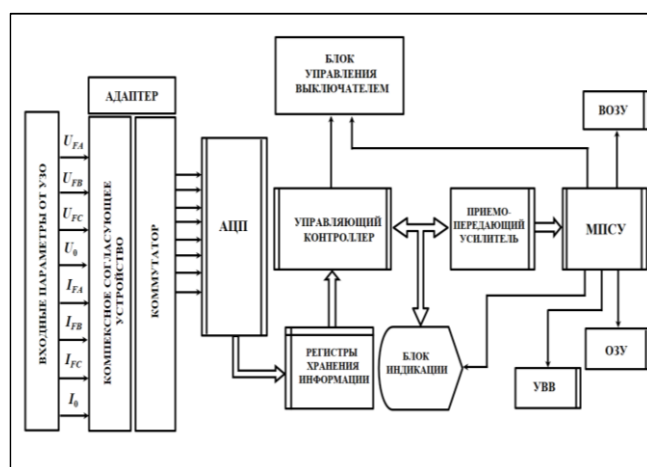


Рисунок 12 – Устройство оперативного

Сущность разработанного способа заключается в том, что в сеть подается напряжение от независимого источника питания, включенного последовательно с токоограничивающим

элементом между землей и общей точкой ФННП. Для упрощения процесса измерения одновременно осуществляется регистрация значения токов в каждой ветви ФННП и фазы этих токов относительно напряжения источника питания, после чего по результатам измерений определяются комплексы полных сопротивлений изоляции фаз. Представленная на рисунке 12 схема позволяет реализовать данный способ в режиме оперативного контроля параметров изоляции в подземной электрической сети.

На рисунках 13 и 14 приведены структурная и принципиальная схемы устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях.

Предлагаемое устройство содержит емкостной фильтр цепей измерителя 1, балластную емкость 2, измерительные трансформаторы тока 3, измерительный трансформатор напряжения 4, выпрямители 5, 6, усилители постоянного тока 7, 8, двухтактные магнитные усилители 9, компенсирующий дроссель 10, фильтр компенсатора 11 и выпрямитель 12.

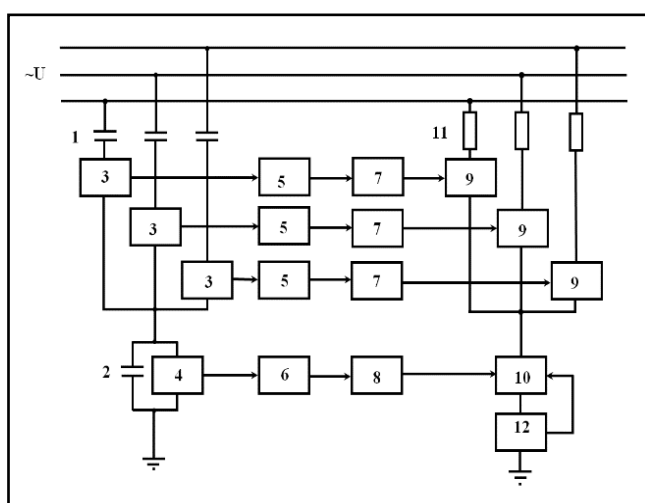


Рисунок 13 – Структурная схема устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки

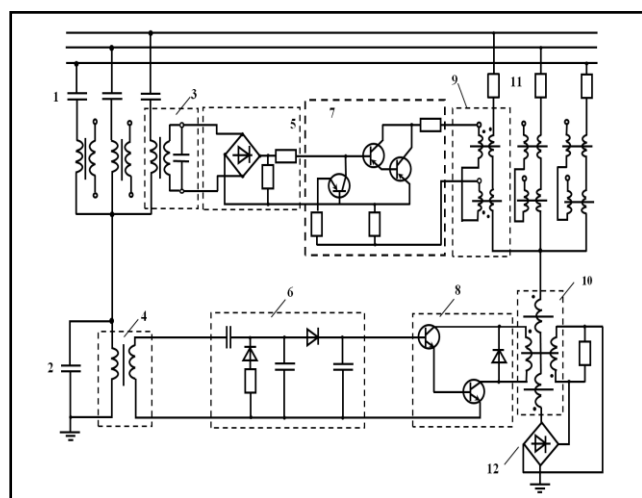


Рисунок 14 – Принципиальная схема устройства автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки

Разработанное устройство обеспечивает компенсацию фазных емкостных токов утечки через изоляцию электрической сети при возникновении несимметричных режимов утечки в подземной электрической сети за счет автоматической настройки компенсирующих дросселей фильтра компенсатора в резонанс с соответствующими емкостными токами фаз.

В четвертой главе приведены результаты исследования и анализа гармонического состава напряжения и токов в цепях утечки, генерируемых преобразователем частоты в ПКЭС, дана оценка степени влияния частотно-регулируемого электропривода, ФКУ и СФ на эффективность работы УЗО.

Рассмотрены режимы утечки для трех вариантов комплектования ПКЭС, оборудованной УЗО с 3RL-фильтром присоединения и компенсатором емкостного тока:

– ПКЭС-1 – питание АД головного привода скребкового конвейера по кабельной линии, протяженностью до 600 м, от силового трансформатора и ПЧ, установленных в энергопоезде на вентиляционном штреке;

– ПКЭС-2 – питание блока ПЧ-АД привода бесцепной или выносной системы подачи очистного комбайна от силового трансформатора по кабельной линии протяженностью до 600 м;

– ПКЭС-3 – питание АД привода ленточного конвейера по магистральной кабельной линии, протяженностью до 400 м от силового трансформатора до РП-НН с ПЧ, установленным в откаточном штрехе и далее по ответвительным кабелям протяженностью до 600 м.

В основу исследований положены имитационные модели ПКЭС для исследования режимов утечки тока, полученные в результате синтеза схем замещения ПЭС ГП, выполненного во второй главе диссертации.

На рисунке 15 приведена обобщенная имитационная модель ПКЭС.

Исследования показали, что применение в ПКЭС реакторов, ФКУ и СФ является эффективным комплексом средств, обеспечивающих требуемый уровень качества электроэнергии. Для фазных напряжений силовой сети коэффициенты 5-ой и 7-й гармонических составляющих $K_{U(5)}$ снижаются с 7% до 0,1%, $K_{U(7)}$ – с 3,5% до 0,16%. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения K_U снижаются с 8,05% до 0,22%. При этом, наличие компенсирующих устройств практически не оказывает влияние на спектральный состав гармоник, наводимых в цепях утечки тока через изоляцию. Гармонический состав токов и напряжений в цепях утечки, приведенный в таблице 2, в основном определяется параметрами модулированного напряжения ПЧ с АИН.

Таблица 2 – Гармонический состав токов и напряжений в цепях утечки через изоляцию

Номер гармоники	Режим утечки $I_y^{(3)}$		Режим утечки $I_y^{(1)}$	
	$K_{I(n)}\%$	$K_{U(n)}\%$	$K_{I(n)}\%$	$K_{U(n)}\%$
3	11	3,7	32	32
5	27	5,45	10,5	10,5
7	11	1,6	3	2,6
9	7	0,8	2,9	2,7

На рисунке 16 приведены зависимости изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения сети относительно земли от активного сопротивления и емкости изоляции в симметричном (а) и однофазном (б) режимах утечки.

Наибольшее искажение формы кривых токов и напряжений вносят 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники при емкости изоляции $C_I \leq 0,15$ мкФ/фазу и $R_I \geq 180$ кОм/фазу. Суммарные коэффициенты гармонической составляющей тока K_I значительно превышают свои значения относительно первой гармоники. Такой широкий спектр может оказать негативное влияние на организм человека. Например, значительно повышается вероятность возникновения фибрилляции в случае совпадения пика гармоник тока с P и T периодами сердечного цикла человека.

В режиме однофазной утечки на протяженных участках кабельных линий ПКЭС-1 при емкости изоляции 0,05 – 1 мкФ/фазу за время срабатывания УЗО мгновенное (амплитудное) значение начального тока утечки составляет $i_{max} = 55 - 490$ мА, установившееся действующее значение тока утечки $I_{h.c3} = 25 - 344$ мА, а в ПКЭС-2 – $i_{max} = 55 - 600$ мА, $I_{h.c3} = 30 - 428$ мА. С учетом времени воздействия обратной ЭДС отключаемого электродвигателя $t_{эдс} = 0,15 - 1,08$ с количество электричества в цепи утечки тока составляет $Q_h = 68,4 - 151,6$ мА·с, что значительно превышает допустимое значение $Q_{доп} = 50$ мА·с.

Коэффициент несимметрии фазных напряжений k_{NU} сети относительно земли для всех типов ПКЭС остается практически одинаковым и с ростом емкости снижается от 0,97 до 0,53.

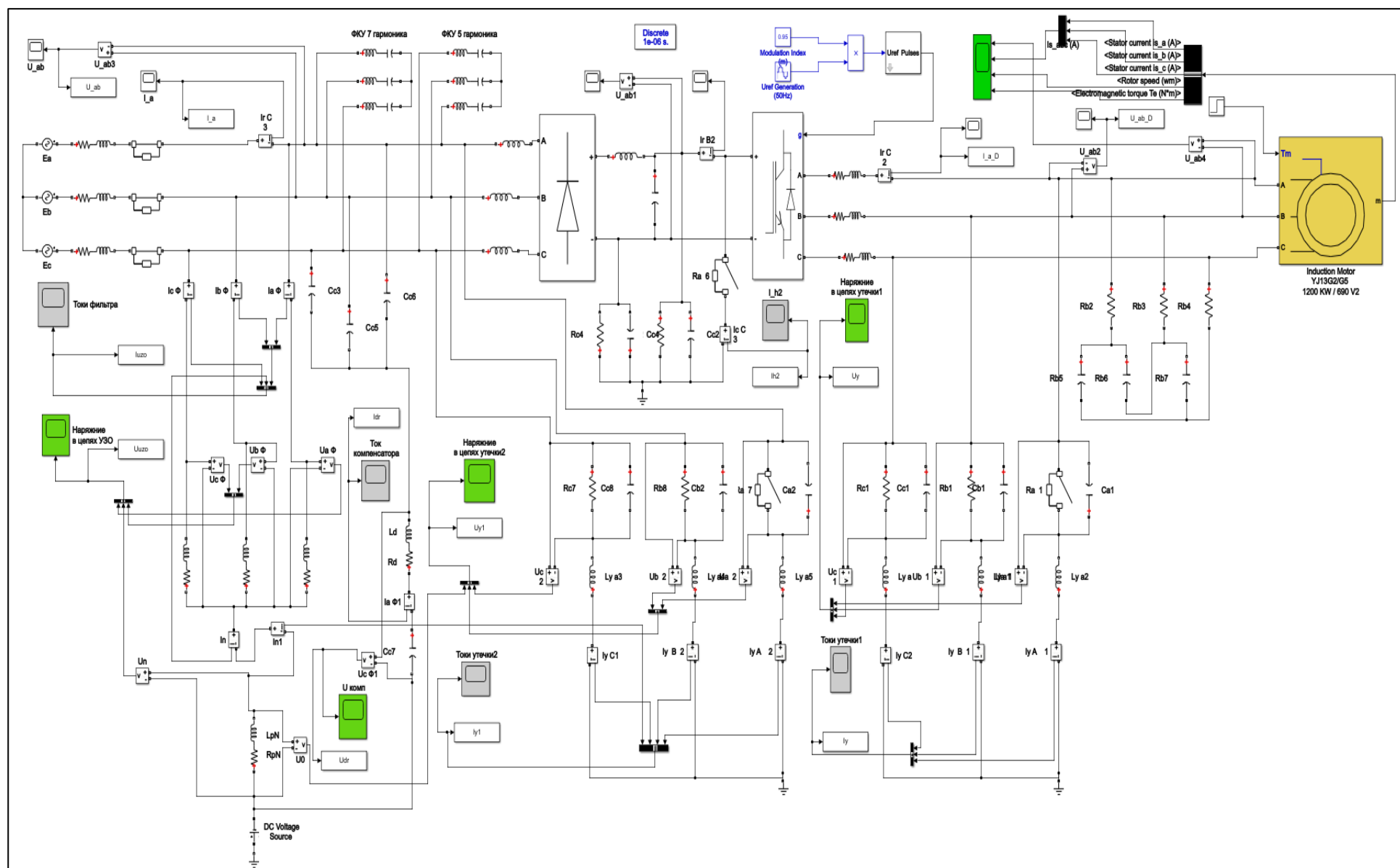


Рисунок 15 – Обобщенная имитационная модель ПКЭС

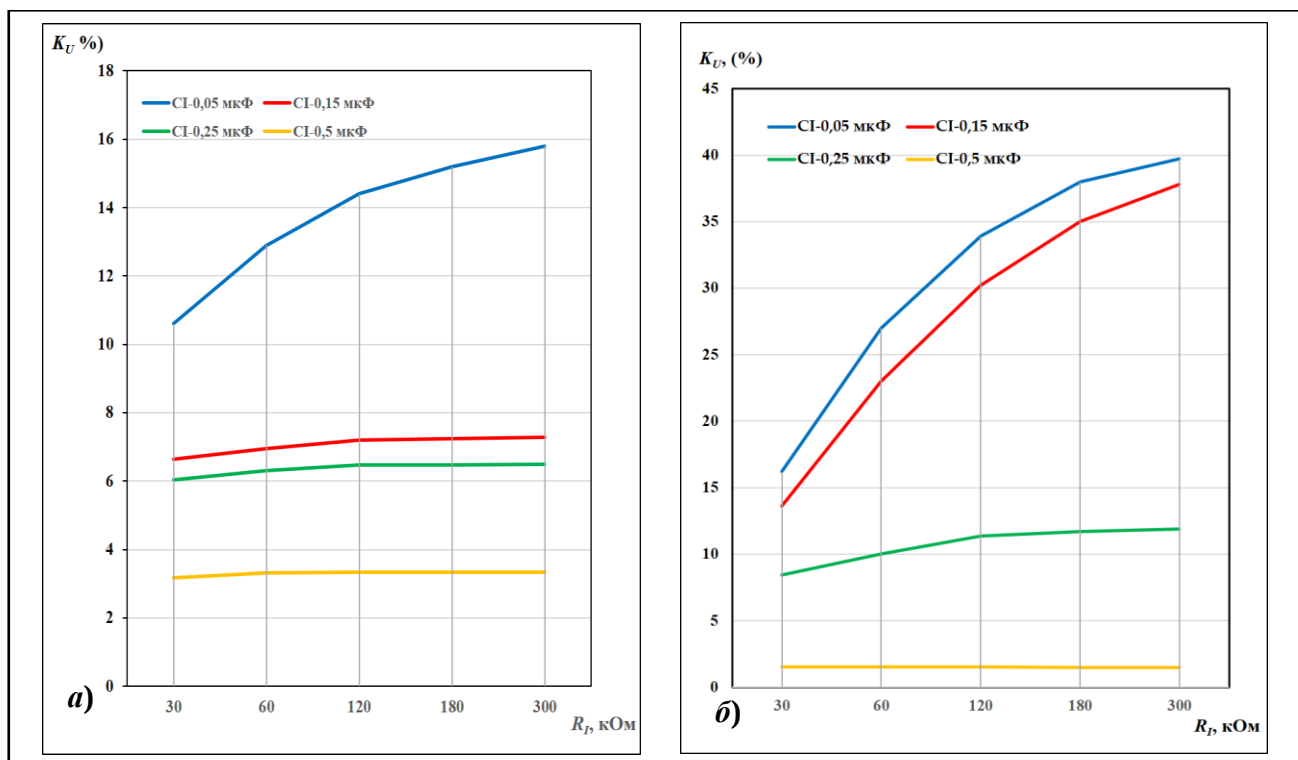


Рисунок 16 – Зависимости изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения сети относительно земли:

а) симметричный режим утечки; б) однофазный режим утечки

На рисунке 17 приведены диаграммы спектра тока через изоляцию и напряжения в ветвях фильтра и цепи измерителя УЗО для режимов симметричной и однофазной утечки. Анализ показал, что для ПКЭС характерно значительное влияние третьей гармонической составляющей тока и напряжения в ветвях фильтра присоединения ($K_{I(3)} = 7,82\%$ и $K_{U(3)} = 23,89\%$) и цепи измерителя ($K_{I(3)} = 8,66\%$ и $K_{U(3)} = 16,08\%$).

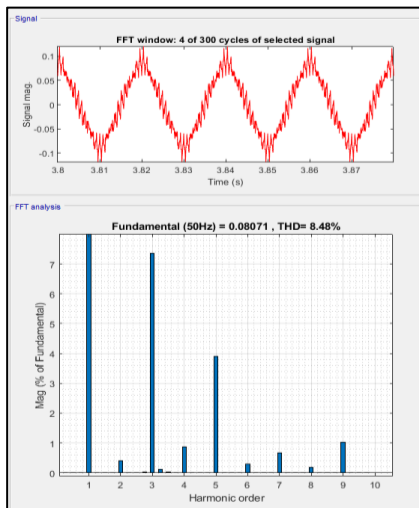
Для ПКЭС-2 в симметричном и однофазном режимах утечки влияние высших гармонических составляющих напряжения и тока на эффективность работы УЗО проявляется при емкостях менее 0,15 мкФ/фазу ($K_I = 0,24 - 0,58\%$ и $K_U = 0,08 - 2,29\%$). При этом наибольшее искажение контролируемого сигнала оперативного тока происходит в цепи измерителя УЗО. При значениях емкости изоляции более 0,15 мкФ/фазу воздействие высших гармонических составляющих можно считать минимальным и не оказывающим существенного влияния на эффективность работы УЗО.

Таким образом, эффективность работы серийных УЗО промышленной частоты обеспечивается только в плане отключения режима однофазной утечки тока в ПКЭС. Наличие гармонических составляющих напряжения в цепи измерителя и ветвях фильтра присоединения УЗО отрицательно влияет на работу электронной измерительной схемы, выпрямителя блока питания и блока управления компенсирующим дросселем из-за нарушения условия магнитной совместимости. Экспериментальные исследования показали, что при установке в ветвях присоединения и цепи измерителя УЗО частотного фильтра, настроенного на 3-ю гармоническую составляющую напряжения, происходит полная компенсация 3-ей гармоники.

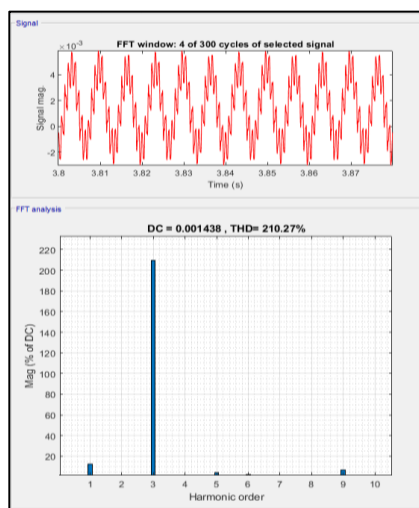
Проведен анализ эффективности работы компенсатора емкостного тока утечки серийно выпускаемых УЗО в подземной комбинированной электрической сети.

СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ
УТЕЧКИ ТОКА

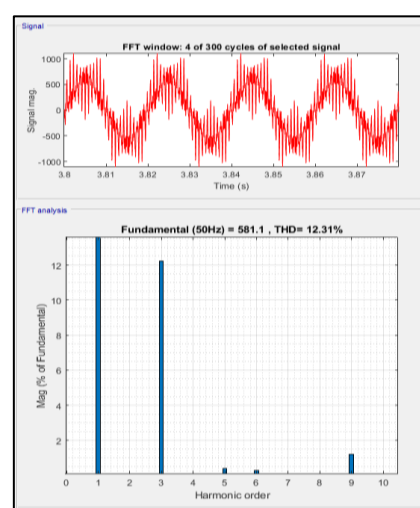
ТОК УТЕЧКИ
ЧЕРЕЗ ИЗОЛЯЦИЮ ФАЗЫ



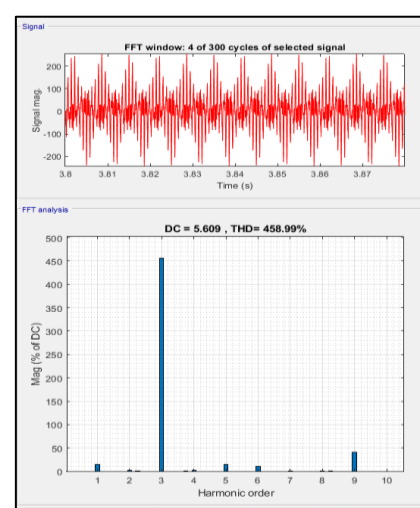
ТОК В ЦЕПИ
ИЗМЕРИТЕЛЯ УЗО



НАПРЯЖЕНИЕ В ВЕТВЯХ
ФИЛЬТРА УЗО



НАПРЯЖЕНИЕ В ЦЕПИ
ИЗМЕРИТЕЛЯ УЗО



РЕЖИМ ОДНОФАЗНОЙ
УТЕЧКИ ТОКА

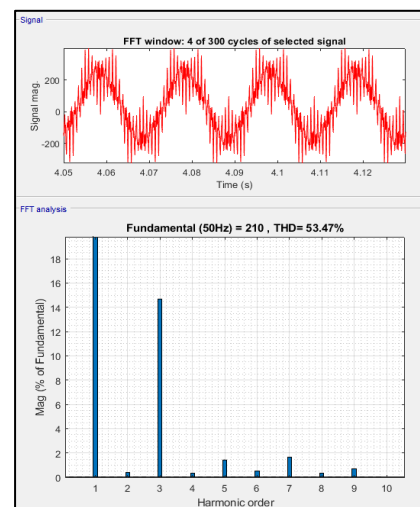
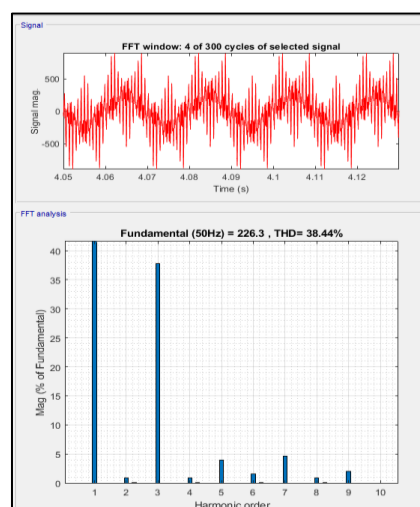
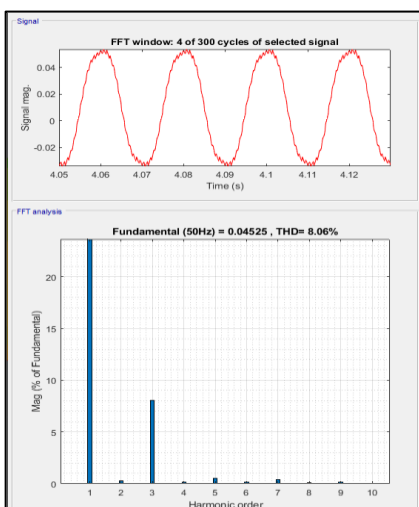
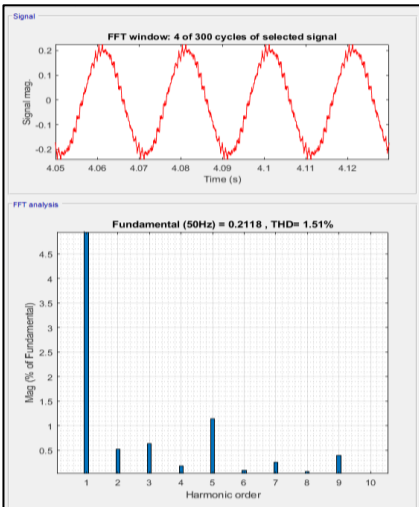


Рисунок 17 – Диаграммы спектра фазных токов утечки через изоляцию, напряжения в ветвях фильтра присоединения, напряжения и тока в цепи измерителя УЗО

В ПКЭС различной конфигурации при симметричном и однофазном режимах утечки тока через изоляцию и включенном компенсаторе напряжения в ветвях фильтра и в цепи измерителя УЗО соответственно остаются неизменными, как и при отключенном компенсаторе.

В режиме однофазной утечки уровень компенсации на протяженных участках кабельных линий ($C = 0,5$ мкФ/фазу) составляет 49 – 51%, а при емкости 1 мкФ/фазу – 61 – 71%, что соответствует техническим характеристикам компенсатора серийно выпускаемых УЗО.

При включенном компенсаторе на емкость 0,5 мкФ/фазу импульсное значение тока поврежденной фазы в начальный момент утечки составляет $i_{\text{пп1}} = 200 - 320$ мА, действующее значение тока за время срабатывания УЗО $I_{y.cз.} = 74 - 90$ мА.

При включенном компенсаторе на емкость 1 мкФ/фазу импульсное значение тока поврежденной фазы в начальный момент утечки составляет $i_{\text{пп1}} = 228 - 460$ мА, действующее значение тока за время срабатывания УЗО $I_{y.cз.} = 86 - 134$ мА.

После срабатывания УЗО и автоматического выключателя в цепи утечки возникает бросок тока, импульсное значение которого $i_{\text{пп2}} = 193 - 505$ мА сопоставимо с импульсным значением начального броска тока при возникновении однофазной утечки в ПКЭС-3 при отключенном компенсаторе $i_{\text{пп1}} = 295 - 650$ мА. С учетом того, что продолжительность затухания начального импульса тока утечки соизмерима с временем срабатывания УЗО $t_{yzo} = 0,07 - 0,1$ с и составляет $t_{\text{пп1}} = 0,05 - 0,1$ с, эффективность компенсации значительно снижается. Фактически компенсатор не успевает понизить ток утечки до допустимого безопасного уровня и обеспечить эффективную защиту человека, прикоснувшегося к токоведущей фазе электрической сети.

Для ПКЭС-1 при однофазной утечке тока на участке трансформатор – преобразователь частоты при настройке компенсатора УЗО в резонанс с емкостью 0,5 мкФ/фазу действующее значение тока утечки I_{h1} снижается со 183 до 128,5 мА (на 30%). При настройке компенсатора УЗО в резонанс с емкостью 1 мкФ/фазу действующее значение тока утечки I_{h1} снижается с 30 до 160 мА (на 46%).

Для ПКЭС-2 при однофазной утечке тока на участке ПЧ – АД при настройке компенсатора УЗО в резонанс с емкостью 0,5 мкФ/фазу действующее значение тока утечки I_{h1} снижается со 186 до 152 мА (на 18%). При настройке компенсатора УЗО в резонанс с емкостью 1 мкФ/фазу действующее значение тока утечки I_{h1} снижается с 268 до 170 мА (на 36%). УЗО с компенсатором емкостного тока обеспечивает защиту только на участке трансформатор – кабельная линия – преобразователь частоты.

Таким образом, эффективность работы компенсатора для ПКЭС не достаточна, т.к. уровень компенсации в некоторых случаях не достигает технических характеристик серийных УЗО.

Исследование режимов генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями в ПКЭС показало, что при однофазной утечке на участке до преобразователя частоты в поврежденной фазе, ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя УЗО через неуправляемый выпрямитель протекает рекуперированный постоянный ток, представляющий опасность, в случае его прикосновения к токоведущей части. При этом, токи в ветвях фильтра УЗО возрастают в 2 раза до 1,2 А, что за время воздействия ЭДС приводит к сильному нагреву проводников и негативно отражается на состоянии их изоляции.

В случае однофазной утечки тока на участке после преобразователя частоты продолжительность опасного воздействия определяется уровнем модулированного напряжения

Аналитические и экспериментальные исследования показали недостаточную эффективность работы блока защитного шунтирования УЗО из-за его низкой добротности, невозможности четкого определения вида утечки и высокой вероятности ложного срабатывания в аварийных режимах.

В качестве реализации данного способа разработано комбинированное устройство динамического торможения асинхронного электродвигателя преобразователем частоты с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения, позволяющее при помощи резистивного торможения и подачи постоянного тока в статорную цепь электродвигателя увеличить диапазон регулирования тормозного тока в нормальном режиме работы и ограничить опасное воздействие обратной ЭДС отключаемого устройством защитного отключения электродвигателя в аварийном режиме утечки тока через изоляцию.

[illegible]

23

тормозного тока в нормальном режиме работы и ограничения обратной ЭДС отключаемого устройством защиты электродвигателя в аварийном режиме утечки тока через изоляцию ТМ снабжен дополнительным контуром из управляющего транзистора VT_4 , транзистора VT_3 и второго тормозного резистора R_8 , подключенного к тормозному резистору R_4 по схеме делителя напряжения ДН, индуктивно-емкостным фильтром тока Φ , регулятором тока динамического торможения РТ, блоком управления БУ тормозным модулем и двухполюсным тиристорным контактором ТК.

Устройство реализует два рабочих тормозных режима в условиях симметрии параметров изоляции электрической сети и аварийный режим торможения при возникновении однофазной утечки тока в ПКЭС, позволяющий практически полностью погасить обратную ЭДС электродвигателя.

Повышение эффективности средств защитного отключения в ПКЭС может быть достигнуто за счет их модернизации путем установки фильтра высших гармонических составляющих напряжения, экранирования измерительных трансформаторов, применения пофазной компенсации емкостного тока утечки и ограничения времени генерирования обратной ЭДС за счет разработанного комбинированного способа динамического торможения.

В пятой главе приведены результаты исследования переходных процессов в ПЭС ГП при возникновении однофазной утечки тока, срабатывании УЗО и последующем отключении электродвигателей от источника питания.

Исследование переходных процессов при утечке тока за время срабатывания УЗО выполнялось на имитационных моделях с $3RL$ -фильтром и $3VDR$ -фильтром присоединения и компенсатором емкостного тока утечки.

В таблице 3 приведены параметры переходного процесса при возникновении однофазной утечки тока, с учетом наличия или отсутствия компенсации емкостного тока: действующее значение начального тока $I_{пп1}$ и время переходного процесса $t_{пп1}$; установившийся ток утечки $I_{h,уст}$ и количество электричества $Q_{h,сз}$ за время срабатывания УЗО; действующее значение броска тока $I_{пп2}$ и время переходного процесса $t_{пп2}$ после размыкания силовых контактов АВ; общее количество электричества $Q_{h,общ}$ в цепи утечки тока через человека, проснувшегося к токоведущей фазе.

Таблица 3 – Параметры переходного процесса при однофазной утечке тока через человека и срабатывании УЗО

C_L , мкФ/фазу	$I_{пп1}$, МА	$t_{пп1}$, с	$I_{h,уст}$, МА	$Q_{h,сз}$, МА·с	$I_{пп2}$, МА	$t_{пп2}$, с	$Q_{h,общ}$, МА·с
УЗО с $3RL$ -фильтром присоединения к электрической сети							
0,5	170	0,05	166,5	33,3	167	0,12	43,2
0,5 (комп.)	120	0,15	78	19,8	114	0,25	33,3
1	318	0,06	313,5	62,7	315	0,05	70,5
1 (комп.)	225	0,07	83	26,3	172	0,25	43,8
УЗО с $3VDR$ -фильтром присоединения к электрической сети							
0,5	197	0,05	193	38,6	195	0,08	46,3
0,5 (комп.)	163,5	0,17	126	28,9	129	0,15	38,6
1	325	0,05	323	64,6	324	0,05	71,9
1 (комп.)	167	0,1	128	41,2	131	0,15	43,4

Анализ результатов моделирования показал, что при отсутствии электрической нагрузки в режиме однофазной утечки параметры переходного процесса в электрической сети

напряжением 1140 В при срабатывании УЗО находятся критически близкими к допустимым значениям при емкости изоляции более 0,5 мкФ/фазу, даже при компенсации емкостного тока. Степень компенсации с учетом переходного процесса за время срабатывания УЗО с $3RL$ -фильтром не превышает 54%, а УЗО с VDR -фильтром – не более 60%, что является характерным для типа компенсации емкостного тока утечки, применяемого в серийно выпускаемых УЗТУ, но недостаточным для обеспечения условий безопасности.

При наличии в сети электродвигателей, способных после отключения в течении длительного времени (более 1 с) генерировать обратную ЭДС обоснованным является применение разработанного способа пофазной компенсации емкостного тока утечки.

Анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований позволил установить наличие тесной корреляционной связи между параметрами установившегося за время срабатывания УЗО тока $I_{h,уст}$ и электромагнитной постоянной затухания тока в контуре фазной изоляции T_{IH} , которая достаточно точно выражается в виде функции полинома третьей степени. Соответствие аналитической функции экспериментальным данным оценивалось по относительному ν (коэффициент вариации) и среднеквадратическому отклонению σ .

Для УЗТУ типа АЗУР с отключенным автоматическим компенсатором:

$$I_{h,уст} = 283,82 - 29,3 \cdot T_{IH} + 1,1 \cdot T_{IH}^2 + 0,013 \cdot T_{IH}^3; \quad (6)$$

Для УЗТУ типа УАКИ с отключенным компенсатором:

$$I_{h,уст} = 201,65 - 27,64 \cdot T_{IH} + 1,51 \cdot T_{IH}^2 - 0,025 \cdot T_{IH}^3; \quad (7)$$

Для УЗТУ типа УАКИ включенным компенсатором:

$$I_{h,уст} = 165,7 - 29,5 \cdot T_{IH} + 2,07 \cdot T_{IH}^2 - 0,039 \cdot T_{IH}^3. \quad (8)$$

Целью аналитического исследования переходных процессов также являлось математическое моделирование и анализ режимов генерирования обратной ЭДС после отключения участка сети с электродвигателем от питающего трансформатора устройством защитного отключения.

На рисунке 20 приведена имитационная модель для исследования режимов утечки в ПЭС ПЧ с асинхронным электродвигателем.

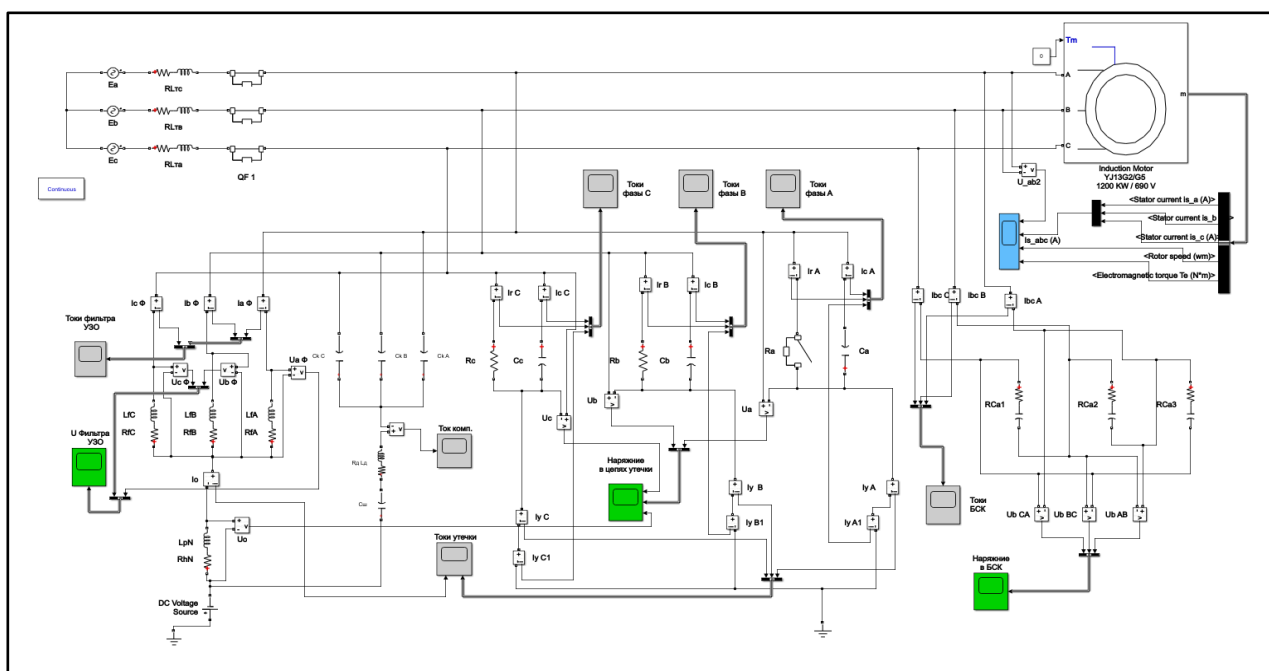


Рисунок 20 – Имитационная модель для исследования режимов утечки в ПЭС ПЧ с асинхронным электродвигателем

Анализ результатов моделирования показал, что при емкости изоляции сети более 0,5 мкФ/фазу существует опасность поражения человека электрическим током независимо от уровня активного сопротивления изоляции, т.к. в этом случае количество электричества Q_h , без учета $Q_{h,сз}$, может составлять до 150 мА·с, что значительно превышает допустимый в кратковременном режиме воздействия (до 1 с) уровень $Q_{доп} = 50$ мА·с. Длительность протекания тока I_h , превышающего длительно допустимый уровень 6 мА, составляет $t_{э,с} = 1,05 - 2,8$ с при емкости $C_I > 0,3$ мкФ/фазу. Начальное значение тока в зависимости от уровня активного и емкостного сопротивлений изоляции при напряжении $U_F = 660$ В изменяется в диапазоне $I_h = 70 - 325$ мА.

Наиболее опасным представляется режим генерирования обратной ЭДС электродвигателями мощностью до 45 кВт, работающими в режимах вентиляторной нагрузки или близких к холостому ходу.

Как показали проведенные исследования, наряду с динамическим торможением, одним из эффективных средств ограничения электромагнитного переходного процесса при генерировании обратной ЭДС является применение фрикционного торможения электродвигателя. При увеличении тормозного фрикционного момента на валу асинхронного электродвигателя мощностью 30 кВт в диапазоне $F_{FR} = 0,2 - 70$ Н·м время затухания тока утечки уменьшается с 3,5 с до 0,7 с. Так как при этом виде торможения возникают большие потери мощности при рекуперации электроэнергии в сеть, включение фрикциона должно быть синхронизировано с работой УЗО в режиме однофазной утечки тока.

В результате анализа результатов имитационного моделирования были получены зависимости количества электричества в цепи утечки $Q_h = f(T_{IH})$ и $Q_h = f(T_f)$ и соответствующие эмпирические уравнения, характеризующие режим генерирования обратной ЭДС, представленные в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Зависимости $Q_h = f(T_{IH})$

$P_{дв}, \text{ кВт}$	$T_f, \text{ рад}$	$Q_h, \text{ мА} \cdot \text{с}$
160	97,4	$Q_h = 19,46 + 170,6/T_{IH}$
110	142,1	$Q_h = 27,13 + 219,4/T_{IH}$
75	207,7	$Q_h = 29,54 + 253,7/T_{IH}$
45	347,7	$Q_h = 37,4 + 337,4/T_{IH}$
30	520,5	$Q_h = 53,2 + 486,6/T_{IH}$

Таблица 5 – Зависимости $Q_h = f(T_f)$

$T_{IH}, \text{ рад/с}$	$Q_h, \text{ мА} \cdot \text{с}$
34	$Q_h = 19,87 + 0,068 \cdot T_f$
11	$Q_h = 21,77 + 0,131 \cdot T_f$
7	$Q_h = 28,55 + 0,988 \cdot T_f$
5	$Q_h = 35,06 + 0,2488 \cdot T_f$
3	$Q_h = 45,94 + 0,311 \cdot T_f$
2	$Q_h = 62,2 + 0,365 \cdot T_f$

Наличие функциональной связи между количеством электричества Q_h и постоянными времени затухания электромагнитных колебаний T_{IH} и T_f позволило сделать вывод о возможности описания исследуемого режима при помощи моделей:

– линейная,
$$Q_h = 64,13 + 0,238 \cdot T_f - 2,87 \cdot T_{IH}; \quad (9)$$

– квадратическая,
$$Q_h = 96,4 + 0,28T_{IH} - 11,9T_f + 3,96T_{IH}^2 - 0,01T_{IH}T_f + 0,33T_f^2; \quad (10)$$

– по методу наименьших квадратов,
$$Q_h = 12,4 + 0,063 \cdot T_f + 268 / T_{IH}. \quad (11)$$

Полученные уравнения (6) – (11) составили основу для разработанной методики и алгоритма расчета токов утечки в ПЭС ГП, позволяющих выполнить оценку опасности поражения человека электрическим током с учетом продолжительности воздействия за время срабатывания различного типа УЗО и время генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

Результаты аналитического исследования переходных процессов в подземной электрической сети на имитационных моделях верифицированы стендовыми испытаниями, экспериментальными исследованиями на физической (натурной) модели шахтной электрической сети, а также в условиях шахт «Артем-1» (Украина), «Прогресс», «Киреевская», «Донская», «Шахта им. С.М. Кирова» (Россия).

На рисунках 21 и 22 приведены структурная и принципиальная схемы устройства для измерения количества электричества (УИКЭ) в цепи утечки тока трехфазной электрической сети, на базе которого реализуется оценка безопасности в ПЭС ГП.

Устройство относится к измерительным средствам, в частности к устройствам для измерения токов или напряжений с индикацией их наличия, и предназначено для измерения количества электричества, протекающего через искусственную цепь замыкания, имитирующую включение человека в электрическую сеть, за время срабатывания УЗО и генерирования обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

Устройство содержит блок имитации режима утечки тока 1, выпрямитель 2, интегратор 3, преобразователь напряжение-частота 4, регистрирующий прибор 5, цифровой индикатор 6, блок питания 7, блок контроля исправности 8, блок управления 9, предохранитель 10, шунтирующее сопротивление 11, имитатор электрических параметров сопротивления тела человека 12, операционные усилители 13, 14, 15, точечные диоды 16, конденсаторный фильтр 17, резисторы 18, 20, 21 и конденсатор 19, транзистор 22, балластные сопротивления 23, миллиамперметр 24, выключатели 25, 28, переключатели 26, 27, сигнальную лампу 29, зарядный конденсатор 30 и кнопку проверки 31.

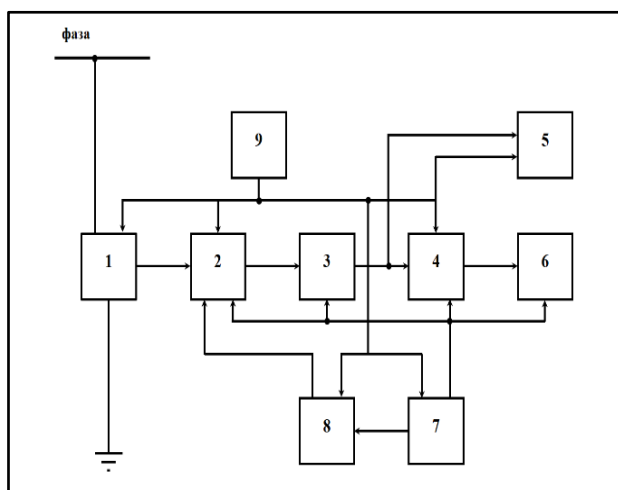


Рисунок 21 – Структурная схема УИКЭ

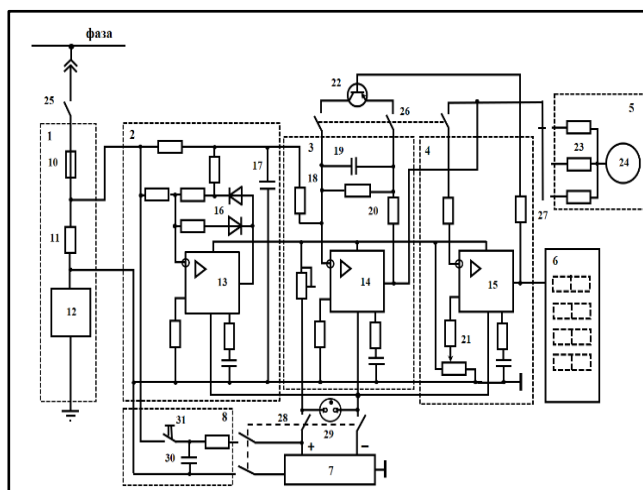


Рисунок 22 – Принципиальная электрическая схема УИКЭ

Техническим результатом, достигаемым в данном устройстве, является возможность определения потенциальной опасности утечки тока в трехфазной электрической сети, проверка эффективности работы устройств защитного отключения и средств гашения остаточного напряжения при генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной проблемы повышения безопасности эксплуатации электрооборудования на основе обоснования методов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий, являющихся научно-практическим вкладом в развитие теории электротехнических комплексов и систем.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Дано обоснование метода исследования и разработана математическая модель для анализа переходных процессов при несимметричных режимах утечки тока в подземной электрической сети, отличающаяся тем, что учитывает постоянные времени затухания электромагнитных колебаний в активно-емкостных контурах фазной изоляции и в активно-индуктивных контурах обмоток асинхронных электродвигателей.

2. Разработаны имитационные модели подземных комбинированных электрических сетей, отличающиеся тем, что учитывают спектральный состав напряжения и тока утечки через изоляцию, влияющих на работоспособность устройств защитного отключения. Установлено, что серийно выпускаемые УЗТУ не в полной мере соответствуют требованиям безопасности и подлежат модернизации.

3. Установлены закономерности, отличающиеся тем, что учитывают несимметрию фазных напряжений и токов утечки в зависимости от изменения параметров сопротивления изоляции подземной электрической сети. В качестве критерия предлагается использовать коэффициент несимметрии фазных напряжений сети относительно земли.

4. Обоснован метод оценки состояния безопасности подземных электрических сетей, отличающийся тем, что учитывает уровень и длительность воздействия тока на человека в зависимости от параметров фазной изоляции в несимметричных режимах утечки. Установлено отрицательное влияние процесса низкочастотной поляризации в изоляции при уровне активного сопротивления сквозному току $R_I \leq 31,5$ кОм/фазу и емкости $C_I \geq 0,3$ мкФ/фазу, что приводит к увеличению фактического тока утечки на 30 – 40% относительно настройки на ток срабатывания УЗТУ.

5. Разработан метод и средства пофазного контроля сопротивления изоляции с компенсацией емкостного тока, отличающийся тем, что учитывает зависимости изменения фазных напряжений и токов утечки от параметров изоляции подземной электрической сети в несимметричных режимах.

6. Установлено, что применение в ПКЭС фильтро-компенсирующих устройств, токоограничивающих реакторов и синус-фильтров является эффективным средством повышения качества электроэнергии за счет снижения коэффициентов 5-ой и 7-й гармонических составляющих напряжения $K_{U(5)}$ с 7% до 0,1%, $K_{U(7)}$ – с 3,5% до 0,16%. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих K_U снижаются с 8,05% до 0,22%. При этом, наличие компенсирующих устройств практически не оказывает влияние на спектральный состав наводимых в цепях утечки тока через изоляцию 3-ей, 5-ой, 7-ой и 9-ой гармоник, который определяется параметрами модулированного напряжения преобразователя частоты.

7. Установлено, что в ПКЭС эффективность серийно выпускаемых УЗТУ снижается из-за генерирования в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя 3-ей гармонической составляющей напряжения и повышенного рекуперированного через неуправляемый вентильный выпрямитель тока при переходе отключаемого асинхронного электродвигателя в режим генерирования обратной ЭДС, что отрицательно влияет на работу электронной измерительной схемы, выпрямителя блока питания и блока управления компенсирующим дросселем из-за

нарушения условия магнитной совместимости. Повышение эффективности УЗО достигается за счет их модернизации путем установки фильтра высших гармонических составляющих напряжения, экранирования измерительных трансформаторов, применения пофазной компенсации емкостного тока утечки и ограничения времени генерирования обратной ЭДС комбинированным устройством динамического торможения.

8. Установлено, что в ПЭС ГП существует опасность электротравматизма, за счет превышения действующих значений тока за время срабатывания УЗО и допустимого значения количества электричества, генерируемого в цепь утечки отключаемым электродвигателем. Наиболее опасными являются критические случаи прикосновения на участках между трансформатором и ПЧ в составе энергопоезда, в звене постоянного тока ПЧ и на участке блока ПЧ – АД.

9. Совокупность разработанных методов и средств пофазного контроля изоляции, компенсации емкостных токов утечки, контроля и ограничения режима генерирования обратной ЭДС отключаемых электродвигателей позволяет обеспечить эффективность и безопасность эксплуатации ЭТКС в подземных электрических сетях горных предприятий напряжением до 1140 В.

Личный вклад автора. Установлены закономерности, отражающие характер изменения фазных напряжений и токов утечки в зависимости от параметров сопротивления изоляции с учетом электромагнитных переходных процессов при срабатывании устройств защитного отключения, генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями, низкочастотной поляризации и условий резонанса тока в колебательных контурах фазной изоляции.

Разработана математическая модель для анализа переходных процессов при различных режимах утечки тока в подземной электрической сети и имитационные модели для исследования режимов утечки тока через изоляцию в ПКЭС с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Разработаны методы и средства пофазного контроля изоляции, компенсации емкостных токов утечки, защитного отключения, контроля и ограничения режимов генерирования обратной ЭДС отключаемыми асинхронными электродвигателями. Разработан метод оценки состояния безопасности ПЭС ГП. Личный вклад соискателя подтверждается 20 научными публикациями без соавторов, включая 3 лицензионные программы для ЭВМ, в которых отражены все основные научные положения диссертационной работы.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Пичуев, А.В. Классификация средств технического контроллинга электробезопасности / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 1. – С. 383 – 385.
2. Пичуев, А.В. Методологический подход к анализу влияния нестационарных режимов на электробезопасность процессов горного производства / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 2. – С. 372 – 374.
3. Пичуев, А.В. Информационно-аналитическая система анализа надежности и безопасности эксплуатации электроустановок на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 3. – С. 355 – 359.

4. Пичуев, А.В. Параметрические зависимости сопротивления изоляции рудничных участков электрических сетей / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 4. – С. 398 – 400.
5. Пичуев, А.В. Методологические аспекты системного анализа электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 5. – С. 352 – 355.
6. Пичуев, А.В. Системный анализ электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Сб. научных трудов. «Электрификация и энергоэффективность». Тематическое приложение. – ГИАБ. – 2011. – С. 319 – 321.
7. Пичуев, А.В. Системный подход в решении проблемы электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев // Сб. научных трудов. «Электрификация и энергоэффективность». Тематическое приложение. – ГИАБ. – 2011. – С. 370 – 372.
8. Пичуев, А.В. Оценка опасности электротравматизма при несимметрии фазных сопротивлений изоляции рудничной электрической сети / А.В. Пичуев, А.В. Ляхомский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 2. – С. 355 – 359.
9. Пичуев, А.В. Методологические аспекты системного анализа электробезопасности на горных предприятиях России / А.В. Пичуев, А.В. Ляхомский // Приложение ГИАБ – М.: Сб. научных трудов МГГУ «Неделя горняка-2013» – 2013. – С. 486 – 494.
10. Пичуев, А.В. Оценка опасности несимметричных режимов утечки тока через изоляцию в подземных электрических сетях горных предприятий / В.Л. Петров, А.В. Пичуев / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022. – № 5. – С. 15 – 22.

Статьи, индексируемые в научной базе данных SCOPUS

11. Pichuev, A.V. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current / A.V. Pichuev, V.L. Petrov // Mining Science and Technology (Russia). 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

12. Пичуев, А.В. Программа расчета режимов утечки тока через изоляцию при проектировании рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662614. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 16.10.2020.
13. Пичуев, А.В. Программа расчета режимов утечки тока через фазную изоляцию при генерировании обратной ЭДС отключаемыми асинхронными электродвигателями / А.В. Пичуев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662883. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 20.10.2020.
14. Пичуев, А.В. Программа моделирования устройств контроля изоляции и защитного отключения с автоматическим компенсатором и активно-вентильным фильтром присоединения к шахтной подземной электрической сети / А.В. Пичуев, И.А. Британ, Н.В. Солдайкин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618334 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 21.04.2023.
15. Пичуев, А.В. Программа моделирования режимов утечки тока через изоляцию в шахтной подземной электрической сети с частотно-регулируемым асинхронным электродвигателем / А.В. Пичуев, Ю.В. Шевырëв, Н.Ю. Шевырева // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617964 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 17.04.2023.

16. Пичуев, А.В. Программа моделирования нестационарных процессов в шахтной подземной электрической сети с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом с автономным инвертором напряжения / В.Л. Петров, А.В. Пичуев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618122 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 19.04.2023.
17. Пичуев, А.В. Программа для исследования влияния процесса низкочастотной поляризации в изоляции шахтной подземной электрической сети на электробезопасность / А.В. Пичуев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618507 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 26.04.2023.
18. Пичуев, А.В. Программа для исследования гармонических составляющих напряжения в цепях утечки тока через изоляцию подземной комбинированной электрической сети / В.Л. Петров, А.В. Пичуев, Д.Е. Париевский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618736 – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 19.04.2023.

Авторские свидетельства и патенты

19. Пичуев, А.В. Способ определения параметров изоляции фаз сети с изолированной нейтралью / Ю.Г. Бацезев, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, С.Г. Лаевский // – АС № 1780044. – 1992. – БИ № 45.
20. Пичуев, А.В. Устройство автоматической пофазной компенсации емкостных токов утечки в подземных электрических сетях / А.В. Пичуев, В.Л. Петров // – Патент на полезную модель № 215031 – 2022. – Бюллетень № 33 от 25.11.2022.

Монографии

21. Пичуев, А.В. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев и др. – Чита: РИК ЧитГУ. – 2009. – 268 с.
22. Пичуев, А.В. Исследование влияния нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий / А.В. Пичуев, В.И. Петуров, И.Ф. Суворов. – М.: Изд. «Горная книга». – 2011. – 286 с.
23. Пичуев, А.В. Система управления электробезопасностью на горных предприятиях / А.В. Пичуев, С.М. Карпенко. – М.: МИЭЭ. – 2019. – 224 С.
24. Пичуев, А.В. Способы и средства обеспечения электробезопасности на горных предприятиях / А.В. Пичуев, С.М. Карпенко, В.И. Петуров. – М.: МИЭЭ. – 2019. – 136 С.

Статьи в ведущих рецензируемых журналах

25. Пичуев, А.В. Контроллинг электробезопасностью в электроустановках / А.В. Пичуев, В.И. Щуцкий // Электробезопасность. – 1997. – № 1. – С. 45 – 47.
26. Пичуев, А.В. Оценка электробезопасности участков электрических сетей шахт и рудников / А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов, В.И. Петуров // Электробезопасность. – 1997. – № 3 – 4. – С. 56 – 59.
27. Пичуев, А.В. Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при генерировании электродвигателями обратной ЭДС / А.В. Пичуев // Электробезопасность. – 2010. – № 4. – С. 19 – 23.
28. Пичуев, А.В. Результаты корреляционного анализа влияния обратной ЭДС выбега электродвигателей на электробезопасность / А.В. Пичуев // Электробезопасность. – 2011. – № 1. – С. 39 – 42.

29. Пичуев, А.В. Режимы несимметричной утечки тока через изоляцию рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев // *Электробезопасность*. – 2011. – № 2. – С. 28 – 33.
30. Пичуев, А.В. Опасность электропоражения при несимметрии параметров изоляции рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев // *Электробезопасность*. – 2011. – № 3. – С.32 – 41.
31. Пичуев, А.В. Параметры изоляции электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции / А.В. Пичуев // *Электробезопасность*. – 2011 – № 4. – С. 22 – 28.

Публикации в научных сборниках и трудах

32. Пичуев, А.В. Принципы создания устройств контроля и защиты в рудничных высоковольтных сетях / В.И. Петуров, А.В. Пичуев // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции молодых ученых «Интенсификация горнорудного производства». – Свердловск. – 1989. – С. 48 – 50.
33. Пичуев, А.В. Методика оценки участковых электрических сетей шахт и рудников по условиям электробезопасности / А.В. Пичуев, В.И. Петуров, Ю.Г. Бацежев // Тезисы докладов Международной конференции «Электробезопасность-90». – Болгария. – Варна. – 1990. – С. 58 – 60.
34. Пичуев, А.В. Метод контроля изоляции для подсистемы электробезопасности АСУЭШ / А.В. Пичуев, Ю.Г. Бацежев, В.И. Петуров // Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции «Электро- и пожаробезопасность при эксплуатации электроустановок». – Душанбе. – 1990. – С. 10 – 11.
35. Пичуев, А.В. Математическое моделирование переходных процессов в электрической сети с изолированной нейтралью / А.В. Пичуев, В.И. Петуров, И.Ф. Суворов // Тезисы докладов X научной конференции «Моделирование электроэнергетических систем». – Каунас. – 1991. – С. 68–70.
36. Пичуев, А.В. Метод определения параметров сопротивления изоляции в рудничных сетях с изолированной нейтралью / А.В. Пичуев, В.И. Петуров, М.Г. Павлов // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции молодых ученых «Интенсификация горнорудного производства». – Свердловск – 1991.– С. 38–39.
37. Пичуев, А.В. Эквивалентирование группы асинхронных электродвигателей при моделировании переходных процессов в рудничной сети / А.В. Пичуев // Сборник докладов Международного семинара «Проблема повышения надежности, уровня безаварийности эксплуатации электротехнических и электромеханических систем». –М.: МГГУ. – 1993. – С. 62–65.
38. Пичуев, А.В. Математический анализ режимов утечки тока через изоляцию в участковых сетях / А.В. Пичуев // Сб. материалов Международного научно-практического семинара «Проблемы и перспективы развития горной техники». – М.: МГГУ. – 1995. – С. 41 – 43.
39. Пичуев, А.В. Контроллинг параметров изоляции электрооборудования на горных предприятиях / А.В. Пичуев, В.И. Щуцкий // Сб. материалов Международного научно-практического семинара «Проблемы и перспективы развития горной техники». – М.: МГГУ. – 1995. – С. 37 – 38.
40. Пичуев, А.В. Средства технического контроллинга электробезопасности / А.В. Пичуев // Сб. научных трудов "Энергетика в современном мире", IV Всероссийская научно-практическая конференция, т.1. – Чита: ЧитГУ. – 2009. – С. 75 – 80.

41. Пичуев, А.В. Сравнительный анализ режимов утечки при несимметрии параметров изоляции рудничной электрической сети / А.В. Пичуев, В.И. Петуров // XI Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения», Сб. научных Трудов. – Чита – 2011. – С. 143–147.
42. Пичуев, А.В. Оценка степени несимметрии параметров изоляции при анализе режимов утечки в рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев, В.И. Петуров // XI Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения», Сб. научных трудов. – Чита. – 2011. – С. 148 – 152.
43. Пичуев, А.В. Влияние несимметрии параметров изоляции на опасность электропоражения при прикосновении человека к фазе рудничной участковой электрической сети / А.В. Пичуев, В.И. Петуров // XI Международная научно-практическая конференция «Кулагинские чтения», Сб. научных трудов. – Чита. – 2011. – С. 133–136.
44. Пичуев, А.В. Компенсация емкостных токов утечки в низковольтных электрических сетях в условиях неявно выраженного резонанса / А.В. Пичуев // Сб. докладов XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». – Томск; ТПУ. – 2012. – С. 125 – 128.
45. Пичуев, А.В. Влияние низкочастотных поляризаций на величину тока утечки в изоляции электрической сети напряжением до 1 кВ / А.В. Пичуев // Сб. докладов XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». – Томск; ТПУ, 2012. – С. 129 – 133.
46. Пичуев, А.В. Методология исследований и принципы построения системы управления электробезопасностью / А.В. Пичуев, А.В. Ляхомский // V Международная научно-практическая конференция «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии». – Челябинск, 2012. – С. 66 – 72.
47. Пичуев, А.В. Компенсация емкостных токов утечки в рудничных участковых электрических сетях / А.В. Пичуев, В.И. Петуров // Сб. трудов V всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск, 2012. – С. 142 – 143.
48. Pichuev, A.V. The principles of a systematic approach to the analysis of electrical safety at mining enterprises / A.V. Pichuev, A.V. Lyakhomsky // MINER'S WEEK – 2015 REPORTS OF THE XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM – 2015. P. 600 – 604.
49. Pichuev, A.V. Legal aspects of electrical safety at mining enterprises of Russia / A.V. Pichuev, Yu Shevyrev // MINER'S WEEK – 2015 REPORTS OF THE XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM. – 2015. P. 605 – 612.